空间激光通信网络中的全光相位再生技术

孙 悦[1,2],黄新宁[1],温 钰[3],谢小平[1,2]

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学 未来技术学院, 北京 100049;
3. 国防科技大学 信息通信学院, 陕西 西安 710106)

摘 要: 围绕空间激光通信网络中高速数据多跳传输应用需求, 针对相位调制激光链路经过空间长距离传输后信号质量劣化的问题, 研究了基于相位敏感四波混频参量效应实现二进制相位调制高速激光信号的全光相位再生技术。利用 Matlab 软件数值分析了全光相位再生系统的影响因素,并基于 OptiSystem 仿真平台搭建了全光相位再生系统。结合高轨-地面站空间激光通信系统链路预算,对速率为 10 Gbit/s 的 DPSK 信号光经背靠背、相位噪声劣化以及劣化后全光相位再生处理三种传输场景进了对比分析。模拟仿真结果与数值分析结果均表明,与劣化后未经再生处理的系统相比,全光相位再生处理后的系统误码率平均优化 4 个数量级,信噪比提升约 3 dB,表明该空间激光通信全光相位再生技术可实现相位调制信号的全光相位再生,能够有效提升空间相干激光通信系统的性能,可以应用于空间高速激光通信网络中继节点处的全光数据中继等方向。

关键词: 空间激光通信; 全光再生; 非线性光学; 相位敏感放大; 四波混频
中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0918003

All-optical phase regeneration in free-space optical communication networks

Sun Yue[1,2], Huang Xinning[1], Wen Yu[3], Xie Xiaoping[1,2]

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi′an 710119, China; 2. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Information and Communication, National University of Defense Technology, Xi′an 710106, China)

Abstract: Based on the application requirements of high-speed optical data multi-hop transmission in free-space optical communication network, and aiming at the problem that the signal quality of phase-modulated laser link after long-distance transmission in space degraded, the all-optical phase regeneration for binary phase shift keying modulated high-rate signal, based on the phase-sensitive four-wave mixing (FWM) effect in high nonlinear fiber (HNLF) was proposed. Numerical analysis with Matlab was carried out to find out the factors affecting the regeneration results. Then based on the

收稿日期: 2019-04-11; **修订日期:** 2019-05-21
基金项目: 国家自然科学基金(61231012,91638101);中华人民共和国科学技术部重大项目(2017YFC0803905,2017YFC0803909)
作者简介: 孙悦(1994-),女,硕士生,主要从事光信号再生技术方面的研究。Email:sunyue2016@opt.cn
导师简介: 谢小平(1976-),男,研究员,博士,主要从事空间激光通信及空间光网络方面的研究。Email: xxp@opt.ac.cn
通讯作者: 黄新宁(1986-),女,助理研究员,博士,主要从事光信息处理技术方面的研究。Email: honeyhxn@opt.ac.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

OptiSystem simulation tool, an all-optical phase regeneration system for a 10 Gbit/s differential phase shift keying (DPSK) optical signal was constructed. Combining the link budget for geosynchronous (GEO) to optical ground station (OGS), system performance in three situations, namely back-to-back (B2B), phase-noised as well as noised-and-regenerated, were compared and analyzed. Simulation results and numerical analysis results show that compared with the system without regeneration after degradation, the bit-error-ratio (BER) of the noised-and-regenerated system improves nearly 4 orders of magnitude, while the output optical signal-to-noise-ratio (OSNR) increases nearly 3 dB. The results indicate that all-optical phase regeneration in free-space optical communication system can achieve all-optical phase regeneration of phase modulation signal. It can effectively promote the performance of spatial coherent laser communication system and can be used in the all-optical data relay of high speed free-space optical communication network relay nodes.

Key words: free-space optical communication; all-optical regeneration; nonlinear optics; phase sensitive amplification; four-wave mixing

0 引 言

卫星通信的高速发展以及空间科学、对地观测技术的不断革新,导致空间数据容量急剧增长,大量的探测数据需要实时回传至目的卫星或地面站,微波通讯受限于其传输带宽,难以满足数十甚至上百 Gbit/s 量级的空间高速数据传输需求。空间激光通信具有数据传输速率快、保密性高、无需申请频带使用牌照等明显优势[1-2],是近年来世界各国发展空间技术的研究热点,美国、欧洲、日本等国均有空间激光传输的成功演示案例[3-4],我国近年来通过海洋二号、墨子号、实践十三号等卫星系统也成功演示了不同传输距离的空间高速激光通信系统。随着对空间资源开发需求的日益增长和空间激光通信技术的进一步成熟,空间激光通信向深空化、网络化、一体化方向发展[5],而激光链路受光束发散角、强太阳背景噪声以及大气信道对于信号的吸收、散射和大气湍流等因素影响,在经过长距离空间传输后其能量大幅衰减且信号质量劣化严重[6],需要在空间激光通信网络中继节点处进行再生处理,才能满足下一节点的高性能数据传输。

现有的高速激光链路数据再生方式采用光/电/光技术途径,即需要将空间传输的光信号首先转换至电域(光-电转换),在电域中进行一系列信号再生与整形处理后,再重新加载至光载波上继续传输(电-光转换)。这种光/电/光的数据再生方式受电域处理速率瓶颈的限制,难以应对 10 Gbit/s 量级以上的数据再生需求;同时需要在空间中继节点处放置背靠背的光接收系统(光-电转换)和光发射系统(电-光转换),导致再生系统结构复杂,对空间节点处的体积、重量、功耗等资源要求较高[7]。而在中继节点处采用普通光放大器,则仅能对信号的功率进行提升,其固有的放大器自发辐射(Amplifier Spontaneous Emission,ASE)噪声反而会进一步劣化信号质量。基于三阶超快参量效应的相位敏感放大过程(Phase Sensitive Amplifier, PSA)能够使信号光中与增益轴同相的分量被放大,而正交的分量被衰减。利用这一特性对二进制相位调制弱光信号进行放大,不仅能压缩由于空间传输引入的相位噪声,且没有附加的 ASE 噪声[8],可有效实现二进制相位调制信号的再生,在空间激光通信网络中继节点处实现高速数据再生处理具有极为重要的应用价值。

差分相移键控(Differential Phase Shift Keying, DPSK)光信号对于激光器线宽的要求低,且接收系统结构相对简单,在高速、高灵敏度空间激光通信系统中应用广泛[9]。文中基于高非线性光纤中的三阶超快四波混频(Four-wave Mixing, FWM)参量效应实现了空间激光通信高速 DPSK 信号的全光相位再生,基于 Matlab 软件对三阶超快四波混频相位敏感放大的特性进行了数值分析,并基于 OptiSystem 仿真平台搭建了数据速率为 10 Gbit/s、调制格式为 DPSK 的全光相位再生系统,结合大气湍流及激光

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发散角等因素对激光通信系统的影响[10]进行仿真分析，仿真结果与数值模拟结果均表明所设计的全光相位再生系统可以有效提升二进制相位调制高速光信号的质量，能够用于空间激光通信网络中继节点处的全光信息处理。

1 空间激光通信系统链路预算

空间激光通信系统中高速光信号传输信道为大气，受吸收、散射、湍流以及光束发射角等因素的影响，经过长距离空间传输后，激光链路能量衰减严重。激光链路的空间传输方程可表述为[11]：

$$P_r=P_t\eta_r\eta_t e^{-\alpha L}\frac{D_r^2}{\theta^2 L^2} \tag{1}$$

式中：P_r 为到达接收端的光功率；P_t 为发射端光功率；η_r 和 η_t 分别为接收和发射光学系统的透过率；L 为传输距离；D_r 为接收光学天线口径；θ^2 为激光发射光束束散角；α 为大气衰减系数，其经验公式为：

$$\alpha=\frac{3.91}{V}\left[\frac{\lambda}{550\ \text{nm}}\right]^{-q} \tag{2}$$

式中：V 为能见度；λ 为激光波长；q 的取值根据能见度不同满足下列公式[5]：

$$q=\begin{cases}1.6 & V\geqslant 50\ \text{km}\\ 1.3 & 6\ \text{km}<V<50\ \text{km}\\ 0.585\ V^{1/3} & V\leqslant 6\ \text{km}\end{cases} \tag{3}$$

在天气情况良好的条件下，取能见度为 20 km，则 q 取值为 1.3。对于高轨-地面站之间的激光通信，其传输距离 L 取 45 000 km，发射光功率 P_t 取 35 dBm，接收和发射光学系统透过率 η_r 和 η_t 均取为 0.7[6]，接收光学天线口径 D_r 为 1 000 mm，激光发射光束束散角 θ^2 为 15 μrad，由公式(1)计算可得，系统链路总损耗约为-72.8 dB，即到达接收端的光功率约为-37.8 dBm。

由此可见对于空间激光通信系统，高速光信号在经过长距离空间传输后能量严重衰减，高轨-地面站之间激光通信的接收功率约为-36~-40 dBm。

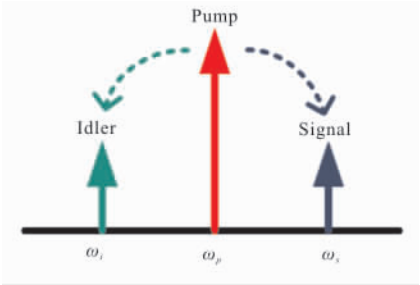
2 三阶超快四波混频相位再生

当入射至非线性介质中的光功率较强时，在三阶非线性极化作用下会产生四波混频效应[12]。三阶非线性极化强度可以表示为：

$$P_{NL}=\varepsilon_0\chi^{(3)}\vdots EEE \tag{4}$$

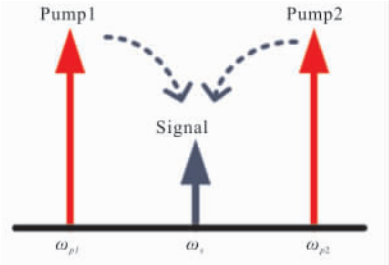
式中：E 为电场强度；P_{NL} 为感应非线性极化强度；$\chi^{(3)}$ 为三阶极化率；ε_0 为真空中的介电常数。

四波混频过程中会产生新的频率成分（闲频光），且能量可以在各光波之间转移，这个转移过程遵守能量和动量守恒的规律。当入射光只有一个泵浦光 ω_p 和一个信号光 ω_s 时，称之为非简并单泵浦四波混频过程，所产生的闲频光 $\omega_i=2\omega_p-\omega_s$ 位于信号光的对称频率处，如图 1(a)所示，且相位满足 $\phi_i=2\phi_p-\phi_s$；当入射光为两束泵浦光时，可以产生与入射信号光频率重合的闲频光，这一过程为简并双泵浦四波混频，如图 1(b)所示。



(a) 非简并单泵浦

(a) Non-degenerate single pump



(b) 简并双泵浦

(b) Degenerate dual pump

图 1 四波混频两种主要参量形式

Fig.1 Two main forms of four-wave mixing

当信号光 ϕ_s、泵浦光 ϕ_p 及闲频光 ϕ_i 在非线性介质中传输距离 z 之后，三者之间的相对相位差可以表示为[13]：

$$\phi_{rel}(z)=\phi_s(0)+\phi_i(0)-2\phi_p(0)+(\Delta\beta_L+\Delta\beta_{NL})z \tag{5}$$

式中：$\phi_s(0)$、$\phi_i(0)$、$\phi_p(0)$ 分别为信号光、闲频光、泵浦光的初始相位，色散引起的线性相位失配项为 $\Delta\beta_L=$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$\beta_s+\beta_i-2\beta_p$，其中 β_s、β_i、β_p 分别为信号光、闲频光、泵浦光的传播常数，非线性效应引起的相位失配项为 $\Delta\beta_{NL}=2\gamma P_p$，其中 γ 为光纤非线性系数，P_p 为泵浦功率。此时能量在各光束之间的传输方向取决于相对相位的大小，若 $\phi_{rel}(z)\geqslant 0$，则能量从泵浦光传输到信号光/闲频光；若 $\phi_{rel}(z)\leqslant 0$，则能量从信号光/闲频光传输到泵浦光。由公式(5)可以看出，传播距离引起的相对相位线性变化速率取决于 $(\Delta\beta_L+\Delta\beta_{NL})$，定义有效相位失配 κ，即：

$$\kappa=\Delta\beta_L+\Delta\beta_{NL} \tag{6}$$

相位敏感放大利用四波混频相位匹配的特性，通过控制相对相位差使之满足 $\phi_{rel}(z)\geqslant 0$，即能量从泵浦光传输到信号光/闲频光，从而实现全光信号的放大及相位再生。

3 DPSK 信号全光相位再生数值分析

当满足一定条件时，泵浦光能量在四波混频过程中转移到信号光和闲频光频率处，这一过程为相位敏感放大过程，此时信号光得到的功率增益为[14]：

$$G=\cosh(gL)+\frac{i}{g}\left[\frac{\kappa}{2}+a\eta\exp(-i\phi_{rel})\right]\sinh(gL) \tag{7}$$

式中：L 为光纤长度；$\phi_{rel}=2\phi_p-\phi s-\phi_i$ 为前面所述的相对相位差，引入参量 $a=2\gamma P_p$，$r=2\sqrt{P_1P_2}/P_p$（P_1、P_2 分别为泵浦光功率，P_p 为总的泵浦光功率），$P_p=P_1+P_2$，并令闲频光与信号光功率比 $\eta^2=\frac{P_i}{P_s}$，参量增益 $g=\sqrt{a^2-\left(\frac{\kappa}{2}\right)^2}$。

以单泵浦非简并四波混频为例，当泵浦光功率为 P_p 时，有 $a=2\gamma P_p$。当相位匹配条件满足时，$\kappa=0$，则公式(7)可以化简为：

$$G=\cosh(2\gamma P_pL)+\eta\exp\left[-i\left(\phi_{rel}-\frac{\pi}{2}\right)\right]\sinh(\gamma P_pL) \tag{8}$$

由公式(8)可知，对于固定长度的非线性光纤，经过相位敏感放大后的输出信号光增益与总的泵浦光功率 P_p、闲频光与信号光功率比 η 以及输入端相对相位差 ϕ_{rel} 有关。

利用 Matlab 软件对上述三个影响因素进行数值分析，取高非线性光纤的非线性系数 γ=11.7/(W·km)，光纤长度 L=0.05 km(与实验室高非线性光纤参数一致)。首先令输入端的信号光和闲频光功率相等，则 η=1，相位匹配条件满足，则 κ=0，此时当输入泵浦光功率分别为 1.0、1.5、2.0 W 时，得到信号增益与输入相对相位的关系如图 2(a)所示，可以看出，当相对相位差 ϕ_{rel} 改变时，输出的信号增益以 2π 为周期变化，且有正有负，即输出信号光既有增益也有衰减，整体曲线呈“拱形”，此外，当输入的泵浦光功率增大时，随着输入泵浦光功率的增大，增益和衰减的最大值均有增大。相位敏感四波混频的输出相位与输入相位差的变化关系如图 2(b)所示。可以发现，相位敏感放大的输出相位也随着相对相位差以 2π 为周期变化。泵浦光功率越大，输出相位对于相对相位差 ϕ_{rel} 的变化更接近阶梯形变化趋势，对于相位为二进制调制的 DPSK 光信号具有更好的相位再生效果。

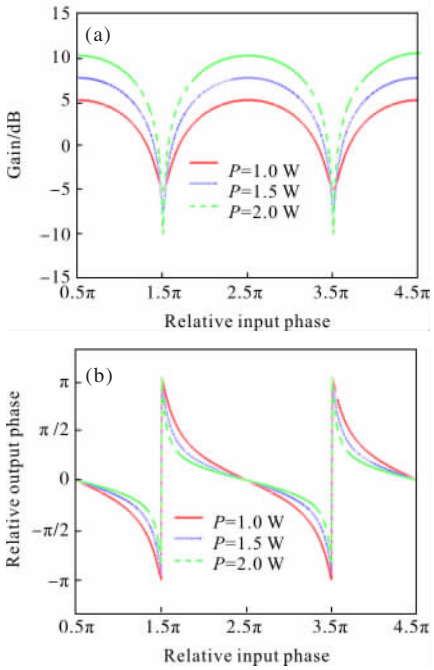


图 2 随着输入泵浦光功率改变，信号增益(a)及输出相位(b)与输入相位差的变化关系

Fig.2 Signal gain (a) and output phase (b) changing with the input phase when the input pump power is changed

然后对闲频光与信号光功率不一致时信号光功率增益的变化情况进行分析。当输入泵浦光功率 P_p=1 W，相位失配 κ=0，闲频光与信号光功率比 η=0.5, 1.0, 1.5 时，得到信号增益与输入相对相位的关系如图 3(a)所示，同样可以看出，随着 ϕ_{rel} 的改变，输出的信号增益以

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2π 为周期变化。当闲频光与信号光功率比 $\eta^2=P_i/P_s=1$，即输入端信号光和闲频光功率相等时，输出信号光获得的最大增益和最大衰减基本相同。相位敏感四波混频的输出相位与输入相位差的变化关系如图3(b)所示，当 $\eta=1$ 时，可以完美实现−π 到 π 的相位再生，而其他情况则无法得到 2π 区间的相位再生。

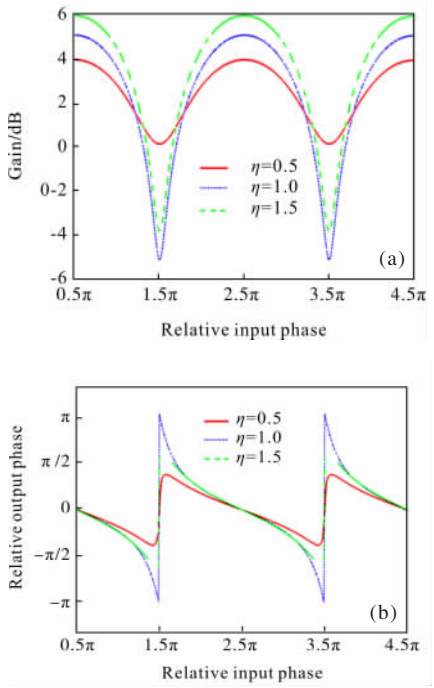


图 3 闲频光与信号光功率比改变，信号增益(a)及输出相位(b)与输入相位差的变化关系

Fig.3 Signal gain (a) and output phase (b) changing with the input phase when the idler to signal power ratio is changed

从上述数值分析结果可知，利用四波混频相位敏感放大的特性，通过控制信号光 ω_s、泵浦光 ω_p 和闲频光 ω_i 的相对相位差 ϕ_{rel}，可以达到矫正输出光相位，控制输出信号光增益的目的。对于空间激光通信系统中，由于大气湍流效应以及激光光束发散角等因素所造成的能量衰减和信号质量劣化，可以实现对二进制相位调制信号的全光相位再生。

4 全光相位再生系统方案及分析

4.1 全光信号再生系统方案

由前面的分析结果可知，如果在非线性光纤的输入端同时注入信号光、闲频光以及泵浦光，则在一定的相位及功率条件下，三者在非线性光纤中相互作用产生相位敏感的四波混频效应，可以使二进制相位调制信号光的功率提升，相位得到再生，并且传输过程中引入的相位噪声会被抑制[15]。方案采用前置一级普通的四波混频过程，为相位敏感四波混频效应的实现提供满足相位、频率和功率要求的信号光、泵浦光及闲频光，所设计的传输速率为 10 Gbit/s、调制格式为 DPSK 的空间激光通信全光相位再生技术方案如图 4 所示。

全光相位再生系统的发射端采用马赫增德尔调制器(Mach−Zehnder Modulator, MZM)将速率为 10 Gbit/s 的伪随机码(PRBS)调制到波长为一束连续光上，并调节 MZM 的偏置点，产生速率为 10 Gbit/s 的 DPSK 激光信号。在噪声模拟单元，利用相位调制器(Phase Modulator, PM)对 DPSK 信号光进行适当的相位调制以模拟信号在空间长距离传输中的相位信息恶化。在全光相位再生单元，信号光 λ_s 首先与一束波长为 λ_{p1} 的泵浦光耦合，经高功率光放大器进行

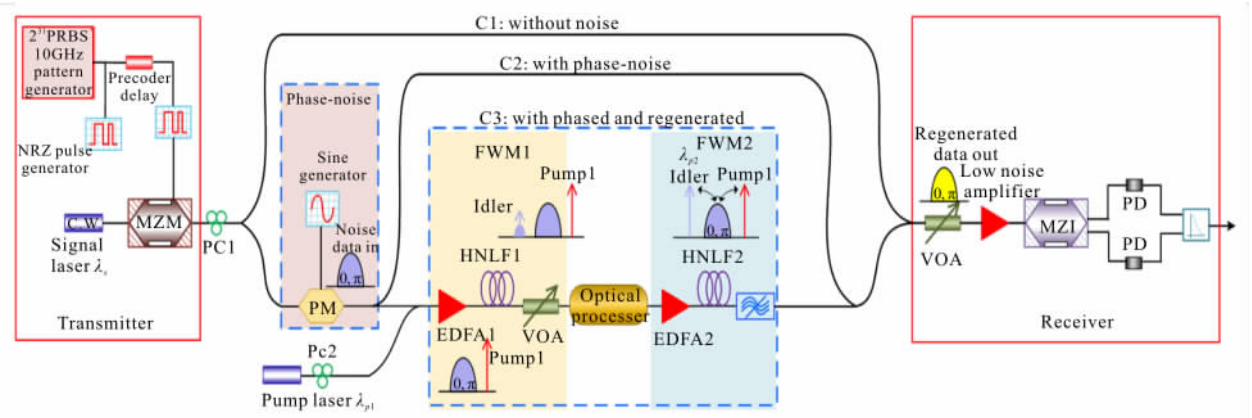


图 4 基于 FWM 的全光信号相位再生技术方案

Fig.4 Sketch of the all−optical signal phase regeneration scheme based on FWM

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

放大后注入到高非线性光纤 HNLF1 中，在非线性作用下发生四波混频效应，并产生一束与信号光 λ_{s1} 和泵浦光 1 之间具有稳定相对频率和相位匹配的闲频光 λ_i。由于信号光为二进制相位调制，因此该闲频光为一准连续光，且三束光之间的频率及相位关系满足：

$$\omega_i=2\omega_p-\omega_s$$
$$\phi_i=2\phi_p-\phi_s \tag{9}$$

在高非线性光纤 1(HNLF1)之后通过可调谐光衰减器(Variable Optical Attenuator，VOA)对输出光功率进行适当调节，使之处于光学处理器(Waveshaper)的输入功率范围之内。在光处理器中滤出信号光 λ_s、泵浦光 λ_{sp1} 以及闲频光 λ_i，并在相对相位锁定的基础上对三束光相位进行微调整，以消除不同路径传输带来的相位误差。滤出的三束光经高功率光放大器后注入到第二段高非线性光纤(HNLF2)中，在非线性作用下发生相位敏感的四波混频效应，使得信号光相位信息得到再生。在 HNLF2 输出端滤出全光相位再生后的信号光，通过 VOA 对输出光功率进行适当衰减，经过低噪声放大器(噪声系数为 3.5 dB)后进入接收端。接收端采用平衡探测，利用马赫增德尔干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer，MZI)对输出信号光进行解调分析。

4.2 OptiSystem 模拟分析

基于 OptiSystem 仿真平台对图 4 所示的全光相位再生方案进行仿真模拟分析。发射端信号光波长取 1 551 nm，采用 MZM 产生 10 Gbit/s 的 DPSK 信号光。泵浦光 1 波长取 1 548 nm(Pump1)，与信号光耦合后经掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)(噪声系数为 4.8 dB)放大至 30 dBm，并注入 HNLF1(非线性系数为 10.3/(W·km)，零色散波长=1 550 nm，光纤长度 L=0.5 km，衰减=0.2 dB/km，色散=0.02 ps/(nm·km)，色散斜率=0.032 ps/(nm^2·km)中，在四波混频效应下产生波长为 1 554 nm 的闲频光(即 Pump2)。信号光，泵浦光 1 和闲频光耦合后经 EDFA2 (噪声系数为 4.8 dB) 放大至 33 dBm 并注入 HNLF2(参数同 HNLF1)，在相位敏感四波混频作用下，DPSK 信号光相位信息得以再生。在 HNLF2 后利用可调谐光滤波器(带宽为 0.2 nm)滤出再生后的信号光，注入到接收端进行解调并对其进行分析。

图 5 为 OptiSystem 模拟分析得到的输入输出光谱图 (分辨率为 0.01 nm)，图 5 (a) 为泵浦光 1 和 DPSK 信号光耦合后的光谱图；图 5(b)为 HNLF1 输出光谱图，可以看出经过四波混频后，出现了新频率成分的闲频光；图 5(c)为经光处理器后 HNLF2 的输入光谱图，模拟中利用滤波器滤出三束光后，调节闲频光与信号光功率相等以得到较好的增益效果；图 5(d)为 HNLF2 输出光谱图(输入相对相位差 ϕ_{rel}=50°时)，可以看出信号光有明显的增益。

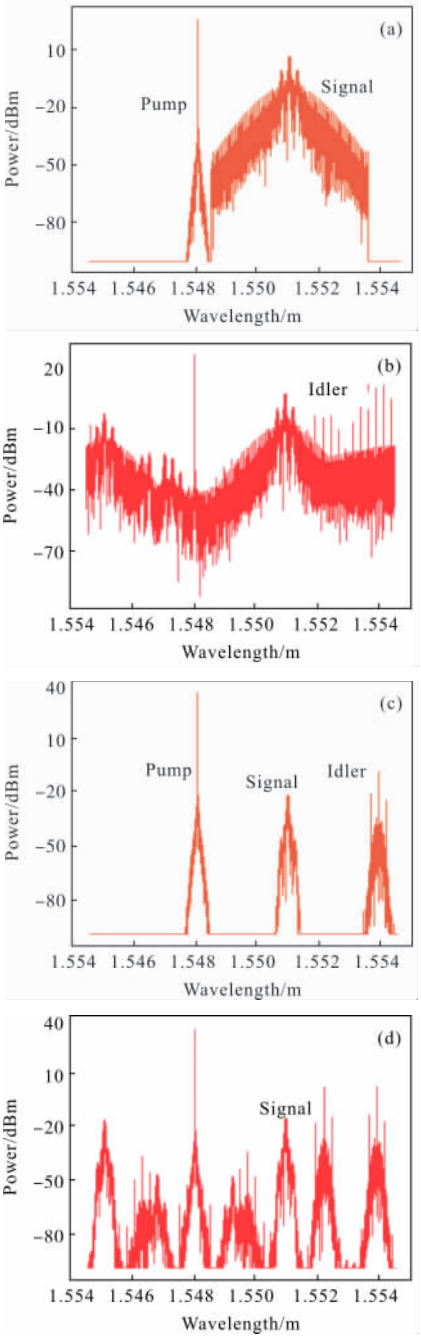


图 5 OptiSystem 仿真平台下光谱图

Fig.5 Spectrogram on OptiSystem simulation platform

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

首先分析相位敏感放大的特性，通过改变相对相位差 ϕ_{rel}，得到输出信号光的增益曲线如图 6 所示。可以看出，模拟仿真得到的增益曲线与 Matlab 数值分析得到的增益曲线周期基本吻合，即随着相对相位差 ϕ_{rel} 的改变，信号增益以 2π 为周期性相应

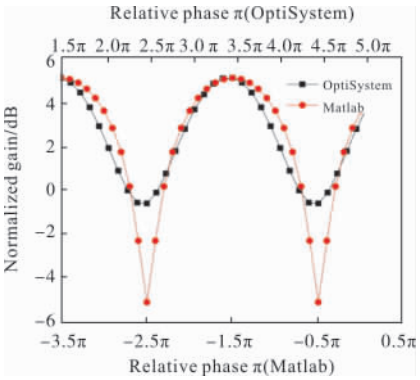


图 6 OptiSystem 与 Matlab 模拟的归一化增益曲线对比图

Fig.6 Comparison of the normalized gain diagram between OptiSystem and Matlab

改变。由于 Matlab 数值分析为理论公式计算得到，而 OptiSystem 模拟分析中考虑了器件损耗和引入噪声等因素，因此 Matlab 数值分析得到的增益要更优。

考虑到高轨-地面站之间的长距离空间激光传输链路预算，取输入 DPSK 信号光的功率范围为-36~-40 dBm，功率调节步长为 1 dB，对速率为 10 Gbit/s 的 DPSK 通信系统在三种场景下，即：背靠背传输(C1)，相位噪声劣化后传输(C2)以及相位噪声劣化后全光相位再生处理传输(C3)的系统性能进行了对比分析。三种场景下的接收端信号光眼图如图 7 所示，可以看出随着输入信号光功率的减小，C1、C2、C3 三种场景下的输出信号光眼图逐渐劣化。但在输入信号光功率相同时，C2 的眼图相对于 C1 有所劣化，C3 的眼图相对于 C2 却更为清晰。

三种场景下输出信号光功率的误码率如表 1 所示，光信噪比如表 2 所示，输出信号光误码率和信噪比曲线图如图 8 所示。由图 8(a)可以看出，C1 场景下检测到的信号光为调制后的信号光，没有经过传输链路以及其他器件损耗，因此光信号质量较好；C2 场景下检测到的信号光加载了相位噪声，误码率相对于 C1 大大降低，在-36 dBm 时为最大劣化，从 10^{-20} 降到了 10^{-11}，整个功率区间平均降低约 5 个数

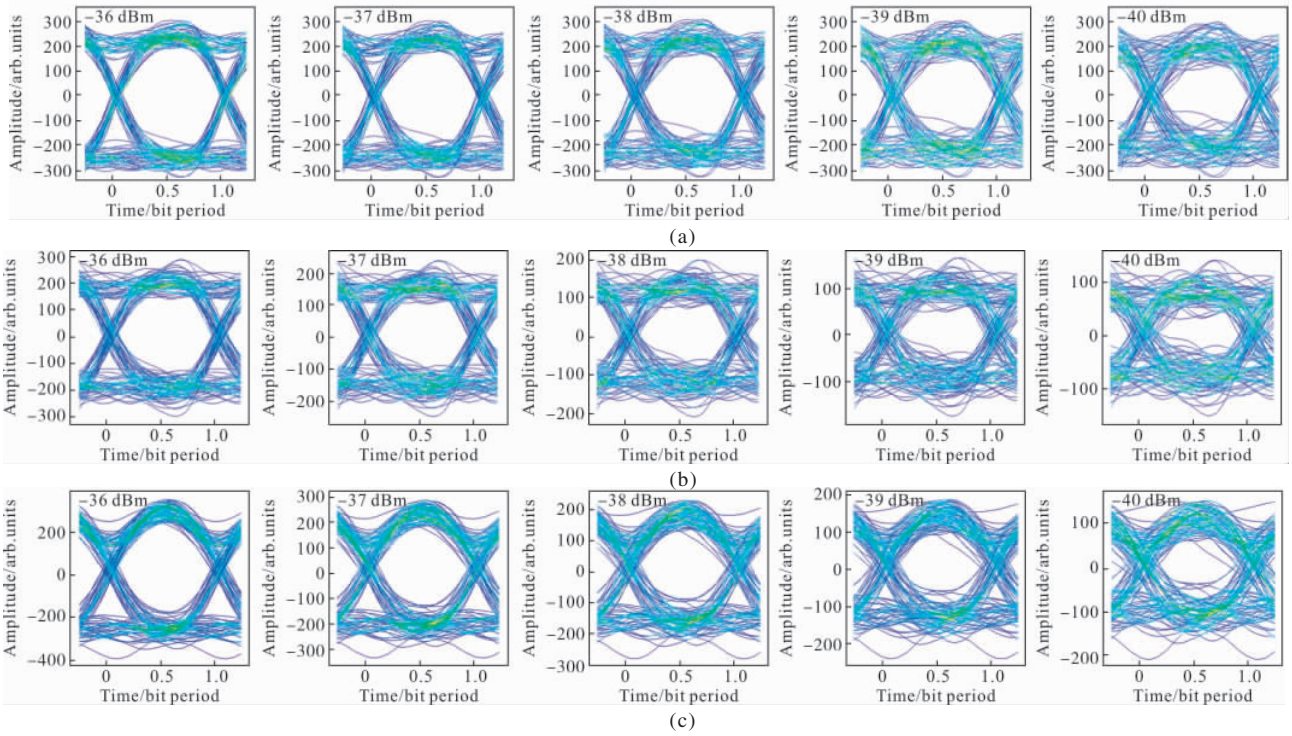


图 7 输入信号光功率为-36 dBm 至-40 dBm 时，C1(a)、C2(b)、C3(c)三种场景下的输出信号光眼图

Fig.7 Optical eye diagrams of the output signal at C1(a), C2(b) and C3(c), when the input signal power tunes from −36 dBm to −40 dBm

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 C1、C2、C3 三种场景下的输出信号光的误码率

Tab.1 BERs of output signal at C1, C2 and C3

Output signal BER	−36 dBm	−37 dBm	−38 dBm	−39 dBm	−40 dBm
C1	1.61×10^{-20}	1.68×10^{-15}	1.14×10^{-11}	8.87×10^{-9}	1.25×10^{-6}
C2	1.21×10^{-11}	5.03×10^{-9}	5.17×10^{-7}	1.76×10^{-5}	2.31×10^{-4}
C3	6.76×10^{-18}	2.32×10^{-13}	5.98×10^{-10}	1.99×10^{-7}	1.38×10^{-5}

表 2 C2、C3 两种场景下的输出信号光的信噪比

Tab.2 SNRs of output signal at C2 and C3

Output signal SNR/dB	−36 dBm	−37 dBm	−38 dBm	−39 dBm	−40 dBm
C2	17.38	15.75	14.10	12.43	10.73
C3	20.14	18.33	16.49	14.63	12.76

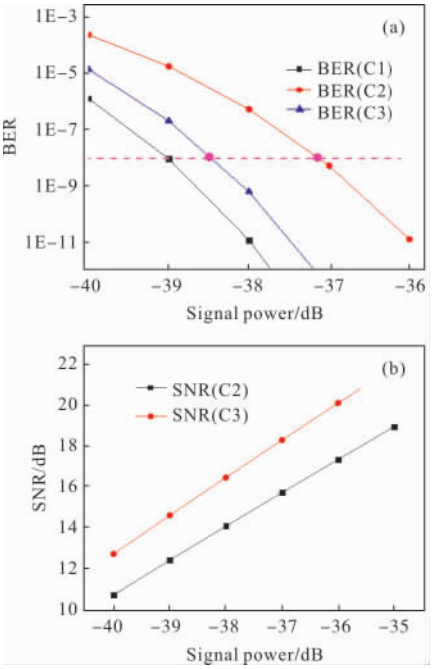


图 8 输出信号光误码率和信噪比曲线

Fig.8 BERs and SNRs of output signal

量级;C3 场景下为经过相位再生系统后检测到的信号光,其输出信号光误码率相较于 C2 有了明显的提升,在−36 dBm 时实现了误码率从 10^{-11}~10^{-18} 的最大提升,整个功率区间内可平均优化约 4 个数量级。在图 8(b)中,再生后的信号信噪比曲线整体远高于再生前的信噪比曲线,整个区间内输出信号信噪比平均增大约 3 dB。上述结论说明,方案对于相位噪声有明显的抑制作用,可以补偿相位噪声带来的信号劣化,在−36~−40 dBm 的弱信号输入区间内,成功地实现了全光信号的相位再生。

5 结 论

空间激光通信系统向深空化、网络化、一体化方向发展过程中,高速光信号在经过长距离空间传输后存在能量衰减及信号质量劣化严重的问题,需考虑在中继节点处对信号进行放大及再生。文中在分析空间激光通信系统中大气信道传输带来的激光链路功率损耗基础上,基于高非线性光纤中四波混频参量效应的相位敏感放大特性实现了速率为 10 Gbit/s、调制格式为 DPSK 的光信号全光相位再生。用 Matlab 软件对相位敏感放大特性进行了数值分析,研究了在相位匹配条件下 DPSK 信号光经过相敏放大后的功率增益以及相位变化情况,分析表明,通过控制信号光、泵浦光和闲频光的相对相位差 ϕ_{rel},可以达到矫正输出光相位,控制输出信号光增益的目的;在此基础上基于 OptiSystem 仿真平台,搭建了传输速率为 10 Gbit/s,调制方式为 DPSK 的光信号全光相位再生系统,并对功率为−36~−40 dBm 的弱光信号在背靠背、相位噪声劣化以及劣化后全光相位再生处理三种传输场景下的系统性能进行了模拟对比与分析。模拟分析结果与数值分析结果相吻合,全光相位再生后的光信号信噪比实现了约 3 dB 的提升,DPSK 通信系统整体误码率实现约 4 个数量级的平均优化提升,表明文中给出的全光相位再生系统在提升 DPSK 光信号的功率同时可抑制其空间传输过程中积累的相位噪声,能够实现 DPSK 光信号的全光相位再生,提升空间激光通信系统的整体

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性能。文中给出的技术方案可应用于空间高速激光通信网络中继节点处，对劣化的高速光信号进行有效全光相位再生处理，提升信号质量以便下一步转发或者处理。

参考文献：

[1] Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Advance on data relay technology for intersatellite laser links[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(11): 3103-3110. (in Chinese)

[2] Gao Duirui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication [J]. ***Chinese Optics***, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese)

[3] Li Shaohui, Chen Xiaomei, Ni Guoqiang. Highly precise ground certification system of satellite laser communication [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2017, 25 (5): 1149-1158. (in Chinese)

[4] Zeng Fei, Gao Shijie, San Xiaogang, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2016, 9(1): 65-73. (in Chinese)

[5] Jiang Huilin, An Yan, Zhang Yalin, et al. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication [J]. ***Journal of Spacecraft TT&C Technology***, 2015, 34(3): 207-217. (in Chinese)

[6] Yu Lintao, Song Lu, Han Cheng, et al. Analysis and simulation of link power and commincation performance in space-ground optical communiation [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2013, 42(5): 543-547. (in Chinese)

[7] Fang Zhihao, Zhu Qiuping, Fang Rui. Principle and Application of Optical Fiber Communication [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)

[8] Tong Z, Carl L, Andrekson P A, et al. Ultralow noise, broadband pPhase-sensitive optical amplifiers, and their applications [J]. ***IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics***, 2012, 18(2): 1016-1032.

[9] Li Fengshuo. Research on phase and amplitude regeneration technology for advanced modulator signals [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017. (in Chinese)

[10] Hennes H, Otakar W. An introduction to free space optical communications [J]. ***Radioengineering***, 2010, 19 (2): 203-212.

[11] Chen Mu, Ke Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(8): 0822009. (in Chinese)

[12] Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei, et al. Nonlinear Optics [M]. 2nd ed. Xi′an: Xidian University Press, 2012: 195-211. (in Chinese)

[13] Marhic M E. Fiber Optical Parametric Amplifiers, Oscillators and Related Devices [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[14] Joseph K K. Phase sensitive parametric amplifiers and their applications [D]. Southampton: University of Southampton, 2012.

[15] Tong Z, Carl L, Andrekson P A, et al. Towards ultrasensitive optical links enabled by low-noise phase-sensitive amplifiers[J]. ***Nature Photonics***, 2011, 7(5): 430-436.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net