

doi: 10.3788/gzxb20124111.1267

开环全光混沌通信系统中的光纤信道结构

刘慧杰¹, 冯久超², 任斌¹

(1 东莞理工学院 电子工程学院, 广东 东莞 523808)

(2 华南理工大学 电子与信息学院, 广州 510641)

摘 要:根据外光反馈半导体激光器及光纤传输方程, 构建了基于光纤信道的开环全光混沌通信系统. 考虑混沌调制和混沌键控两种信息加密方法, 采用先进的校正相减解调法恢复信息, 并且通过解调 Q 因子衡量系统性能. 以不同次序排列单模光纤和色散补偿光纤构成 4 种结构的光纤信道, 通过数值仿真分析信道结构对系统通信性能的影响. 结果表明, 为光纤信道保留少量的负累积色散有利于改善远程传输性能; 两端补偿和中间补偿这两种对称结构的性能一致, 对称结构优于非对称结构即预补偿和后补偿, 适用于远程高速开环全光混沌通信. 另外, 无论光纤信道结构怎样, 在远程高速激光混沌通信中混沌调制方法总是优于混沌键控方法.

关键词:混沌通信; 光纤信道; 外部光反馈; 开环

中图分类号: TN248; TN918; TN919 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2012)11-1267-7

0 引言

基于半导体激光器的光纤激光混沌通信系统具有动力学复杂、频带宽以及衰减低的特征, 在未来远程高速保密通信中具有广阔的应用前景. 目前半导体激光器混沌通信领域的研究仍处于起步阶段. 外部光反馈、外部光注入及光电反馈是三种最常用的获得激光器混沌光输出的方法^[1-3]. 对于外部光反馈结构, 通过调节反馈系数和驱动电流可以使激光器呈现极为复杂的混沌特性, 通过双光反馈还可以抑制外腔延时特性, 进一步提高其输出被复制或提取的难度, 因此外光反馈半导体激光器特别适用于保密通信^[4]. 然而, 目前关于外部光反馈混沌通信的研究非常缺乏^[2-6]. 外光反馈半导体激光器混沌通信系统通常有闭环和开环两种配置. 其中闭环配置和弱注入条件下的开环配置都对收发激光器的参量匹配提出了严格要求. 而强注入条件下的开环配置系统的同步和通信对参量匹配要求较低, 因此更适合实际应用^[7-9].

目前在大多数激光混沌通信的研究中对传输信道进行了简化, 即假设发射到接收的距离为零, 这被称为背对背结构. 并且已经在单向及双向的背对背结构通信系统的理论分析和实验方面取得了丰硕的

成果^[6-10]. 然而, 关于光纤传输的激光混沌通信的研究甚少, 且已有的研究中或者以高斯脉冲为模型分析光纤信道参量对通信的影响, 或者仅分析混沌激光在一种固定光纤中的传输情况, 同时没有全面考虑色散补偿、高阶色散等问题^[11-15]. 文献[7]虽然研究了光纤信道结构对激光混沌通信系统的影响, 但所采用闭环配置通信系统难以实现, 且仅对比了两种信道结构. 同时, 该文献表明在光纤传输激光混沌通信系统中混沌键控 (Chaotic Shift Keying, CSK) 方法优于混沌调制 (Chaotic Modulation, CM) 方法, 该结论与背对背结构系统的研究结果不同. 因此, 对光纤激光混沌通信系统中信道结构、调制方法等问题需要进一步分析和论证.

与以往的激光混沌通信系统相比, 本文构建并研究的系统模型具有两个突出优点: 一是以具有色散补偿的光纤链路作为传输信道, 并综合考虑信道中的各种影响因素. 二是采用强注入条件下的开环配置, 使系统易于实用化. 采用比文献[7]更多样的光纤信道色散补偿结构, 分析光纤信道结构、光纤平均注入功率、传输距离以及调制方法等因素对信息解调及通信性能的影响, 获得了适合远程开环激光混沌保密通信的光纤信道结构及信息调制方法. 本文使半导体激光器混沌通信中光纤信道结构的研究

基金项目:国家自然科学基金(No. 60872123)、国家-广东省自然科学基金联合基金(No. U0835001)、中国博士后基金(No. 20110490883)和广东省自然科学基金(No. S2011010002144)资助

第一作者:刘慧杰(1979—), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为混沌保密通信、数字信号处理、半导体激光器. Email: liuhj@dgut.edu.cn

导师:冯久超(1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为非线性动力学及混沌理论应用, 数字通信, 数字信号处理. Email: fengjc@scut.edu.cn

收稿日期: 2012-07-09; **修回日期:** 2012-08-02

更为完善,也为远程光纤激光混沌通信的应用提供了依据.

1 理论模型

图1为数值模拟所用的光纤激光混沌通信系统.发射系统由受到外部光反馈的法布里-泊罗半导体激光器二极管构成,接收系统采用与发射系统类似的激光器二极管,但无外部光反馈作用,从而形成开环配置的系统结构.图1中TL和RL分别代表发射和接收激光器,隐藏在发射系统混沌光中的信息 $S(t)$ 经光纤链路传输后一路注入到接收系统,一路注入到减法器,二者通过校正相减解调法得到恢复信息 $S'(t)$,LPF为低通滤波器.

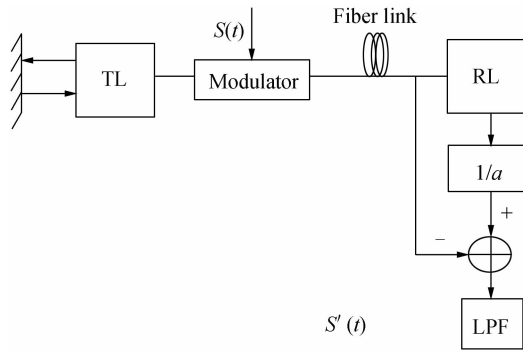


图1 光纤激光混沌通信系统原理

Fig. 1 Diagram of chaos communication system with lasers and fiber transmission

两个激光器的物理模型可用 Lang-Kobayashi 方程组描述^[7-8].

$$\begin{aligned} \frac{dE_t(t)}{dt} &= \frac{1-i\alpha}{2} \left(G_t(t) - \frac{1}{\tau_{p,t}} \right) E_t(t) + \dots + \\ &\quad \gamma E_t(t-T) \exp(i\omega_t T) + \sqrt{2\beta N_t(t)} \xi_t(t) \\ \frac{dE_r(t)}{dt} &= \frac{1-i\alpha}{2} \left(G_r(t) - \frac{1}{\tau_{p,r}} \right) E_r(t) + \dots + \\ &\quad k_{inj} E_{inj}(t) + \sqrt{2\beta N_r(t)} \xi_r(t) \\ \frac{dN_{t,r}(t)}{dt} &= \frac{I_{t,r}}{e} - \frac{N_{t,r}(t)}{\tau_{n,t,r}} - G_{t,r}(t) |E_{t,r}(t)|^2 \\ G_{t,r}(t) &= \frac{g(N_{t,r}(t) - N_0)}{1+s|E_{t,r}(t)|^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中,下标 t 和 r 分别代表发射和接收系统, $E_{t,r}(t)$ 是光场复渐变振幅, $N_{t,r}(t)$ 是发射和接收激光器中的载流子数, $G_{t,r}(t)$ 为光增益, $\omega_{t,r}(t)$ 是发射和接收激光器的振荡频率; γ 为光反馈半导体激光器的反馈系数, k_{inj} 为接收系统接收来自发射系统的混沌光场的注入系数, $E_{inj}(t)$ 为注入到接收激光器的光场;激光器的自发辐射噪声 $\xi_{t,r}(t)$ 可以近似地用高斯白噪声估计,发射和接收激光器的自发辐射噪声的相关函数为 $[\xi_t(t) \cdot \xi_r^*(t)] = 2\delta_{t,r} \delta(t-t')$.

在图1中, $1/a$ 模块的功能是利用系统增益 a

将接收机输出校正为 $E_r(t)/a$.具有 $1/a$ 模块是校正相减解调法与传统相减解调法的关键区别.校正相减法可以使强注入条件下的信息解调效果更好,这已在背对背结构的通信系统中得到验证^[1].本文研究模型中采用光纤作为传输信道,因此系统增益 a 用式(2)估计.

$$a = \left\langle \left| \frac{E_r(t)}{E_t(t)} \right| \right\rangle \quad (2)$$

式(2)中, $E_t(t)$ 为发射激光器经光纤传输后的光场.被传送信息的解码质量用式(3)定义的解调Q因子来衡量.

$$Q = \frac{\langle X_1 \rangle - \langle X_0 \rangle}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3)$$

式(3)中, $\langle X_1 \rangle$ 和 $\langle X_0 \rangle$ 分别代表解码信息中“1”位和“0”位的平均光功率, σ_1 和 σ_0 为对应的均方根.

发射激光器产生的混沌光波沿着光纤传输并送至接收激光器,光的传输遵循通用的非线性 Schrodinger 方程^[7,15-17].

$$\begin{aligned} j \frac{\partial E}{\partial z} &= -\frac{j}{2} \alpha E - \gamma |E|^2 E - j\beta_1 \frac{\partial E}{\partial t} + \dots + \\ &\quad \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{j}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 E}{\partial t^3} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中, E 是光场包络, α 是光纤损耗系数, γ 是自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM)引起的非线性系数; $\beta_1 = 1/v_g$, v_g 为群速度, $n_g = c/v_g$ ^[2]为群速度折射率;二阶色散 β_2 和三阶色散 β_3 分别与光纤的零色散波长和色散斜率有关.在光纤信道中,放置掺饵光纤放大器(Er-Doped Fiber Amplifier, EDFA)以补偿光信号在光纤传输期间的损耗(见2.1节图2).设置EDFA的增益为恒定值 $G = \exp(\alpha L_c)$,其中 L_c 为传输距离.由于使用EDFA会引入自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)噪音,因此在其后放置带宽为1.1 nm的光滤波器以削弱ASE噪音.ASE噪音可以用高斯随机过程模拟,在带宽 Δf 内噪音的功率,即方差为^[7]

$$\sigma^2 = P_{ASE} = 2n_{sp}(G-1) \cdot h\nu \cdot \Delta f \quad (5)$$

式(5)中, n_{sp} 为不完全粒子数反转造成的自发辐射因子, ν 为激光器频率, h 为普朗克常量.

2 结果与讨论

2.1 光纤段长度配置对通信的影响

采用四阶龙格-库塔法则对开环激光混沌通信系统的速率方程组进行数值求解.在计算中取发射激光器的反馈系数 $\gamma = 0.01 \text{ ps}^{-1}$,接收机激光器的注入系数为 $k_{inj} = 0.1 \text{ ps}^{-1}$,可保证达到强注入条件.发射和接收激光器的其它参量取值相同,见表

1. 光纤信道由单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)和色散补偿光纤(Dispersion Compensation Fiber, DCF)以不同的排列方式组合而成,两种光纤的参量见表 2. 用伪随机比特发生器产生码长为 2^4-1 、比特率为 1Gb/s 的信息 $S(t)$. 信息通过 CM 方法调制发射激光器的混沌载波,形成已调波 $E_{\text{mod}}(t) = (1 + m \cdot S(t))E_i(t)$, 设置调制深度 m 为 5%. 采用校正相减解调法从光纤输出光场中恢复信息.

表 1 仿真参量

Table 1 Simulation parameters

Symbol	Description	Value
ω_0	Laser oscillation frequency	$1.216 \times 10^{15} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$
g	Gain coefficient	$1.5 \times 10^{-8} \text{ ps}^{-1}$
s	Gain saturation coefficient	5×10^{-7}
α	Linewidth enhancement factor	5
β	Spontaneous emission factor	$1.5 \times 10^{-9} \text{ ps}^{-1}$
e	Electron charge	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
N_0	Carrier number at transparency	1.5×10^8
τ_n	Carrier lifetime	2ns
τ_p	Photon lifetime	2ps
T	External cavity roundtrip time	200ps
I	Driving current	23mA
n_{sp}	Spontaneous emission factor	1.5

表 2 光纤参量

Table 2 Fiber parameters

Symbol	SMF	DCF
$\beta_2 / (\text{ps}^2 \cdot \text{km}^{-1})$	-21	87.5
$\beta_3 / (\text{ps}^3 \cdot \text{km}^{-1})$	0.1	0.1
$\gamma / (\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	1.06	5.07
$\alpha / (\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})$	0.21	0.549

发射激光器动力学过程的仿真结果显示,经过 2 ns 的振荡,发射激光器的光场进入混沌状态. 根据光纤入射功率 P 与光场强度 E 的关系式 $P = [hc\omega_0\alpha_m/4\pi n_g]|E|^2$ [15] 计算出此时发射激光器光场平均功率 P_0 约为 2.2 mW. 这里假设端面损耗 $\alpha_m = 45 \text{ cm}^{-1}$, 群速度折射率 $n_g = 4$. 在发射激光器光场注入光纤前先对功率进行一定程度的放大或衰减,使注入功率 P_{in} 适合光纤的传输,同时在光纤输出端使用光衰减器或放大器将接收信号的功率恢复到初始值.

图 2 给出 4 种不同结构的光纤信道的一个传输周期. EDFA 分别置于传输段的中间和最后,在每种结构中两段 SMF 或两段 DCF 的长度相同,DCF 用于补偿 SMF 的二阶色散. 其中图 2(a)和图 2(c)两种结构已在文献[5]中给出,图 2(c)和图 2(d)两种结构具有对称特征. 通过数值仿真对比 4 种结构的光纤信道对信息传输及系统解调性能的影响. 同时,在后面的仿真结果中用光纤段的排列次序代表各种

补偿结构,即预补偿(DS-A-DS-A)、后补偿(SD-A-SD-A),两端补偿(DS-A-SD-A),中间补偿(SD-A-DS-A),其中的 S 代表 SMF, D 代表 DCF,而 A 代表 EDFA.

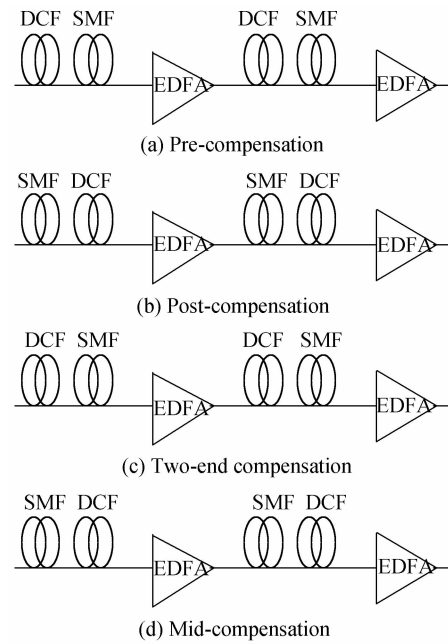


图 2 SMF 与 DCF 构成的光纤信道

Fig. 2 Fiber channel consists of SMF and DCF

令光纤信道的传输周期为 50 km. 根据表 1 中光纤参量可知,当传输周期中的 SMF 和 DCF 的长度分别为 40.322 6 km 和 9.677 4 km 时,经一个周期传输后光纤信道的累积二阶色散为零. 选择邻近的几个配置,SMF 长度分别为 40.2 km、40.4 km、40.6 km、40.8 km 及 41.0 km 进行测试. 图 3 给出使用各种结构光纤信道将信息传输一个周期时,SMF 的长度和光纤注入功率对系统解调性能的影响.

首先,从图 3 可以看出:对于任何结构的光纤信道,随着注入功率的提高,解调 Q 因子总是先增大再减小,当注入功率达到一定水平时,解调 Q 因子最大,此时获得最佳的解调性能. 这种现象源于光纤传输链路中的非线性效应—自相位调制和使用 EDFA 所引入的 ASE 噪音的共同作用. 当注入功率较小时,与注入功率成正比的自相位调制较小,因此光纤输出和输入光波之间的误差也较小;然而,相对于信号,ASE 强度比较高,这就增大了误差. 当注入功率达到一定水平时,非线性效应和噪音影响达到平衡,此时可以获得最佳的解调性能.

其次,图 3 表明不同结构光纤信道的传输性能对光功率的敏感程度不同. 对于图 3(a)和图 3(d),当注入功率达到一定水平时,随着注入功率提高,解调性能明显恶化,说明预补偿结构和中间补偿结构只适合于小注入功率. 对于图 3(b)和图 3(c),注入

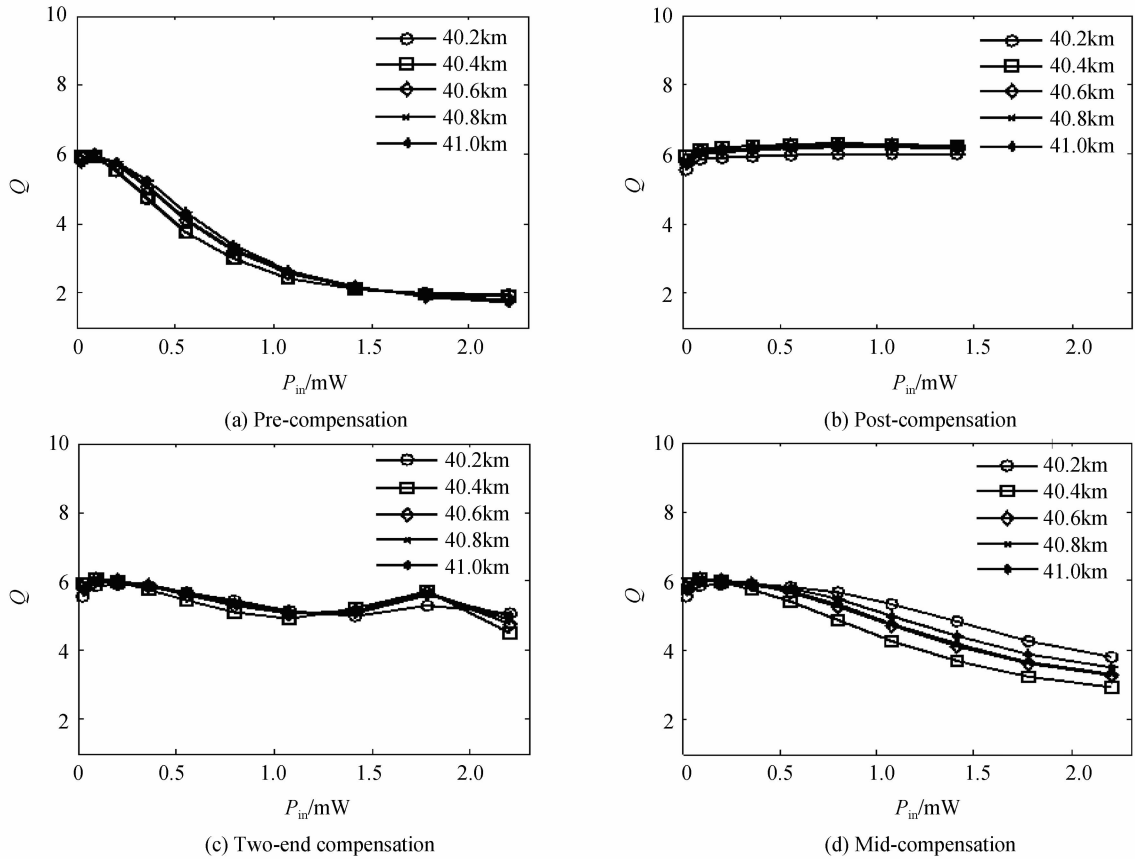


图 3 SMF 长度和注入功率对解调性能的影响
 Fig. 3 Influence of the length of SMF and the injection power on decoding performance

功率对解调性能的影响较小,说明采用后补偿结构和两端补偿结构的光纤信道传输时,即使注入功率在较大范围内变化仍可维持较好的解调质量.对比图 3(a)和 3(c),两端补偿结构的性能明显优于预补偿结构,这与文献[5]的结论一致.对比图 3(b)和 3(d),后补偿结构的解调 Q 因子曲线略高于中间补偿结构的解调 Q 因子曲线,似乎表明后补偿结构优于对称结构.需要注意的是此时的传输距离只有一个周期 50 km,在 2.2 节将进一步分析各种结构光纤信道的远程传输性能.

为了明确传输段中 SMF 长度与解调性能的关系,提取图 3 中各曲线的最大解调 Q 因子构成表 3.从表 3 可以看出,对于任何一种光纤信道结构,当 SMF 长度为 40.2 km 时,解调 Q 因子最小.当 SMF 长度为 40.2 km 时,经光纤传输段后累积色散为正;当 SMF 长度大于等于 40.4 km 时,累积色散为负,说明负累积色散有利于信息的传输.然而,随着 SMF 长度的增加,解调 Q 因子下降.因此,SMF/DCF 的配置应使光纤信道仅保留少量负色散,才能获得最佳的信息解调性能.这种现象可以解释为光纤中的非线性效应与二阶色散的共同作用,它们影响光纤输出波形与输入波形的同步.色散导致时域光波脉冲加宽或变窄的幅度变化,负的二阶色散使

脉冲加宽,正的二阶色散使脉冲变窄.时域脉冲变窄的变化引起注入功率随时间变化,而非线性效应引起的非线性相移与入射光纤的信号功率成正比,于是导致非线性相移随时间变化,这就是频率啁啾.频率啁啾代表光脉冲中的频率成分,随着传输距离增大,新的频率分量不断出现,导致光脉冲频谱被展宽.频谱中新出现的高频分量对应于时域波形变化更为迅速,也就是时域波形变窄,因此可以将非线性效应的作用等效为使时域光波变窄.负累积色散引起的光脉冲展宽与非线性效应引起的脉冲变窄相抵消,使系统同步及信息解调效果良好.但是,如果负的累积色散太大,色散占主导作用,同步质量仍然会恶化.因此,在配置 SMF/DCF 混合光纤信道时,应保持少量负累积色散,以抵消非线性效应,从而获得最佳的解调性能.

表 3 SMF 长度与解调 Q 因子关系

Table 3 Decoding Q-factor with respect to the length of SMF

Structure of fiber channel	Length of SMF/km				
	40.2	40.4	40.6	40.8	41.0
DS-A-DS-A	5.944 3	5.953 8	5.975 3	5.978 4	5.952 2
DS-A-SD-A	5.896 3	6.066 1	6.038 1	6.035 8	5.989 8
SD-A-SD-A	6.026 6	6.310 9	6.260 2	6.255 2	6.202 2
SD-A-DS-A	5.914 2	6.067 4	6.042 1	6.040 1	6.012 1

2.2 各种结构光纤信道远程传输性能

光波经多个传输段依次传送形成远程通信. 图 4 给出 SMF/DCF 长度配置为 40.8 km/9.2 km(空心曲线)和 40.4 km/9.6 km(实心曲线)两种情况下系统对 1 Gb/s 信息的远程传输性能. 这里设置注入功率为由图 3 获得的最佳注入功率,对于后补偿结构,注入功率为 0.792 5 mW,对于其他结构,注入功率为 0.088 mW. 图 4 显示,虽然在短距离 50 km 时,SMF/DCF 长度配置对解调 Q 因子影响很小,但随着传输距离的增加,在不同长度配置情况下的解调 Q 因子曲线明显分离. 如果 SMF 长度为 40.8 km,采用任何结构的光纤信道传输 1 000 km 时,解调 Q 因子均小于 2,无法正确解调出被隐藏的信息;当 SMF 长度为 40.4 km 时,解调 Q 因子大于 2.3. SMF 长度取 40.4 km 时,光纤信道的累积二阶色散更接近于零. 因此,当进行远程传输时,SMF/DCF 长度配置应使累积色散接近于零,同时保持少许偏负.

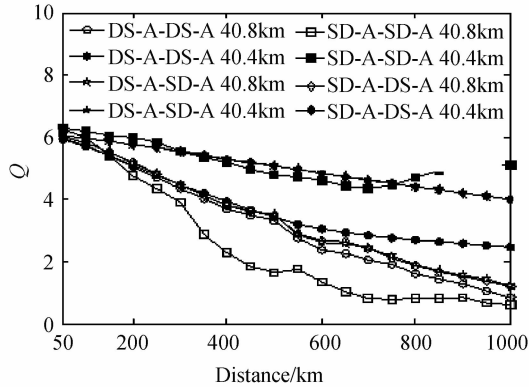


图 4 两种长度配置时,远程通信的解调 Q 因子
Fig. 4 Decoding Q-factor of remote communication at two configurations of length

下面固定一个传输周期中 SMF/DCF 的长度配置为 40.4 km/9.6 km,分析信道结构对远程高速通信性能的影响,图 5 给出 3 种不同速率信息的解调 Q 因子.

对比图 5(a)~(c)中相同结构光纤信道对应的解调 Q 因子曲线可知,随着信息速率的提高,解调 Q 因子减小,说明解调性能恶化. 在信息速率相同的情况下,中间补偿结构和两端补偿结构对应的解调 Q 因子曲线基本重叠,说明两种对称结构的性能非常接近. 同时,预补偿结构的性能总是最差. 当信息速率为 1 Gb/s 时,在 1 000 km 以内,使用各种结构光纤信道传输都能获得高于 2 的解调 Q 因子,可以正确恢复信息. 当传输距离小于 750 km 时,后补偿结构与两种对称结构性能接近;当传输距离大于 750 km 时,后补偿结构略显优势. 当信息速率增大为 2.5 Gb/s 时,在 900 km 以内,两种对称结构具有

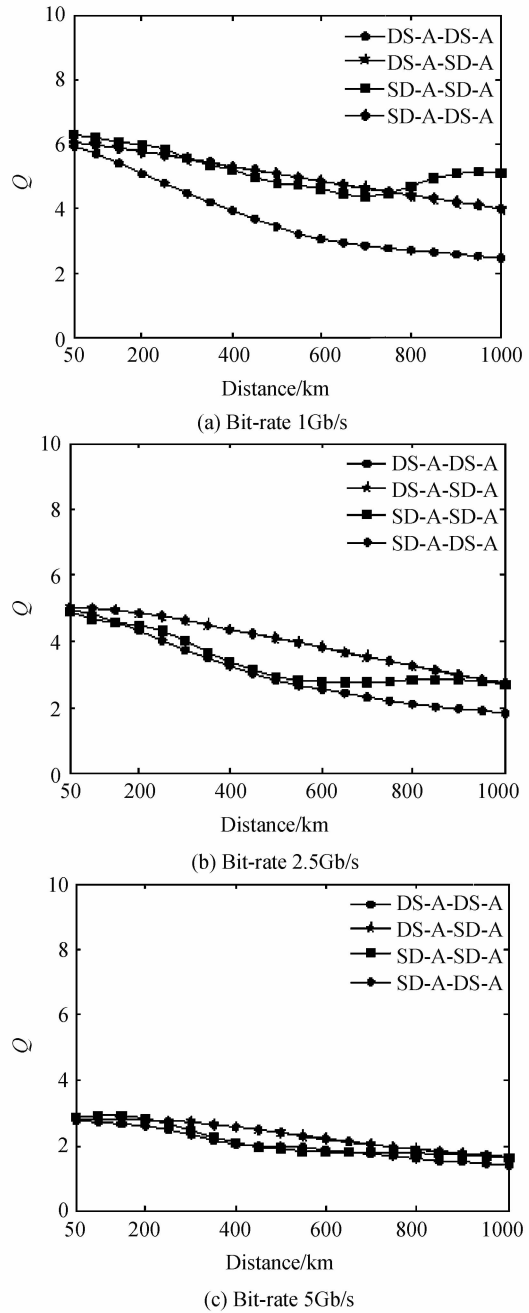


图 5 CM 方法加密信息的解调 Q 因子
Fig. 5 Q-factor of message encrypted by CM method

优势,达到 1 000 km 时,两种对称结构与后补偿结构性能接近. 如果信息速率继续提高到 5 Gb/s,此时各种信道结构的性能都明显恶化. 为了正确恢复信息($Q > 2$),传输距离必须限制在 300 km 以内. 由此可以总结出,随着信息速率的提高,解调性能恶化,当信息速率较低时,后补偿结构的远程传输性能略微优于两种对称结构;当信息速率中等时,对称结构优于后补偿结构;当信息速率很高时,即使采用对称结构也不能明显改善系统的通信性能. 因此,在远程通信中,如果信息速率较低,可以优先选择后补偿结构;如果信息速率较高,应优先选择对称结构.

本文也对 CSK 方法加密的信息在光纤信道中

的传输情况进行了测试,结果如图 6 所示.在图 6 中,两种对称结构的解调 Q 因子曲线重叠说明它们的传输性能一致.对比图 5 和图 6 可知:当信息速率为 1 Gb/s 时,采用 CSK 后,预补偿结构的性能得到改善,后补偿结构的性能变差,对称结构优于另外两种非对称结构;并且,对称结构光纤信道对 CM 和 CSK 加密信息的传输性能基本一致.当信息速率为 2.5 Gb/s 时,采用 CSK 方法后,对称结构的性能变差,但相对于其它信道结构,对称结构仍表现出优势.当信息速率提高到 5 Gb/s 时,无论使用哪种信道结构,解调 Q 因子总是低于 2.

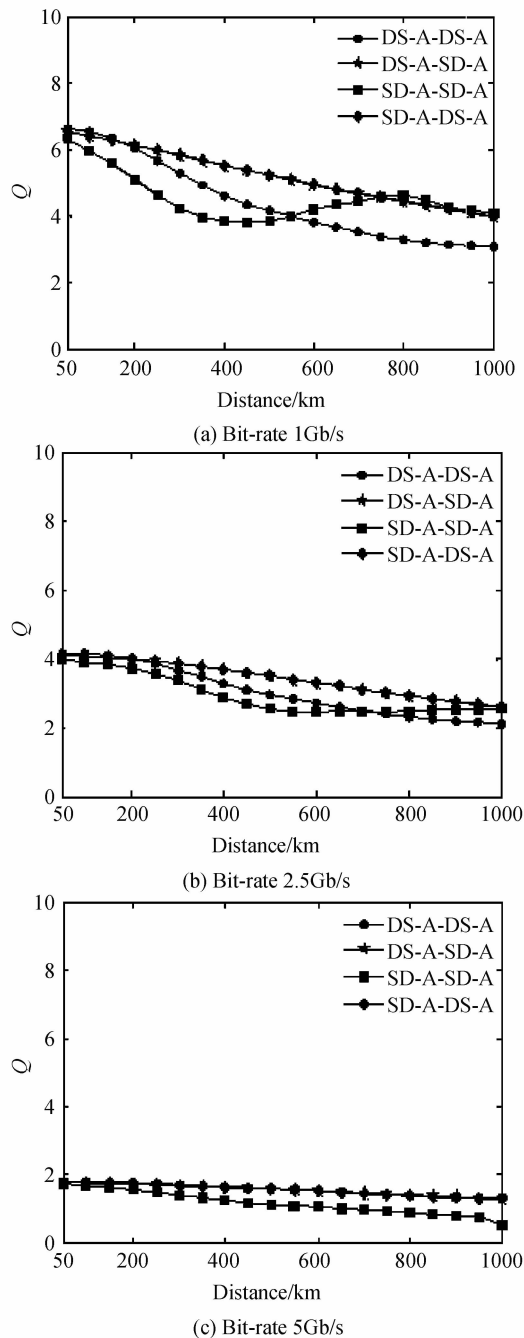


图 6 CSK 方法加密信息的解调 Q 因子

Fig. 6 Q -factor of message encrypted by CSK method

根据以上关于信道结构对 CM/CSK 加密的不

同速率信息的解调影响的分析,可以总结出:如果采用 CM 方法加密信息,那么当信息速率比较低且传输距离不太远时,对称结构性能最优,而后补偿结构与其性能接近;当信息速率较低且传输距离较远时,后补偿型结构性能略显优势;当信息速率比较高时,对称结构性能最优.如果采用 CSK 方法加密信息,那么对称结构性能总是优于其它结构;同时,CSK 加密的高速信息的解调性能较差.从强注入开环配置的远程高速激光混沌通信的实际应用出发,采用对称结构光纤信道是获得良好解调性能的最佳选择,同时与 CSK 方法相比,采用 CM 方法对信息加密可以获得更好的解调性能.这与已有的背对背结构混沌通信系统的研究结果是一致的,即 CM 方法优于 CSK 方法.

3 结论

构建了基于色散补偿光纤链路传输的远程开环全光混沌通信系统.通过计算信息的解调 Q 因子,研究了 SMF 和 DCF 构成的 4 种不同结构的光纤信道对信息解调及系统通信性能的影响,同时考虑了信息速率和调制方法等因素.研究表明,当光纤注入功率适当并且信道累积二阶色散少许偏负时,可以获得最优的解调效果.只有在传输速率不太高的远程应用中,后补偿结构略显优势;在其他情况下,两端补偿和中间补偿这两种对称结构的性能更优,且它们的性能基本一致.因此,采用对称结构的光纤信道有利于改善远程高速开环激光混沌通信系统的性能.同时,无论光纤信道结构如何,采用 CM 方法对高速信息进行加密可以获得更好的信息解调质量,CM 方法比 CSK 方法更适合于远程高速激光混沌通信的应用.

参考文献

- [1] LIU H J, REN B, FENG J C. Dispersion compensation in open-loop all optical chaotic communication system [J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(4): 040501(1-7).
- [2] LIU Hui-jie, FENG Jiu-chao. Study on effect of system gain for optical chaotic communication systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1484-1490.
刘慧杰,冯久超.系统增益对光混沌通信系统性能影响的研究[J].物理学报,2009,**58**(3):1484-1490.
- [3] DENG T, XIA G Q, CAO L P, *et al.* Bidirectional chaos synchronization and communication in semiconductor lasers with optoelectronic feedback [J]. *Optics Communication*, 2009, **282**(11): 2243-2249.
- [4] DING Ling, WU Zheng-mao, WU Jia-gui, *et al.* Unidirectional open-loop chaotic synchronization communication based on a semiconductor laser with double optical feedback [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(1): 014212(1-5).
丁灵,吴正茂,吴加贵,等.基于双光反馈半导体激光器的单向开环混沌同步通信[J].物理学报,2012,**61**(1):014212(1-5).

- [5] YAN Sen-lin. Envelope making and phase encoding via external modulation and their applications to optical fiber secure communication [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, **58**(7): 1591-1593.
颜森林. 激光混沌外部调制包络隐藏及相位隐藏编码方法及其在光纤保密通信中的应用研究[J]. 电子与信息学报, 2008, **58**(7): 1591-1593.
- [6] CAO Liang-ping, XIA Guang-qiong, DENG Tao, et al. Bidirectional chaos communication based on semiconductor laser with incoherent optical feedback [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(8): 5541-5546.
操良平, 夏光琼, 邓涛, 等. 基于非相干光反馈半导体激光器的双向混沌通信研究[J]. 物理学报, 2010, **59**(8): 5541-5546.
- [7] KANAKIDIS D, BOGRIS A, ARGYRIS A, et al. Numerical investigation of fiber transmission of a chaotic encrypted message using dispersion compensation schemes [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(10): 2256-2263.
- [8] ARGYRIS A, SYVRIDIS D. Performance of open-loop all-optical chaotic communication systems under strong injection condition [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(5): 1272-1279.
- [9] ARGYRIS A, KANAKIDIS D, BOGRIS A, et al. Experimental evaluation of an open-loop all-optical chaotic communication system [J]. *IEEE Selected Topic of Quantum Electronics*, 2004, **10**(5): 927-935.
- [10] LI X F, PAN W, LUO B, et al. Mismatch robustness and security of chaotic optical communications based on injection-locking chaos synchronization [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, **42**(9): 953-960.
- [11] YAN Sen-lin, CHI Ze-ying, CHEN Wen-jian. Chaotic synchronization in laser and its application in fiber secure communication [J]. *Science in China Ser. E Information Sciences*, 2004, **34**(4): 467-480.
- 颜森林, 迟泽英, 陈文健. 激光混沌同步及其在光纤保密通信中的应用 [J]. 中国科学 E 辑, 2004, **34**(4): 467-480.
- [12] ZHANG Jian-zhong. Wavelength division multiplexing of chaotic optical communication and OC-48 fiber communication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(6): 3793-3798.
张建忠. 混沌光通信与 OC-48 光纤通信的波分复用 [J]. 物理学报, 2009, **58**(6): 3793-3798.
- [13] YAN Sen-lin. Nonlinear evolution of chaotic signal transmission in optical fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4): 1994-2004.
颜森林. 混沌信号在光纤传输过程中的非线性演化 [J]. 物理学报, 2007, **56**(4): 1994-2004.
- [14] WU J G, WU Z M, XIA G Q, et al. Isochronous synchronization between chaotic semiconductor lasers over 40-km fiber links [J]. *IEEE Journal of Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(24): 1854-1856.
- [15] LIU Yu-ran, WU Zheng-mao, WU Jia-gui, et al. A new type of bidirectional long distance optical fiber chaotic secure communication system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(2): 024203(1-7).
刘宇然, 吴正茂, 吴加贵, 等. 一种信息的双向长距离光纤混沌保密通信系统性能研究 [J]. 物理学报, 2012, **61**(2): 024203(1-7).
- [16] LI Lin-fu. Influences of chromatic dispersion and nonlinear in the fiber on the chaotic synchronization communication [D]. Chongqing: Southwest China University, 2008: 33.
李林福. 光纤色散和非线性效应对混沌同步通信的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2008: 33.
- [17] WU Zheng-mao. Some optical transmission problems in optical fiber communication and fiber grating external cavity semiconductor laser [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003: 18-19.
吴正茂. 光纤通信中某些光传输问题及光纤光栅外腔半导体激光器 [D]. 成都: 四川大学, 2003: 18-19.

Structure of Fiber Channel in Open-loop All-optical Chaotic Communication System

LIU Hui-jie¹, FENG Jiu-chao², REN Bin¹

(1 School of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China)

(2 School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The open-loop all-optical chaotic communication system based on a fiber channel is established according to the equations of semiconductor laser with external feedback and fiber transmission. Two encryption methods for message, i. e. chaotic modulation and chaotic shift keying are considered. The advanced adjusted subtraction demodulation method is used to recover the encrypted message. Meanwhile, the performance of the system is measured by the decoding Q factor. Four kinds of fiber channel are constructed by setting single mode fiber and dispersion compensation fiber in different orders. The influence of the structures on the communication performance of the system is analyzed by numerical simulation. The result indicates that reserving a small negative accumulated dispersion in the fiber channel helps to improve the performance of remote transmission. The two symmetrical structures, i. e. middle and two-side compensations, have similar performances. The Symmetrical structures are superior to the asymmetrical structures, i. e., anterior and posterior compensations, and therefore suitable for the application of remote and high-speed open-loop all-optical chaotic communications. In addition, the chaotic modulation method is always superior to the chaotic shift keying method for the remote and high-speed chaos laser communication whatever the structures of the fiber channel are.

Key words: Chaotic communication; Fiber channel; External feedback; Open-loop