

文章编号 1004-924X(2017)07-1748-09

# 空间光混频器分光性能的分析与优化

南 航, 张 鹏\*, 佟首峰, 刘 洋, 郝世聪, 常 帅, 范雪冰

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为了进一步提高零差相干光通信系统的接收灵敏度, 对空间光混频器的信号光分光比进行了优化。根据零差相干通信系统数学模型, 推导了信号光分光比和环路相位误差、通信误码率的数学表达式, 经过计算分析可知当光混频器  $Q$  支路的信号光满足锁相环要求时, 可通过提高  $I$  支路信号光分光比来降低误码率和提高接收灵敏度。在分光比优化后光混频效率提高了 53.5%, 通信探测灵敏度提高了 3 dB。利用 VPI 软件进行建模仿真, 得到不同分光比下系统的眼图和相位噪声功率。仿真结果显示, 探测灵敏度提高了 2.83 dB。最后, 搭建了零差相干光通信桌面实验系统, 研究了空间光混频器分光比和系统误码率、锁相环工作的影响规律, 当分光比由 0.5 减小至 0.2 时, 系统误码率由  $3.53 \times 10^{-9}$  下降至  $4.25 \times 10^{-10}$ , 当分光比为 0.1 时, 锁相环失锁, 误码率为 1。实验结果基本符合理论和仿真结果, 所得分光比的影响规律和优化结果将为空间零差相干通信系统的研制提供技术参考。

**关键词:** 零差相干光通信; 光混频器; 分光比; 相位噪声; 散粒噪声; 光混频效率

**中图分类号:** TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1748

## Analysis and optimization of splitting performance for space optical hybrid

NAN Hang, ZHANG Peng\*, TONG Shou-feng, LIU Yang, HAO Shi-cong,  
CHANG Shuai, FAN Xue-bing

- (1. College of Science, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130022, China;
  2. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)
- \* Corresponding author, E-mail: zhangpeng@cust.edu.cn

**Abstract:** Signal light splitting ratio of space optical hybrid was optimized in order to further improve received sensitivities of homodyne coherent optical communication systems. According to the mathematical model of homodyne coherent communication systems, mathematical expression of signal light splitting ratio, loop phase error and bit error rate (BER) was deduced. Through calculation and analysis, it indicated that when signal light of  $Q$  branch for optical hybrid met the requirement of phase-locked loop, Bit Error Rate (BER) could be reduced and received sensitivity could be improved by improving the signal light splitting ratio of  $I$  branch. The optical coherent efficiency increased by

收稿日期: 2016-12-01; 修订日期: 2017-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 91438204); 吉林省教育厅基金资助项目 (吉教科合字, 2015, 第 77 号); 吉林省优秀青年人才项目 (No. 20170520161JH)

53.5% and the communication detection sensitivity increased by 3 dB after optimization of the splitting ratio. Eye diagrams and power of phase noise of the system at different splitting ratios were obtained by modeling and simulation with VPI software. The simulation results show that the detection sensitivity is improved by 2.83 dB. Finally, a table experiment system of homodyne coherent optical communication was built to study influence rules of splitting ratio of space optical hybrid, system error rate and phase-locked loop. When splitting ratio decreases from 0.5 to 0.2, system error rate declines from  $3.53 \times 10^{-9}$  to  $4.25 \times 10^{-10}$ . When splitting ratio is 0.1, phase-locked loop loses efficacy and the bit error rate is 1. The experiment results conform to the theory and simulation results basically, and the influence rules and optimization results of splitting ratio will provide technical references for development of space homodyne coherent communication systems.

**Key words:** homodyne coherent optical communication; optical hybrid; splitting ratio; phase noise; shot noise; heterodyne efficiency

## 1 引言

空间相干光通信技术是近几年世界通信领域的研究热点<sup>[1]</sup>。基于 COSTAS 环的零差 BPSK 相干通信体制是实现高速率、远距离激光通信的途径之一。

理论上,零差探测的探测灵敏度比外差探测高 3 dB,但是零差探测对相位噪声更加敏感。国外对于零差相干光通信接收系统优化和影响因素的分析研究起步较早,Leonid G. 研究了激光线宽对相干光通信系统性能的影响<sup>[2]</sup>,V. K. Prabhu 研究了相位噪声对相干光通信锁相环路的影响<sup>[3]</sup>,David Fink 对相干光通信中的光混频效率进行了研究<sup>[4]</sup>,V. A. Konyshchev 对相干光通信中的非线性噪声进行了详细研究<sup>[5]</sup>,Kostas P 对大气湍流下基于空间调制的相干光通信进行了研究<sup>[6]</sup>。我国对相干光通信系统的研究虽时间较短,但发展迅速。刘超研究了大气湍流强度对相干光通信性能的影响<sup>[7]</sup>,李佳蔚对相干光通信中自适应光学系统的带宽进行了研究<sup>[8]</sup>,南航对大气湍流及跟踪误差对相干光通信的综合影响进行了研究<sup>[9]</sup>,石宏宵研究了基于 Costas 环的 5 Gbps BPSK 零差探测技术<sup>[10]</sup>。综上所述,国内外的学者对相干光通信系统进行了全面而详细的探索,不过光混频器重要性能之一的分光比尚未见报道。光混频器分光比可以分配光能量进行信号解调和锁相。为提高探测灵敏度,需要尽量提高解调支路的信号光能量,但过度调用锁相支路的能量会增加锁相的难度甚至无法锁相,需要对分光比进行优化才能进一步提高锁相条件下通信系统

的探测灵敏度,因此对于分光比影响规律的研究及其优化是通信系统性能研究的重要部分。

本文推导了空间零差相干通信系统的分光比与环路相位误差和误码率之间的表达式,通过计算和分析得到光混频器信号光分光比的影响规律,并通过软件仿真了不同分光比下的通信系统眼图和相位噪声功率。最后搭建零差相干光通信桌面系统,验证了理论与仿真得到的结果。

## 2 理论分析

建立零差相干光通信理论模型,设信号光和本振光的光场分布分别为:

$$E_S = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} A_S \exp[i(\omega_S t + \varphi_S(t))], \quad (1)$$

$$E_{LO} = \begin{pmatrix} k_3 \\ k_4 \end{pmatrix} A_{LO} \exp[i(\omega_{LO} t + \varphi_{LO}(t))], \quad (2)$$

式中: $A_S$ 和  $A_{LO}$ 分别为信号光和本振光的振幅,有  $A_S = \sqrt{P_S}$ ,  $A_{LO} = \sqrt{P_{LO}}$ ;  $\omega_S$ 和  $\omega_{LO}$ 分别为信号光和本振光的角频率; $\varphi_S(t)$ 和  $\varphi_{LO}(t)$ 分别为信号光与本振光的相位。设信号光与本振光的频差为零,两束光经过  $90^\circ$ 光混频器、平衡探测器和射频减法器后, $I, Q$ 支路的输出信号电压分别为:

$$V_1(t) = 2Rrk_2k_3\sqrt{P_S P_{LO}}d\cos[\varphi_S(t) + \varphi_c(t)] + n_1(t), \quad (3)$$

$$V_2(t) = 2Rrk_1k_4\sqrt{P_S P_{LO}}d\sin[\varphi_S(t) + \varphi_c(t)] + n_2(t), \quad (4)$$

式中: $R$ 为平衡探测器的响应度, $r$ 为环路的负载阻抗, $\varphi_c(t)$ 为 VCO 的调制相位信号<sup>[11]</sup>, $d$ 为相位

调制,  $\varphi_n(t) = \varphi_{\text{NLO}}(t) - \varphi_{\text{NS}}(t)$ ,  $\varphi_{\text{NS}}(t)$  和  $\varphi_{\text{NLO}}(t)$  分别为信号光和本振光的相位噪声,  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$  分别为  $I, Q$  支路的散粒噪声。

$I, Q$  支路信号的主要噪声有散粒噪声  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$  和相位噪声  $\varphi_n(t)$ 。散粒噪声  $n_1(t)$  主要影响解调支路的探测灵敏度和误码率 (Bite Error Rate, BER), 散粒噪声  $n_2(t)$  和相位噪声  $\varphi_n(t)$  则会影响环路中的相位误差。首先考虑散粒噪声  $n_2(t)$  引起的相位误差。环路中总的相位误差为  $\varphi_e(t) = \varphi_n(t) - \varphi_c(t)$ , 设环路中的相位噪声都由散粒噪声  $n_2(t)$  引起, 则  $\varphi_n(t) = 0$ , 相位噪声变为  $\varphi_e(t) = \varphi_c(t)$ 。  $\varphi_c(t)$  的功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD) 为<sup>[12]</sup>:

$$S_{\varphi_{\text{CSN}}}(f) = |H(f)|^2 \frac{S_{\text{SN}}(f)}{G_{\text{PD}}^2}, 0 < f < \infty, (5)$$

式中:  $H(f)$  为锁相环的闭环传递函数,  $H(f) = \varphi_c(f)/\varphi_n(f)$ , 其中  $\varphi_c(f)$ ,  $\varphi_n(f)$  分别为  $\varphi_c(t)$  和  $\varphi_n(t)$  的傅里叶变换;  $G_{\text{PD}}$  为相位探测器的增益,  $G_{\text{PD}} = 2Rrk_1 k_4 \sqrt{P_S P_{\text{LO}}}$ ;  $S_{\text{SN}}(f)$  为散粒噪声  $n_2(t)$  的 PSD, 可表示为:

$$S_{\text{SN}}(f) = 2qRP_{\text{LO}} k_4^2 r^2. (6)$$

散粒噪声  $n_2(t)$  引起的相干接收系统中的相位误差可由  $S_{\varphi_{\text{CSN}}}$  的傅里叶变换得到, 结合式(5)和式(6), 得到散粒噪声  $n_2(t)$  引起的相位误差方差  $\sigma_{\text{SN}}^2$  的表达式:

$$\sigma_{\text{SN}}^2 = \frac{qB_n}{2Rrk_1^2 P_S}, (7)$$

其中:  $q$  为电子电荷,  $B_n$  为环路噪声带宽。

$$B_n = \frac{\pi f_n (1 + 4\zeta^2)}{4\zeta}, (8)$$

式中:  $f_n$  为环路固有带宽,  $\zeta$  为环路的阻尼系数。结合式(8),  $\sigma_{\text{SN}}^2$  的表达式可变为:

$$\sigma_{\text{SN}}^2 = \frac{q\pi f_n (1 + 4\zeta^2)}{8\zeta Rrk_1^2 P_S}. (9)$$

其次研究相位噪声  $\varphi_n(t)$  引起的相位误差。设系统的所有相位噪声由相位噪声  $\varphi_n(t)$  引起, 则  $n_2(t) = 0$ ,  $\varphi_e(t) = \varphi_n(t)$ 。相位噪声  $\varphi_n(t)$  的 PSD 为:

$$S_{\text{PN}}(f) = 2 \cdot \frac{\Delta\nu}{\pi f^2}, (10)$$

其中:  $\Delta\nu$  表示信号激光器的线宽。相位噪声引起的相位误差方差可表示为<sup>[13]</sup>:

$$\sigma_{\text{PN}}^2 = \int_0^\infty S_{\text{PN}}(f) |1 + H(f)|^2 df. (11)$$

将式(10)代入式(11)得到:

$$\sigma_{\text{PN}}^2 = \frac{\Delta\nu}{4\zeta f_n}. (12)$$

综合考虑散粒噪声  $n_2(t)$  引起的相位误差  $\sigma_{\text{SN}}^2$  和相位噪声引起的位相误差  $\sigma_{\text{PN}}^2$ , 结合式(9)和式(12)得到零差相干接收系统中总的相位误差  $\sigma^2$  为:

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{SN}}^2 + \sigma_{\text{PN}}^2 = \frac{q\pi f_n (1 + 4\zeta^2)}{8\zeta Rrk_1^2 P_S} + \frac{\Delta\nu}{4\zeta f_n}. (13)$$

由式(13)可知, 系统的相位误差与  $Q$  支路信号光的分量  $k_1^2 P_S$ 、环路固有带宽  $f_n$ 、激光器线宽  $\Delta\nu$  有关。其中,  $k_1^2 P_S$  主要影响散粒噪声  $n_2(t)$  引起的相位误差,  $\Delta\nu$  主要影响激光的相位噪声, 而  $f_n$  对两者都有影响。

对  $Q$  支路来说, 支路信号光能量主要用于锁相和抑制相位噪声。根据式(13)可知, 环路固有带宽  $f_n$  与系统的散粒噪声  $n_2(t)$  和相位噪声  $\varphi_n(t)$  都有关, 式(13)对  $f_n$  求一阶导数, 得到:

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial f_n} = \frac{q\pi (1 + 4\zeta^2)}{8\zeta Rrk_1^2 P_S} - \frac{\Delta\nu}{4\zeta f_n^2}. (14)$$

令等式左侧为零, 经过计算得到最优环路固有带宽  $f_{\text{nopt}}$  为:

$$f_{\text{nopt}} = \sqrt{\frac{2\Delta\nu Rrk_1^2 P_S}{q\pi (1 + 4\zeta^2)}}. (15)$$

将式(15)代入式(13)得到系统的最小相位误差为:

$$\sigma_{\text{min}}^2 = \sqrt{\frac{q\pi \Delta\nu (1 + 4\zeta^2)}{16\zeta^2 Rrk_1^2 P_S}}. (16)$$

由式(16)可知, 系统的相位误差  $\sigma_{\text{min}}^2$  与激光器线宽  $\Delta\nu$  成正比, 与  $Q$  支路信号光的能量  $k_1^2 P_S$  成反比。通常认为系统的相位误差  $\sigma < 10^\circ$  时, 零差相干接收系统的锁相可以正常工作。

对  $I$  支路来说, 支路信号光能量主要用于解调相位信号, 因此,  $I$  支路信号光的功率  $k_2^2 P_S$  需要满足系统 BER 的要求, 即有:

$$\text{BER} = Q\left(2\sqrt{\frac{RL_{\text{ins}} P_S k_2^2}{R_b q}}\right), (17)$$

式中:  $Q(\cdot)$  表示  $Q$  函数,  $R_b$  代表通信速率,  $L_{\text{ins}}$  表示光混频系统中的插入损耗。根据式(17), 信号光可表示为:

$$P_S = 1.26 \frac{R_b q}{4RL_{\text{ins}} k_2^2} [Q^{-1}(\text{BER})]. (18)$$

将式(18)代入式(17)中, 最小相位误差表达

式变为:

$$\sigma_{\min}^2 = \sqrt{\frac{k_2^2 \pi \Delta \nu (1 + 4 \zeta^2)}{5.04 L_{\text{ins}} k_1^2 \zeta^2 r R_b [Q^{-1}(BER)]^2}} \quad (19)$$

由上述研究可知,相位误差与系数  $k_1^2$  和  $k_2^2$  有关,由于  $k_1^2 + k_2^2 = 1$ ,设  $k_1^2 = \alpha$ ,则  $k_2^2 = 1 - \alpha$ 。其中  $\alpha$  为光混频器中信号光的分光比,可以改变信号光在两支路的能量分配。实际上,要求系统的相位误差  $\sigma < 10^\circ$ ,系统  $BER < 10^{-9}$ ,根据式(16)和式(19)得到分光比  $\alpha$  的范围为:

$$\frac{q \pi \Delta \nu (1 + 4 \zeta^2)}{16 \zeta^2 R r P_S \sigma_{\text{req}}^4} \leq \alpha \leq 1 - 1.26 \frac{R_b q}{4 R L_{\text{ins}} P_S} [Q^{-1}(BER_{\text{req}})]^2, \quad (20)$$

式中:  $\sigma_{\text{req}}$  为要求的相位误差,  $BER_{\text{req}}$  为要求的误码率。在 BPSK 零差相干光通信系统中,设通信速率  $R_b = 5 \text{ GHz}$ ,误码率  $BER_{\text{req}} = 10^{-9}$ ,环路阻尼系数  $\zeta = 1/\sqrt{2}$ ,插入损耗  $L_{\text{ins}} = 0 \text{ dB}$ ,相位误差  $\sigma_{\text{req}} = 10^\circ$ ,平衡探测器的响应度  $R = 1 \text{ A/W}$ ,环路负载阻抗  $r = 1$ 。针对不同的激光器线宽,由式(20)得到接收信号光功率与分光比  $\alpha$  的关系曲线如图 1 所示。

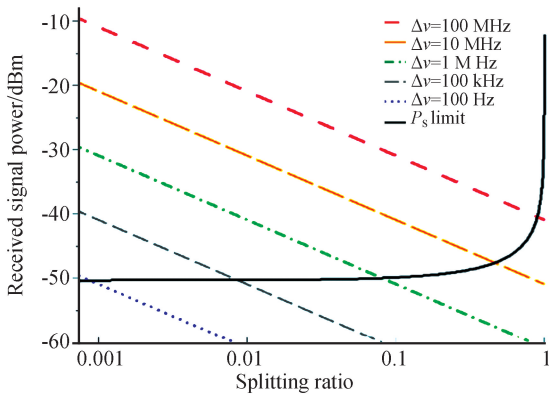


图 1 接收信号光功率与分光比的关系曲线

Fig. 1 Relationship between received signal power and splitting ratio

图 1 中实线为规定系统误码率下接收信号光能量与分光比的关系曲线,虚线表示激光器线宽不同时,规定环路相位误差下接收信号光能量与分光比的关系曲线。对比式(20)可知,图中实线与其他曲线的交点为不同激光器线宽下系统的最优分光比  $\alpha_{\text{opt}}$ 。当激光器线宽增大时,为获得最小信号光功率  $P_{S \text{min}}$ ,需增大分光比,即增加  $Q$  支路的信号光功率。5 组激光器线宽下,最优分光比和

对应的最小信号光功率(即探测灵敏度)的计算结果如表 1 所示。

由于实际相干光通信系统中环路器件和光混频器内部存在插入损耗,它会提高误码率并使分光比优化程度减小,因此在相干通信系统中应尽量减小插入损耗,避免通信性能的降低。

表 1 不同激光器线宽下,最优分光比和对应的最小信号光功率的计算结果

Tab. 1 Calculation of minimum signal power and optimized splitting ratio with different linewidths of lasers

激光线宽 $\Delta \nu / \text{MHz}$	最小信号光功率 $P_{S \text{min}} / \text{dBm}$	最优分光比 $\alpha_{\text{opt}}$
100	-40.418	0.887 7
10	-47.401	0.439 6
1	-49.870	0.078 1
0.1	-50.270	0.008 3
0.01	-50.307	0.000 9

根据分光比影响规律优化系统后光混频器将提高光混频效率及灵敏度。具体如下:

(1) 光混频效率增幅。光混频效率可表示为<sup>[14-15]</sup>:

$$\eta_{\text{co}} = \frac{\left| \int_0^{r_0} A_S(r) A_{\text{LO}}(r) \cos(\langle \sigma \rangle) r dr \right|^2}{\int_0^\infty |A_S(r)|^2 r dr \cdot \int_0^{r_0} |A_{\text{LO}}(r)|^2 r dr} \quad (21)$$

式中  $A_S(r)$  和  $A_{\text{LO}}(r)$  分别代表信号光与本振光的光场模式分布。由公式可知,优化前后相干接收系统的光混频效率提高了 53.5%。

(2) 探测灵敏度增益。将两光混频器的分光比代入式(20)计算得到分光比优化前后通信系统的探测灵敏度分别为 -50.1 dBm 和 -47.2 dBm,探测灵敏度增益  $GR \approx 3 \text{ dB}$ 。

### 3 系统仿真

图 2 为利用 VPI 软件建立的基于 COSTAS 锁相环的零差相干光通信系统模型。仿真参数按下列指标设置<sup>[16-17]</sup>:信号光、本振光的激光器线宽为 1 MHz,本振光功率为 1 mW,系统通信速率为 5 Gb/s,调制方式为二进制相位调制,光混频器总插损为 1 dB,平衡探测器响应度为 1 A/W。

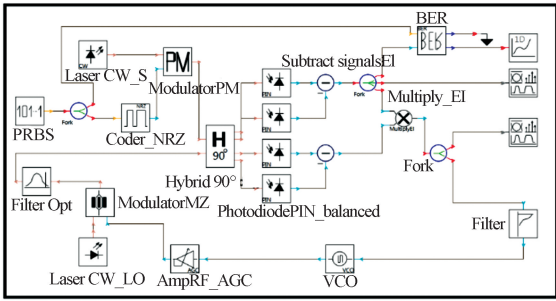


图 2 5Gb/s BPSK 零差相干光通信系统仿真图

Fig. 2 Simulation diagram of BPSK homodyne optical coherent communication system with bit rate of 5 Gb/s

首先研究光混频器分光比优化前后相干系统的通信性能。设定优化前光混频器的分光比为 0.5, 优化后光混频器的分光比约为 0.01, 接收信号光强度由 -70 dBm 增加至 -60 dBm, 两类光混频器所在通信系统的误码率如图 3 所示, 图中上方曲线代表分光比为 0.5 的光混频器, 下方曲线代表分光比为 0.01 的光混频器。优化分光比的光混频器

在相同误码率的条件下探测灵敏度更高, 在误码率为  $10^{-9}$  时, 探测灵敏度提高约 2.83 dB。

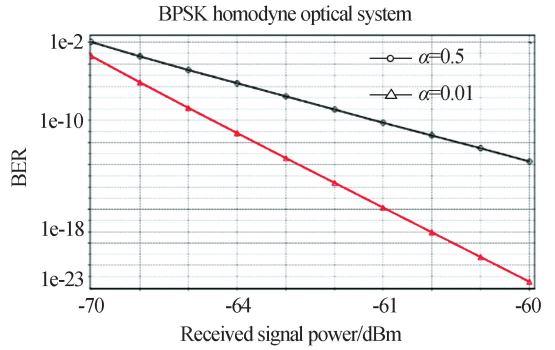


图 3 接收信号光功率与系统误码率的关系曲线

Fig. 3 Relationship between received signal power and BER

信号光功率设定为 10 nW, 光混频器的分光比可变, 对不同分光比下通信系统的眼图进行模拟, 结果如图 4 所示。当分光比由 0.5 降至 0.1, 系统的眼图眼高变大, 效果变好, 说明优化分光比可以提高系统的探测灵敏度。

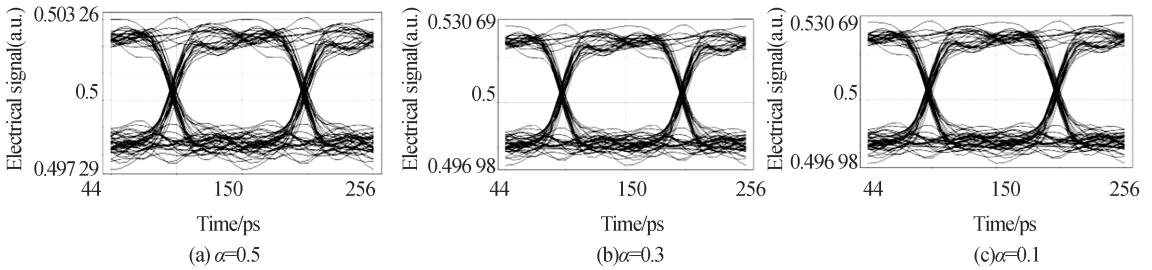


图 4 不同分光比下 BPSK 零差相干光通信系统眼图

Fig. 4 Eye diagrams of BPSK homodyne optical coherent communication system with different splitting ratios

通信系统 BER 与分光比的关系如图 5 所示。分光比由 0.5 减小至 0.01, BER 由  $5.2 \times 10^{-14}$  下降至  $2.01 \times 10^{-27}$ , 由此可知随着 I 支路信号光能量的增强, 信噪比增大, 通信系统的性能由于 BER 的下降而得到改善。

结论与理论分析相符。

然而随着信号光的能量由 Q 支路向 I 支路迁移, 通信系统的相位噪声功率随之增加, 设信号光与本振光的线宽为零, 对系统进行仿真, 可提取系统输出信号的相位噪声, 如图 6 所示。当光混频器的分光比由 0.5 下降至 0.1, 相位噪声功率提高约 3 dB, 相位噪声的增加会降低环路的锁相功能, 由此可知 Q 支路分光比在降低系统 BER 的同时会增加环路的相位噪声, 增大锁相难度, 该

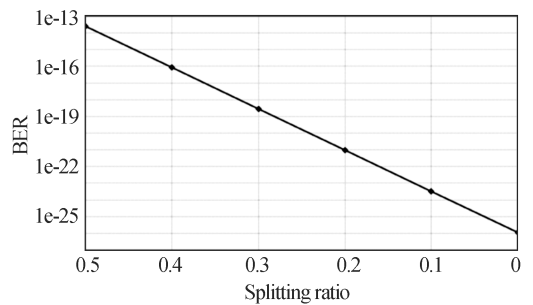


图 5 通信系统误码率与光混频器分光比的关系曲线

Fig. 5 Relationship between BER of communication system and splitting ratio of signal light in optical hybrid

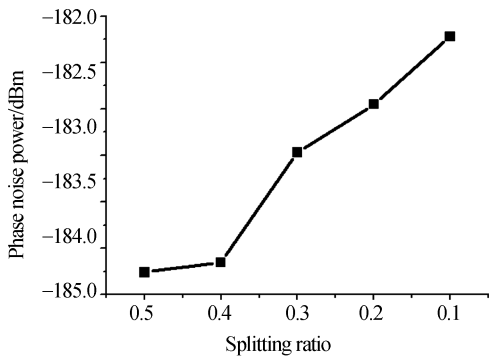


图 6 环路相位噪声功率与光混频器分光比的关系曲线

Fig. 6 Relationship between power of phase noise in loop and splitting ratio of optical hybrid

### 4 实验研究

为了验证分光比的影响规律以及优化策略, 搭建了零差相干通信系统实验平台, 其原理及实验现场分别如图 7 和图 8 所示。

实验中, 激光器是波长为 1 550 nm、线宽小于 1 MHz 的半导体激光器, 信号光(S laser)的输出功率为 -40 dBm, 本振光(LO laser)的功率为 10 dBm。伪随机码发生器(Pseudo Random Beam Splitter, PRBS)发送 5 Gbps 数据, 在非归零码(Nonreturn to Zero, NRZ)发生器变为电信号, 通过相位调制器将数据加载到信号光上。通

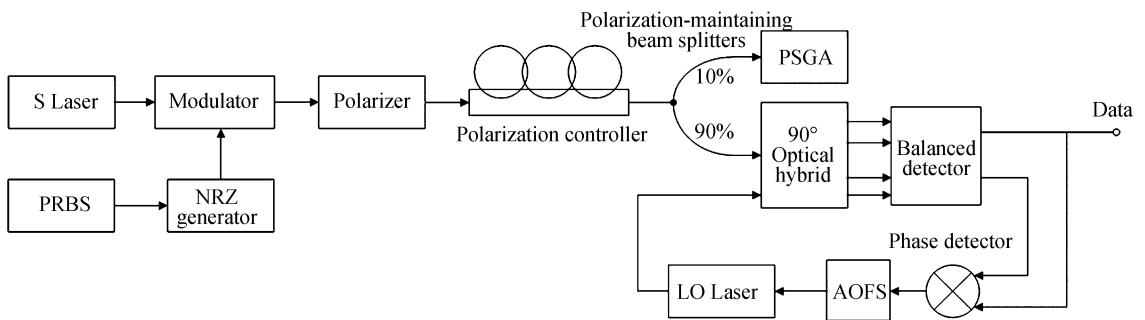


图 7 零差相干光通信实验系统原理图

Fig. 7 Principle diagram of homodyne optical coherent communication experimental system

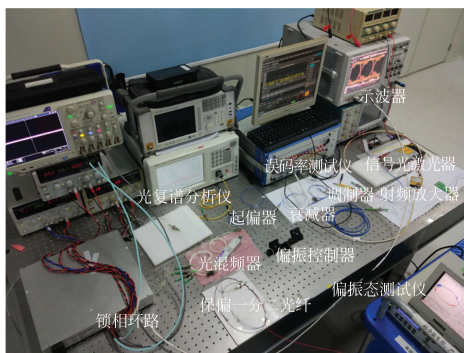


图 8 零差相干光通信实验系统现图

Fig. 8 Photo of homodyne optical coherent communication experimental system

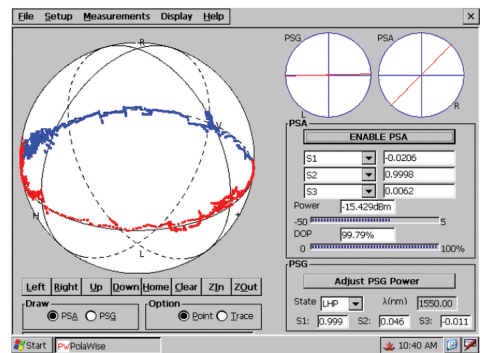


图 9 信号光偏振角度旋转测试结果

Fig. 9 Test result of rotation angle of signal beam polarization

过起偏器确定信号光的偏振方向, 再利用偏振控制器调节光束线偏振方向。输出光经过保偏分束光纤分为功率分别为 10% 和 90% 的两束激光。其中 10% 用于偏振态测试仪观察, 90% 作为传输信号光与本振光进入光混频器中进行光混频。平衡探测

器、相位探测器、声光移频器(Acoustooptic Frequency Shifter, AOFS)和本振光组成光锁相环路<sup>[18-20]</sup>, 采集相位误差并转换为频率信号, 从而调制本振光追踪信号光达到同步状态。

实验中在偏振控制器的调节下, 光混频器中

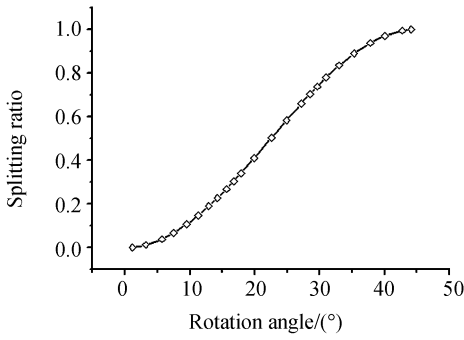
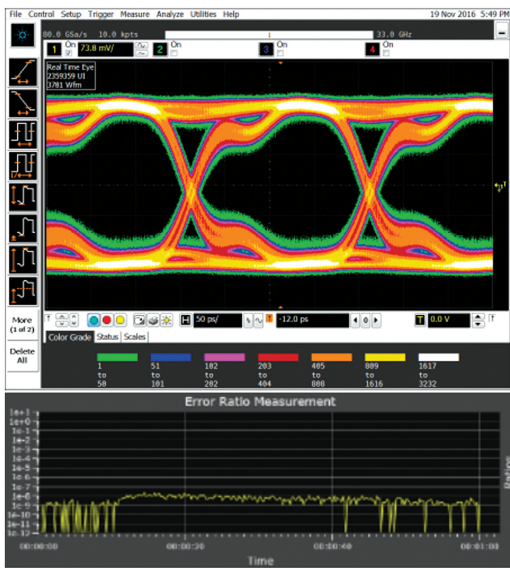
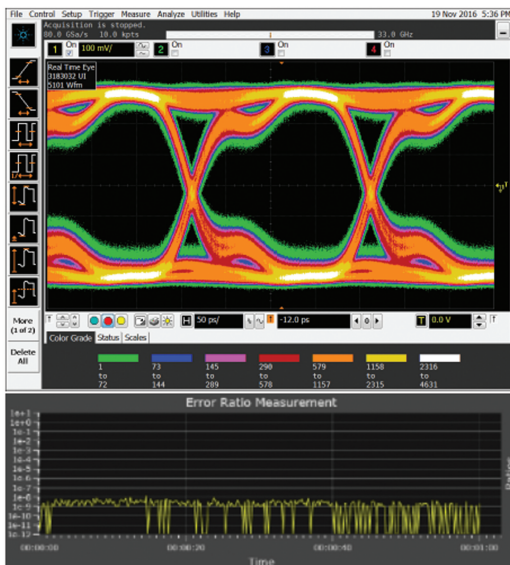


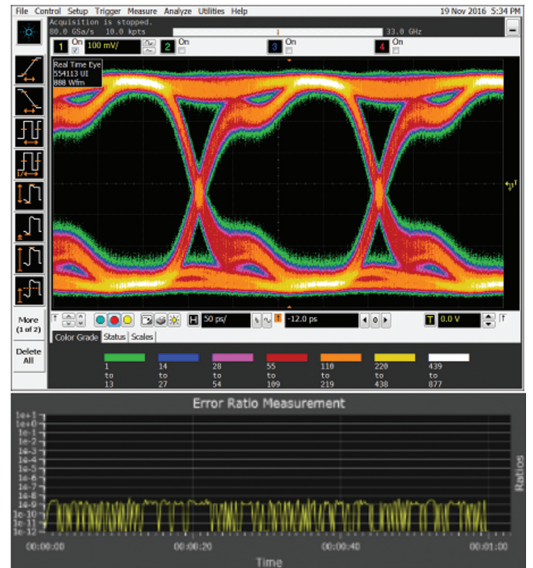
图 10 信号光偏振旋转角度与信号光分光比的关系  
Fig. 10 Relationship with rotation angle of signal beam polarization and splitting ratio



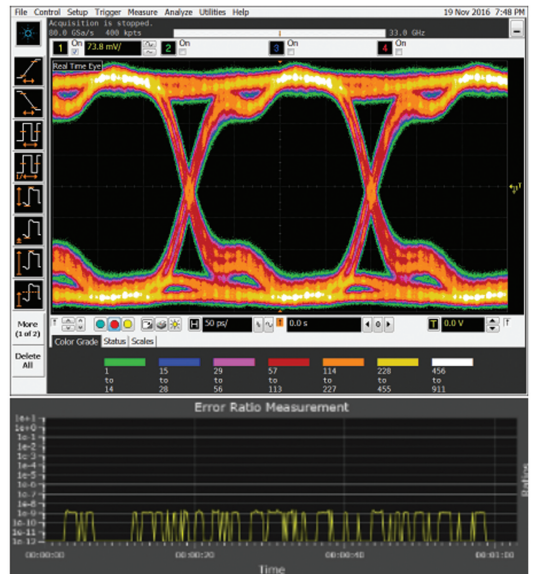
(a)  $\alpha=0.5$



(b)  $\alpha=0.4$



(c)  $\alpha=0.3$



(d)  $\alpha=0.2$

图 11 实验系统的眼图与误码率

Fig. 11 Eye diagrams and BER of experimental system with different splitting ratios

信号光的分光比为 0.5, 随后调节偏振态控制器, 改变信号光的偏振态(见图 9), 使光混频器中信号光的分光比发生改变, 两者关系如图 10 所示。调节偏振态使光混频器的分光比为 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 相干系统的眼图和误码率如图 11 所示。信号光的分光比随着偏振角度的增大而下降。系统误码率与光混频器分光比的实验曲线如图 12 所示。随着分光比由 0.5 减小至 0.2, 系统误码率由  $3.53 \times 10^{-9}$  下降至  $4.25 \times 10^{-10}$ , 证明优化

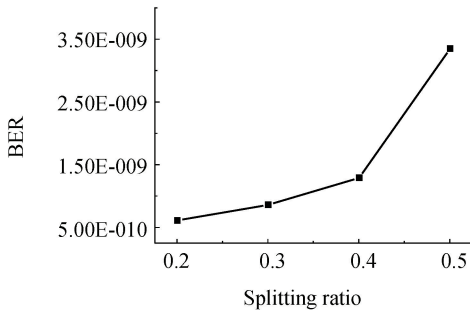


图12 零差实验系统误码率与分光比的关系曲线

Fig. 12 Relationship between BER of homodyne experimental system and splitting ratio

分光比可以改善相干光通信系统的通信性能。

当继续调节光混频器的分光比至 0.1 时,系统环路失锁,  $BER=1$ 。根据计算可知分光比优化理论值约为 0.02, 测量结果与理论计算存在偏差。偏差来源于以下因素:(1)插入损耗, 环路中各器件存在插入损耗, 降低了传输信号光的功率<sup>[21]</sup>; (2)噪声带宽, 环路噪声带宽没有达到理论的最佳要求, 导致环路的相位噪声高于理论值。上述原因会

## 参考文献:

- [1] LIU L, HE J, TANG J, *et al.*. Channel estimation method using orthogonal sequences in frequency domain for 100-Gb/s polarization-division multiplexing single-carrier frequency domain equalization coherent optical communication systems [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 056116.
- [2] KAZOVSKY L G. Performance analysis and laser linewidth requirements for optical PSK heterodyne communications systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(4): 415-425.
- [3] PRABHU V K. PSK performance with imperfect carrier phase recovery [J]. *Aerospace and Electronic Systems*, 1976, AES-12(2): 275-285.
- [4] FINK D. Coherent detection signal-to-noise [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(3): 689-690.
- [5] KONYSHEV V A, LEONOV A V, NANII O E, *et al.*. Accumulation of nonlinear noise in coherent communication lines without dispersion compensation [J]. *Optics Communications*, 2015, 349: 19-23.
- [6] PEPPAS K P, MATHIOPOULOS P T. Free-space optical communication with spatial modulation and

降低信号光功率并提高环路相位误差。根据式(20)可知,光混频器需要分光给 Q 支路更多的能量完成锁相,所以系统实际可优化的分光比要大于理论值。实验结果与理论分析一致。

## 5 结论

本文通过优化空间光混频器信号光的分光比有效提高了系统的探测灵敏度。首先推导了分光比与环路相位误差和误码率的影响规律,通过理论分析和系统仿真得到,优化分光比可使系统的探测灵敏度提高 2.83 dB。随后搭建零差相干光通信系统实验平台对分光比进行研究,由于环路插损和噪声带宽的影响,光混频器信号光的分光比可优化至 0.2。

实际研究和设计相干通信系统时,应提前估算出环路的插入损耗和噪声带宽,根据信号光分光比的影响规律,在优化光混频器信号光的分光比时留有余量,在保证环路锁相功能的同时提高通信系统的探测灵敏度。

coherent detection over H-K atmospheric turbulence channels [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(20): 4221-4232.

- [7] LIU C, CHEN S Q, LI X Y, *et al.*. Performance evaluation of adaptive optics for atmospheric coherent laser communications [J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15554-15563.
- [8] LI J W, ZHANG Z, GAO J Q, *et al.*. Bandwidth of adaptive optics system in atmospheric coherent laser communication [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 254-260.
- [9] 南航, 张鹏, 佟首峰, 等. 大气湍流下带有跟踪误差的空间相干光通信性能分析 [J]. *光子学报*, 2015, 44(8): 0806003.
- NAN H, ZHANG P, TONG SH F, *et al.*. Performance analysis of free space coherent optical communication in atmosphere turbulence with tracking error [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(8): 0806003. (in Chinese)
- [10] SHI H X, DONG Y, XIE W L, *et al.*. High-sensitivity 5 Gb/s BPSK homodyne detection using Costas loop [C]. *Asia Communications and Photonics Conference 2014, ACP*, 2014.
- [11] SCHAEFER S, ROSENKRANZ W. Costas-loop

- based carrier recovery in optical coherent intersatellite communications systems [C]. *Proceedings of the 2015 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, IEEE, 2015: 30-34.
- [12] WANG J, YANG X S. A hybrid topology optimization method based on sensitivity analysis [C]. *Proceedings of 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, IEEE, 2016: 1-4.
- [13] LEONID G K. A hybrid topology optimization method based on sensitivity analysis [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3 (6): 1238-1247.
- [14] WANG Y, LEEB W R L. Sensitivity analysis and performance optimization of an optical Costas phase-locked loop [J]. *Journal of Optical Communications*, 1987, 8(1): 29-31.
- [15] LI Y P, HONG T T, WANG Z Y. A dual polarization optical 90°-hybrid in silicon-on-insulator waveguides [J]. *SPIE*, 2011, 7987: 79870U.
- [16] WU L, LI M J, LUO Y Z, *et al.*. Generation and transmission of 86 Gbit/s hybrid polarization-division multiplexed OOK/DPSK signal [J]. *SPIE*, 2008, 7136: 71360O.
- [17] BEST R E, KUZNETSOV N V, LEONOV G A, *et al.*. Simulation of analog Costas loop circuits [J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2014, 11(6): 571-579.
- [18] 金光, 李艳杰, 钟兴, 等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2067-2075.  
JIN G, LI Y J, ZHONG X, *et al.*. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2067-2075. (in Chinese)
- [19] 王绍举, 金光, 徐升. 高精度激光通信小卫星星座仿真平台设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(8): 1554-1559.  
WANG SH J, JIN G, XU K. Design of simulation platform for high precision laser communication small satellite constellation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1554-1559. (in Chinese)
- [20] 于笑楠, 佟首峰, 董岩, 等. 空间激光通信组网单光束跟踪子系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3348-3353.  
YU X N, TONG SH F, DONG Y, *et al.*. Single beam tracking subsystem of space laser communication network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3348-3353. (in Chinese)
- [21] 赵馨, 王世峰, 佟首峰, 等. 飞机-地面间激光通信天线的初始对准[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1190-1195.  
ZHAO X, WANG SH F, TONG SH F, *et al.*. Initial alignment of antenna for laser communication system between aircraft and ground station [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1190-1195. (in Chinese)

## 作者简介:



南航(1988—),男,吉林长春人,博士研究生,2011年于长春理工大学获得学士学位,主要从事空间激光通信及光混频器的研究。E-mail: sirsam@163.com

## 通讯作者:



张鹏(1985—),男,福建长汀人,副教授,2012年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事空间激光通信及光纤激光器的研究。E-mail: zhangpeng@cust.edu.cn