

光束分束比对 $2\ \mu\text{m}$ 平衡式相干探测系统信噪比影响的实验研究

王春晖 高 龙 庞亚军 刘 磊 李彦超 曲 杨

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 给出了平衡式相干探测系统的一般信噪比数学模型, 对该数学模型和普通单源相干探测系统的信噪比模型进行了数值仿真对比研究。仿真结果表明, 当平衡式相干探测系统中的光电探测器理想匹配时, 其系统的信噪比以分束比系数等于 0.5 呈对称分布; 而当光电探测器失配时, 系统的最大信噪比所对应的最佳光束分束比发生偏离。最后搭建了 $2\ \mu\text{m}$ 平衡式相干探测实验系统, 实验结果表明, 在相同的输入光功率下, 平衡式相干探测系统的最大信噪比比普通单源相干探测系统的信噪比高 19 dB; 平衡式相干探测系统的信噪比趋于饱和的范围比普通相干探测系统趋于饱和的范围宽大约 0.2。

关键词 光学测量; 平衡式相干探测; 光束分束比; 量子效率; 散粒噪声

中图分类号 O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1104002

Experimental Investigation for Relation between Beam Splitter Coefficient and Signal-to-Noise Ratio of $2\ \mu\text{m}$ Balanced Coherent System

Wang Chunhui Gao Long Pang Yajun Liu Lei Li Yanchao Qu Yang

(National Key Laboratory Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Mathematical model of signal-to-noise ratio (SNR) for balanced coherent system is proposed and SNR of balanced coherent system is simulated analytically with that of conventional coherent system. Simulation results show that SNR of balanced coherent system is symmetrical with 0.5 beam splitter coefficient with the matched detectors. Whereas, the optimum beam splitter coefficient for maximum of SNR is deviated from 0.5 with the unmatched detectors. Experimental configuration for $2\ \mu\text{m}$ balanced coherent detection is demonstrated in which the SNR is more than 19 dB higher than that of conventional coherent system with 0.5 beam-splitter coefficient and the range for SNR of balanced coherent detection near to saturation is more than 0.2 wider than that of conventional coherent system under the same optical power condition.

Key words optical measurement; balanced coherent detection; beam splitter coefficient; quantum efficiency; shot noise

OCIS codes 040.2840; 060.2390; 060.2840; 120.3180

1 引 言

相干探测以其良好的灵敏度和信噪比(SNR), 被广泛应用于各种微弱光信号探测领域, 比如激光测风雷达系统、相干差分吸收激光雷达系统和近红外激光相干干涉系统^[1~4]。以上这些系统中信号光

功率都较微弱, 并且其偏振方向都和参与干涉过程的本振光的偏振方向存在着偏差。因此, 本振光产生的过剩强度噪声和散粒噪声会使整个系统的噪声功率较高, 降低了系统信噪比。

与一般相干探测方法(如单源光电探测)相比,

收稿日期: 2011-05-30; 收到修改稿日期: 2011-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(61078063)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题。

作者简介: 王春晖(1965—), 男, 博士生导师, 主要从事近红外光学、激光测风雷达等方面的研究。

E-mail: wangchunhui02@sohu.com

平衡式相干探测方法有两个优点^[5]: 1) 消除本振光产生的过剩强度噪声和散粒噪声, 提高中频信号功率, 改善信噪比^[6]; 2) 高效率的利用本振光功率。平衡式探测系统能够把光束分束器的输出光束全部接收并加以充分利用, 而一般相干探测只能用到本振光功率的 10% 甚至更少。近年来随着两源甚至多源集成平衡式光电探测器件和集成光纤耦合系统的兴起和成熟化^[7,8], 基于集成光纤耦合系统和平衡光电探测器件的平衡式相干探测系统也逐渐得到广泛的应用^[9]。

本文针对于这种集成平衡式相干探测系统的信噪比展开了研究。分别从散粒噪声、强度过剩噪声^[10,11]以及热噪声方面给出了平衡式相干探测系统的信噪比公式。仿真结果表明, 平衡式相干探测系统的信噪比和光电探测器件的量子响应效率以及光纤耦合系统的光束分束比均有着密切的关系。另外还分析了散粒噪声和强度过剩噪声与光束分束比的关系, 最后利用实验结果验证了以上的仿真结果。

2 原 理

图 1 所示为平衡式相干探测系统的光学原理图, 该系统的核心器件是一个双端输入双端输出的光纤耦合系统^[4]。两路光信号 E_s 和 E_l 进入到光纤耦合系统后, 形成两束光束对, $(E_{s1} + E_{l1})$ 和 $(E_{s2} -$

$E_{l2})$ 。这两路信号光分别输入到平衡式光电探测器件上的两个光电探测单元上, 并产生射频电信号 i_1 和 i_2 , 最后经过差分放大处理后, 得到了平衡式光电探测系统输出的总射频电流 $i_{\text{balanced}} = i_1 - i_2$, 式中 i_1 和 i_2 的表达式如下:

$$i_1 = \frac{\eta_1 e}{\hbar \omega} \{ (1 - \epsilon) E_s^2 + \epsilon E_l^2 + 2 \sqrt{1 - \epsilon} \sqrt{\epsilon} E_s E_l \times \cos[(\omega_s - \omega_l)t + \phi_s - \phi_l] \} + n_1(t), \quad (1)$$

$$i_2 = \frac{\eta_2 e}{\hbar \omega} \{ \epsilon E_s^2 + (1 - \epsilon) E_l^2 - 2 \sqrt{1 - \epsilon} \sqrt{\epsilon} E_s E_l \times \cos[(\omega_s - \omega_l)t + \phi_s - \phi_l] \} + n_2(t), \quad (2)$$

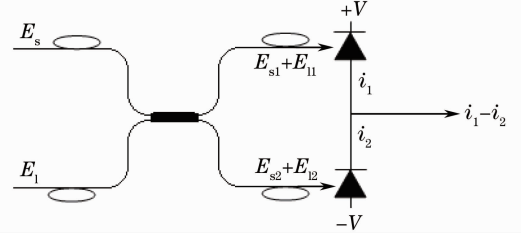


图 1 平衡式相干探测系统光学原理图

Fig. 1 Optical principle of balanced coherent detection system

式中 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 为噪声电流, E_s 和 E_l 分别是进入到平衡式探测系统中的光信号, η_1 和 η_2 表示平衡式探测系统中两个光电二极管相应的量子效率, ϵ 代表了光束分束比系数。这样两项光电流经过差分处理后, 形成的平衡式探测系统响应电流信号为

$$i_{\text{balanced}} = \frac{e}{\hbar \omega} \{ [(1 - \epsilon) \eta_1 - \epsilon \eta_2] E_s^2 + [\epsilon \eta_1 - (1 - \epsilon) \eta_2] E_l^2 \} + \frac{e}{\hbar \omega} \{ 2(\eta_1 + \eta_2) \sqrt{1 - \epsilon} \sqrt{\epsilon} E_s E_l \cos[(\omega_s - \omega_l)t + \phi_s - \phi_l] \} + [n_1(t) - n_2(t)]. \quad (3)$$

在同样的输入信号光 E_s 和本振光 E_l 的情况下, 得到了平衡式相干探测系统和单源相干探测系统的信噪比公式, 如下所示:

$$R_{\text{SN}_{\text{balanced}}} = \frac{P_{\text{balanced}}}{P_{\text{b-shot}} + P_{\text{b-excess}} + P_{\text{b-thermal}}} = \frac{2(1 - \epsilon) \epsilon P_s (\eta_1 + \eta_2)^2}{\hbar \omega \Delta f_b (M_1 \sqrt{\eta_1 \epsilon} - M_2 \sqrt{\eta_2 (1 - \epsilon)})^2 + 2e \gamma P_1 [\eta_1 \epsilon - \eta_2 (1 - \epsilon)]^2 \Delta f_b + k_1 N_{\text{th}}}, \quad (4)$$

$$R_{\text{SN}_{\text{conventional}}} = \frac{P_{\text{conventional}}}{P_{\text{c-shot}} + P_{\text{c-excess}} + P_{\text{c-thermal}}} = \frac{2 \eta P_s}{\hbar \omega \Delta f_c M^2 + 2e \gamma \eta P_1 \Delta f_c + k_2 N_{\text{th}}}, \quad (5)$$

式中 $k_1 = \frac{(\hbar \omega)^2}{4 P_1 R_{\text{ld}} e^2}$, $k_2 = \frac{(\hbar \omega)^2}{4 P_1 R_{\text{lc}} e^2 \eta}$, R_{ld} , R_{lc} , Δf_d , Δf_c 分别代表平衡式光电探测器件和单元光电探测器件的负载电阻和频率响应带宽, \hbar , ω , e , N_{th} 分别代表了普朗克常量, 入射光的频率, 单位电子电荷和 N_{th} 热噪声。

3 光电探测器件匹配情况下的数值仿真

在文中对平衡式相干探测系统和普通相干探测的信噪比表达式(4)和(5)式进行了数值仿真, 假设进入到光电探测系统中的入射信号光功率 $P_s =$

1 mW, 本振光功率 $P_1 = 10\ \text{mW}$, $R_{lc} = R_{ld} = 50\ \Omega$, 图 2 为平衡式相干探测系统和普通相干探测系统的信噪比对比图。由图可知平衡式相干探测系统的信噪比是关于分束比为 0.5 对称的, 而当分束比等于其它值时, 系统的信噪比均小于分束比等于 0.5 时所对应的信噪比; 而单源相干探测系统的信噪比始终保持不变。从图 2 中还可以得出, 平衡式相干探测系统的最大信噪比比普通相干探测的信噪比高 19 dB, 而当分束比等于 0.13 或 0.87 时, 平衡式相干探测的信噪比等于普通相干探测的信噪比。当分束比处于上述范围之外时, 平衡式相干探测系统的信噪比小于普通相干探测的信噪比。当平衡式相干探测系统中只考虑散粒噪声和热噪声时 (如图 3, 4 所示), 得出了平衡式相干探测系统和普通相干探测系统信噪比对比图, 由于在相干探测系统的噪声来源中, 散粒噪声占主要来源, 因此得出了图 3 和图 2 基本相似的结论, 信噪比的分界点, 以及最大信噪比的差值基本保持不变。当该系统中只有强度过剩噪声和热噪声时, 得出图 4。其变化趋势和图 3 类似。由信噪比表达式 (4) 式可知, 平衡式相干探测

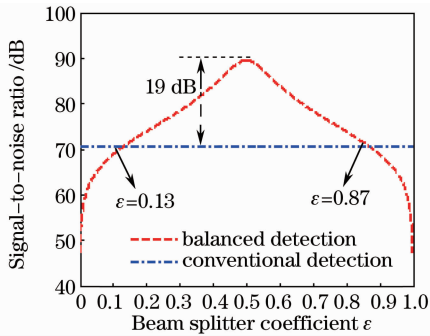


图 2 三种噪声都存在的情况下, 信噪比和分束比的关系
Fig. 2 Relation between SNR and beam splitter coefficient ϵ when three kind of noises exist

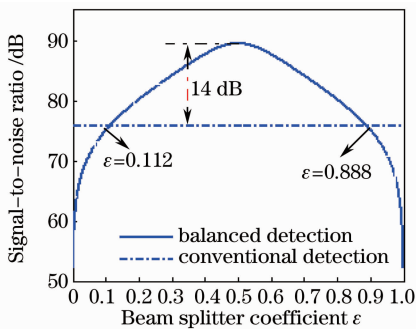


图 3 散粒噪声和热噪声存在的情况下, 信噪比和分束比的关系,
Fig. 3 Relation between SNR and beam splitter coefficient ϵ when shot noise and thermal noise exist

系统可通过调节分束比和选择理想匹配的光电探测器而使得系统中的散粒噪声和强度过剩噪声完全消除, 这时平衡式探测系统噪声项里只剩下热噪声, 而单源相干探测系统中的三种噪声依然存在, 经过数值仿真我们得到了热噪声对信噪比的影响曲线图 (如图 5 所示)。由图 5 可以看出, 在平衡式探测系统中的散粒噪声和强度过剩噪声完全消除的情况下, 只有当分束比等于 0.5 时, 平衡式探测系统的信噪比和普通单源相干探测系统信噪比相等, 而当分束比等于其它值时, 平衡式探测系统的信噪比都小于普通单源相干探测系统的信噪比。

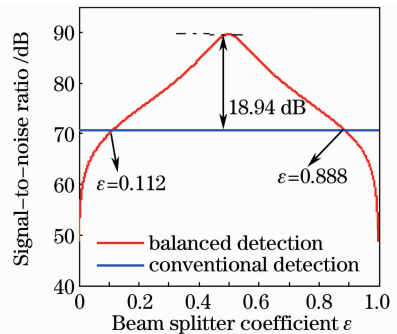


图 4 强度过剩噪声和热噪声存在的情况下, 信噪比和分束比的关系

Fig. 4 Relation between SNR and beam splitter coefficient ϵ when excess noise and thermal noise exist

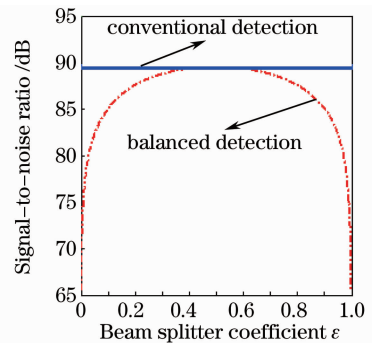


图 5 热噪声存在的情况下, 信噪比和分束比的关系
Fig. 5 Relation between SNR and beam splitter coefficient ϵ when thermal noise exists

4 光电探测器件失配情况下的数值仿真

在第 3 部分里进行的仿真主要是针对于匹配的光电探测器件系统进行的, 但实际中平衡式光电探测系统中的光电探测器并不是完全理想匹配的。各个光电探测器由于工艺问题存在着量子响应效率, 探测器内部增益以及频率带宽方面都存在较微弱的差异^[9], 对于这些失配问题我们主要考虑由于量子

效率失配所引起系统信噪比变化问题。当平衡式相干探测系统中光电探测器的量子响应效率变化时,得到散粒噪声对系统信噪比的影响关系曲线如图 6 所示,随着量子效率的失配程度越来越严重时,分束比和散粒噪声的对比关系曲线图也发生了偏离,对于每组的信噪比关系曲线图发生最大信噪比时所对应的光束分束比也在发生着变化。当光束分束比线性变化时,最佳光束分束比呈现出非线性的变化,而且对应的峰值信噪比数值呈现出非线性的变化趋势(如图 7 所示)。类似于失配时对散粒噪声的讨论,我们也考虑了失配情况下强度过剩噪声对系统信噪比的影响,得到的结论和前面情况类似,在这里不再赘述。

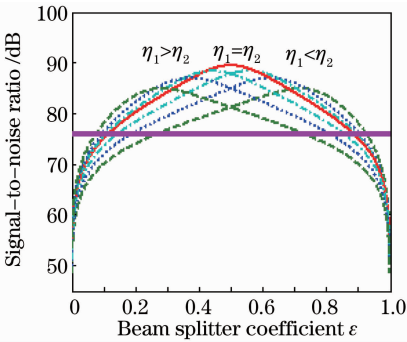


图 6 失配时散粒噪声对系统信噪比的影响
Fig. 6 Relation between shot noise and SNR for unmatched detectors

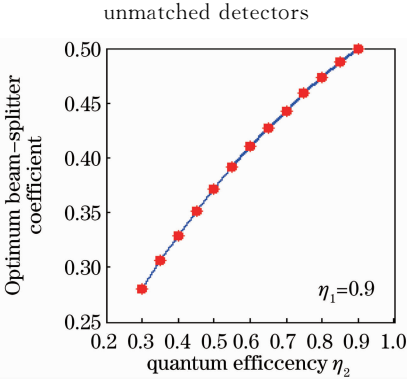


图 7 失配时量子效率和最佳光束分束比的关系
Fig. 7 Relation between quantum efficiency and optimum beam splitter coefficient for unmatched detectors

5 实 验

利用 $2\ \mu\text{m}$ 的光源进行了实验研究,实验实物图如图 8 所示。实验原理图如图 9 所示,两束相干光来自于同一激光器,其中光束 2 经过声光移频器(AOM)的 100 MHz 频率迁移和光束 1 会集在偏振分束棱镜 1(PBS1)上,通过控制光束 1 和光束 2 的偏振方向,来满足光束 1 透射 PBS1,而光束 2 被

PBS1 反射,然后穿过 $\lambda/2$ 波片后所形成的光束分别是 $E'_{w1,x}$ 和 $E'_{w2,y}$ 。如图 10 所示,当这两束光经过 PBS2 后,在 x 和 y 方向所形成的光场表达式是 $E_{w1,x} \cos\beta - E_{w2,y} \sin\beta$ 和 $E_{w1,x} \sin\beta + E_{w2,y} \cos\beta$,其中 β 是 $\lambda/2$ 波片和水平方向之间的夹角,通过旋转 $\lambda/2$ 波片就可以改变光束分束比。最后,这两束混合光束照射在平衡式光电探测器上(如图 9 所示),从光电探测器产生的中频电信号利用频谱分析仪就可以对系统的信噪比进行测量。当 $\lambda/2$ 波片转动到某一位置时,可以得到光电探测上单管和双管的中频电流信号如图 11(a)和(b)所示,从这两图中可以明显看出图 11(a)中的时域信号携带着明显的干扰信号,图 11(b)中时域信号中的干扰信号已消失不见,这也宏观说明了平衡式相干探测系统比单源相干探

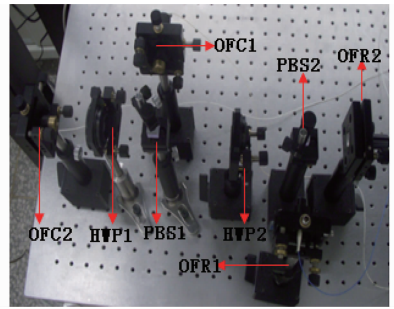


图 8 实验实物图
Fig. 8 Photo of experimental configuration

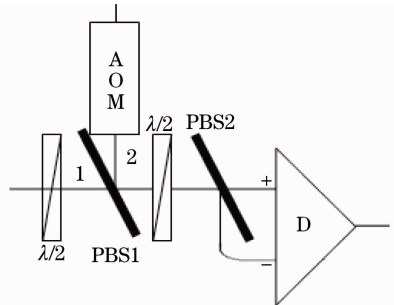


图 9 实验原理图
Fig. 9 Principle of experiment

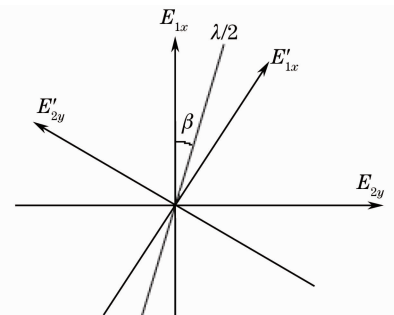


图 10 探测信号矢量分解图
Fig. 10 Vectors of detected signal

测系统的信噪比要高。

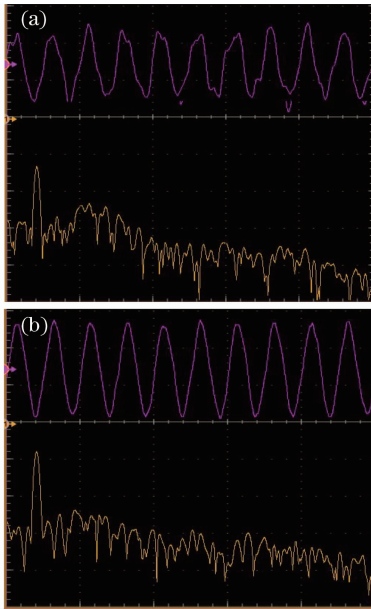


图 11 平衡式光电探测器上的单管和双管的中频信号结果。(a)单管中的示波器信号显示；(b)双管中的示波器信号显示

Fig. 11 Intermediate frequency signal on single detector and dual balanced detectors. (a) Oscilloscope signal for single detector; (b) oscilloscope signal for balanced detectors

由数学模型(4)式和(5)式以及图 2 可以得出,对于不同的分束比系数平衡式光电探测系统的信噪比和单源相干探测系统的信噪比有着不同的大小关系。从实验原理图图 9 可知,可以通过改变 $\lambda/2$ 波片来精确控制平衡光电探测系统的信噪比大小。当旋转 $\lambda/2$ 波片的快轴方向而使分束比系数在 $0\sim 1$ 之间变化时,平衡式光电探测系统的信噪比随着分束比系数的改变而改变,而且信噪比值也是关于分束比等于 0.5 呈现出对称的特性,这也完全和数学模型

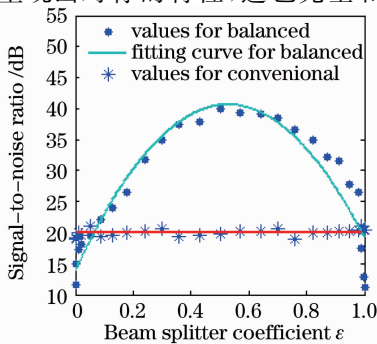


图 12 平衡式相干探测和传统相干探测的信噪比实验结果

Fig. 12 Experimental results for SNR of balanced coherent detection and conventional coherent detection

仿真结果完全吻合。由图 12 可以看出,当分束比等于 0.5 时,平衡式相干探测系统的信噪比达到最大值 39 dB,而此时的普通相干探测系统的信噪比始终保持 20 dB 左右。而当分束比调节到 0.1 或者 0.9 左右时,平衡式相干探测系统的信噪比就等于普通相干探测的信噪比;如果分束比低于 0.1 或者大于 0.9 时,平衡式相干探测系统的信噪比就低于普通相干探测的信噪比数值。

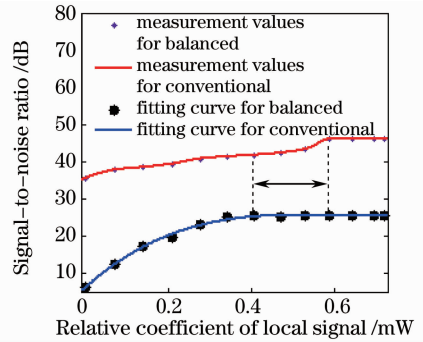


图 13 平衡式相干探测和传统相干探测的线性增长区域
Fig. 13 Comparison of linear increasing ranges for balanced coherent detection and conventional coherent detection

对于相干探测来讲,在信号光功率一定同时本振光功率足够强时,系统的信噪比就和本振光功率不相关了。为了研究平衡式探测系统有关这方面的特性,我们调节系统中第一个 $\lambda/2$ 波片的快轴方向,使系统的分束比系数等于 0.5,同时通过系统的第二个 $\lambda/2$ 波片来改变本振光功率,然后分别测量平衡式相干探测系统和普通相干探测系统的信噪比。在实验中信号光功率为 6.42 mW,最大本振光功率为 28.36 mW,调节实验系统中的第一个 $\lambda/2$ 波片来连续改变本振光功率的大小。如图 13 所示,通过旋转平衡系统中的第二个 $\lambda/2$ 波片来改变本振光功率,在这里定义 $\lambda/2$ 波片的快轴方向和本振光振动方向之间夹角的余弦为相对本振光功率系数。因此对于平衡式相干探测系统来说,当相对本振光功率系数等于 0.6 时,系统信噪比开始趋近于饱和;而对于普通相干探测系统来讲,相对本振光功率等于 0.4 时,系统的信噪比才开始趋近于饱和。很明显在相等的信号光功率情况下,当提高本振光功率时,普通单源相干系统的信噪比公式中有效信号的功率和噪声功率都在增加,而整体所表现出的系统信噪比已经趋于饱和。然而对于平衡式相干探测来讲,可以通过调节系统分束比来改变系统散粒噪声和强度过剩噪声功率,这样当本振光功率增加时,我们就可以

在较大范围内来提高平衡式探测系统的信噪比,因此平衡式相干探测系统的线性增长区域就大于普通相干探测系统的线性增长区域,说明了平衡式相干探测系统在可测量性方面比普通相干探测方法更有优势。

6 结 论

本文首先从散粒噪声、强度过剩噪声和热噪声三个方面分别推导了平衡式相干探测系统和普通单源相干探测系统的信噪比数学模型,其次仿真分析了该数学模型中影响系统信噪比大小的各种因素。仿真结果表明,当平衡式相干探测系统的光电探测器理想匹配时,其系统信噪比只和光束分束比系数相关,并且以分束比等于 0.5 呈对称分布。当分束比系数为 0.5 时,平衡式相干探测系统中散粒噪声和强度过剩噪声完全消除,系统只有热噪声存在而普通相干探测系统中散粒噪声和强度过剩噪声和热噪声依然存在,此时平衡式相干探测系统的极大信噪比值比普通相干探测系统的信噪比值高 19 dB。当平衡式相干探测系统中的光电探测器失配时,产生最大系统信噪比所对应的分束比系数也随之发生变化,这种规律对于在实际使用中调节光束分束比是非常重要的。最后,对平衡式相干探测和普通相干探测进行了信噪比的实验对比研究,实验结果和模拟仿真结果吻合,从而证实了平衡式相干探测系统的可行性和优越性所在。

参 考 文 献

1 Wang Chunhui, Gao long, Li Yanchao *et al.*. Investigation of balanced detection and receiver for coherent lidar[C]. *SPIE*, 2009, **7382**: 73820I1~73820I8

- 2 Xu Nan, Liu Liren, Wan Lingyu *et al.*. Coherent detection of position errors in space laser coherent communications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 347~351
 许楠, 刘立人, 万玲玉等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 347~351
- 3 Wu Jizhou, Han Qiang, Ma Jie *et al.*. Research on the adjustable balance probe for laser polarization spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2601~2606
 武寄洲, 韩强, 马杰等. 可调平衡探测激光偏振光谱研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2601~2606
- 4 Li Jianlong, Zhang Lijuan, Fu Kexiang *et al.*. A new structure for designing beam splitters with the compound modulated grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 43~48
 李建龙, 张丽娟, 傅克祥等. 一种新型的光束分束结构-复合调制型光栅[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 43~48
- 5 G. L. Abbas, V. W. S. Chan, T. K. Yee. Local-oscillator excess-noise suppression for homodyne and heterodyne detection[J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(8): 419~421
- 6 Yves Painchaud, Michel Poulin, Michel Morin *et al.*. Performance of balanced detection in a coherent receiver[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3659~3672
- 7 Hao Yunqi. Research on the Polarization Properties of 2×2 Single-mode Fiber Coupler[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. 17~19
 郝蕴琦. 2×2 单模光纤耦合器的偏振特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007. 17~19
- 8 D. K. Mynbaev, L. L. Scheiner. Fiber Optical Communication Technology[M]. Xu Gongquan, Duan Kun *et al.* Transl. Beijing: China Machine Press, 2002. 47~49
 门巴耶夫, 沙伊纳. 光纤通信技术[M]. 徐公权, 段鲲等译. 北京: 机械工业出版社, 2002. 47~49
- 9 Wang Qinquan. Research on Microwaves (Millimeter Waves) Generated by Optical Heterodyne[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. 19~36
 王沁泉. 光外差法产生微波(毫米波)信号的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009. 36~19
- 10 G. L. Abbas, V. W. S. Chan, T. K. Yee. A dual-detector optical heterodyne receiver for local oscillator noise suppression[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(5): 1110~1122
- 11 Meng Zhaohua, Hong Guanglie, Hu Yihua *et al.*. Research on chirped amplitude modulation coherent lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2446~2450
 孟昭华, 洪光烈, 胡以华等. 啁啾调幅相干探测激光雷达关键技术研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2446~2450