

2 μm 双平衡式外差探测 IQ 解调与信噪比研究

庞亚军 高 龙 王春晖

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 建立了双平衡式外差探测 IQ 解调的数学模型,通过旋转 $\lambda/4$ 波片来改变 IQ 信号间的相位差。从本振光强度过剩噪声、散粒噪声和热噪声三个方面对平衡式外差探测系统的信噪比(SNR)进行了仿真。仿真结果表明,当旋转 $\lambda/2$ 波片使分束比在(0~0.272)和(0.728~1)范围内时,单源探测信噪比比平衡式探测的信噪比高;而分束比在(0.272~0.728)时平衡式探测的信噪比高于单源探测。搭建了 2 μm 双平衡式外差探测实验系统,当分束比为 0.5 时,平衡式外差探测的信噪比比单源外差探测的信噪比提高 10 dB 以上,从而证明了双平衡式外差探测系统在微弱信号检测中的可行性和优越性。

关键词 探测器;双平衡式外差探测;IQ 解调;分束比;信噪比;微弱信号检测

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0114001

Analysis of IQ Demodulation and Signal Noise Ratio for 2 μm Dual-Balanced Heterodyne Detection

Pang Yajun Gao Long Wang Chunhui

(Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract An IQ demodulation model for dual-balanced heterodyne detection is established, by rotating $\lambda/4$ wave plate to change the phase difference between the IQ signals. Signal-to-noise ratio (SNR) of balanced heterodyne detection is simulated with local excess intensity noise, shot noise and thermal noise. Simulation results show that signal-to-noise ratio of conventional heterodyne detection is higher than that of balanced heterodyne detection, when the beam splitter coefficient adjusted by rotating $\lambda/2$ wave plate is less than 0.272 or much than 0.728. Whereas, signal-to-noise ratio of conventional heterodyne detection system is less than that of balanced detection system. Finally, 2 μm dual-balanced heterodyne detection system is proposed, in which the signal-to-noise ratio is 10 dB higher than that of conventional heterodyne system with 0.5 beam-splitter coefficient. This result verify feasibility and advantage of the balanced heterodyne detection system for detecting weak signal.

Key words detectors; dual-balanced heterodyne detection; IQ demodulation; beam splitter coefficient; signal-to-noise ratio; weak signal detection

OCIS codes 040.1880; 040.2840; 060.2630

1 引 言

近几年各种基于平衡式探测的集成器件相继问世,基于平衡式器件的各种探测方法正在不断被应用于数字光纤通信领域以及各种模拟微弱信号的检测领域^[1]。平衡外差接收可以降低本振光自身产生的强度过剩强度噪声和散粒噪声,消除温差的影响,

提升其空间环境适应能力,提高外差信号的信噪比;平衡外差光频 IQ 解调,通过正交分量和垂直分量对比,不仅可以实现强度、频率、相位等信息的解调,还可以实现激光测风雷达风向的判断^[2~4]。综合运用这两种方法可以形成一种新型高效的相干探测方法——双平衡式外差探测。这种探测方式在相干外

收稿日期: 2011-08-17; 收到修改稿日期: 2011-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61078063)资助课题。

作者简介: 庞亚军(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达和微弱光电信号检测方面的研究。

E-mail: pangyajun2007@yahoo.cn

导师简介: 王春晖(1965—),男,教授,主要从事激光雷达和红外探测技术等方面的研究。

E-mail: wangchunhui02@sohu.com

差激光雷达、相干光通信、外差干涉测量等各种领域具有广泛的应用价值^[5~7]。目前,国外的 U2T 公司和 CyOptics 公司已分别推出了 40 G 和 100 G 的双平衡式相干探测系统,国内未见报道。本文对双平衡式外差探测的 IQ 解调方法和信噪比(SNR)进行了理论推导和实验研究。

2 双平衡式相干探测系统模型

双平衡式外差探测原理如图 1 所示,信号光和本振光从两输入端口输入,最后得到相位相差 90° 的四路输出光,然后两两组合被平衡式探测器接收^[8~10]。

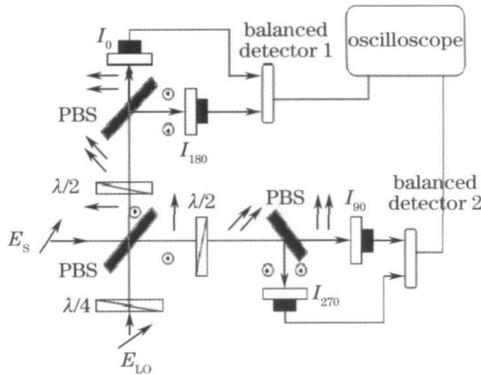


图 1 双平衡式外差探测原理图

Fig.1 Schematic of dual-balanced heterodyne detection

假设信号光和本振光的表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_s &= E_s(x, y, z) \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \exp(i\omega_s t) \\ \mathbf{E}_{LO} &= E_{LO}(x, y, z) \begin{bmatrix} k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} \exp(i\phi), \end{aligned} \quad (1)$$

本振光经过 $\lambda/4$ 波片变为圆偏振光:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}'_{LO} &= \mathbf{A}_{1/4} \mathbf{E}_{LO} = E_{LO} \begin{bmatrix} k_3 \exp(i\pi/2) \\ k_4 \end{bmatrix} \times \\ &\exp[i(\phi - \pi/4)], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A}_{1/4}$ 表示 $\lambda/4$ 波片的传播矩阵。

图 1 中偏振分束棱镜(PBS)的反射和透射矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & r_{\perp} \exp(i\rho_{\perp}) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_{\parallel} \exp(i\tau_{\parallel}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

信号光 and 变化后的本振光经过偏振分束棱镜后产生两束不同方向上的出射光:

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} t_{\parallel} \exp(i\tau_{\parallel}) k_3 E_{LO} \exp[i(\phi + \pi/4)] \\ r_{\perp} \exp(i\rho_{\perp}) k_2 E_s \exp(i\omega_s t) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} t_{\parallel} \exp(i\tau_{\parallel}) k_1 E_s \exp(i\omega_s t) \\ r_{\perp} \exp(i\rho_{\perp}) k_4 E_{LO} \exp[i(\phi - \pi/4)] \end{bmatrix}. \quad (4)$$

理想情况下透射和反射传播系 $t_{\parallel} = r_{\perp}, \rho_{\perp} = \tau_{\parallel}$ 。

图 1 中 $\lambda/2$ 波片与 x 轴成 22.5° 与 y 轴成 67.5° , 此时它的传输矩阵为

$$\mathbf{A}_{1/2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

\mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 经过 $\lambda/2$ 波片之后又分别经过一个偏振分束器各自分成两束,得到相位相差 90° 的 4 束光。于是可以在 4 个光电二极管上得到这 4 束光的光电流:

$$\begin{aligned} I_{180} &= \frac{1}{2} \{ k_2^2 |E_s|^2 + k_3^2 |E_{LO}|^2 - 2k_2 k_3 \times \\ &\quad |E_s E_{LO}| \cos[\omega_s t + \rho_{\perp} - \tau_{\parallel} - (\phi + \pi/4)] \}, \\ I_{90} &= \frac{1}{2} \{ k_1^2 |E_s|^2 + k_4^2 |E_{LO}|^2 + 2k_1 k_4 \times \\ &\quad |E_s E_{LO}| \cos[\omega_s t + \tau_{\parallel} - \rho_{\perp} - (\phi - \pi/4)] \}, \\ I_0 &= \frac{1}{2} \{ k_2^2 |E_s|^2 + k_3^2 |E_{LO}|^2 + 2k_2 k_3 \times \\ &\quad |E_s E_{LO}| \cos[\omega_s t + \rho_{\perp} - \tau_{\parallel} - (\phi + \pi/4)] \}, \\ I_{270} &= \frac{1}{2} \{ k_1^2 |E_s|^2 + k_4^2 |E_{LO}|^2 - 2k_1 k_4 \times \\ &\quad |E_s E_{LO}| \cos[\omega_s t + \tau_{\parallel} - \rho_{\perp} - (\phi - \pi/4)] \}. \end{aligned} \quad (6)$$

则在平衡式探测器 1 和平衡式探测器 2 上分别得到差频信号:

$$\begin{aligned} I_0 - I_{180} &= 2k_2 k_3 |E_s E_{LO}| \cos[\omega_s t - (\phi + \pi/4)], \\ I_{90} - I_{270} &= 2k_1 k_4 |E_s E_{LO}| \sin[\omega_s t - (\phi + \pi/4)], \end{aligned} \quad (7)$$

这两信号相位相差 $\pi/2$, 分别称它们为正交分量 I 和垂直分量 Q。

这里假设了本振光偏振方向与 $\lambda/4$ 波片光轴是成 45° 的, 使出射为理想的圆偏振, 如果转动 $\lambda/4$ 波片, 出射光变为椭圆偏振光, 则最后得到的差频信号的 IQ 分量相位差就不再是 $\pi/2$ 。另一方面, $\lambda/2$ 波片和偏振分束棱镜等效于一个分束器, 起到调节分束比的作用, 若 $\lambda/2$ 波片光轴不是严格与 x 轴成 22.5° 与 y 轴成 67.5° , 那么差频信号 I 分量和 Q 分量相应的幅值将会变小, 转动 $\lambda/2$ 波片可得到不同分束比情况下信号的信噪比, 进而可以确定最佳分束比。

3 信噪比分析

由图 1 可以看出, 双平衡式外差探测是由两路平衡式外差探测系统组成, 对其中任意一路进行分

析得到的结论是一样的。可以把其中一路等效成如图 2 所示的模型。

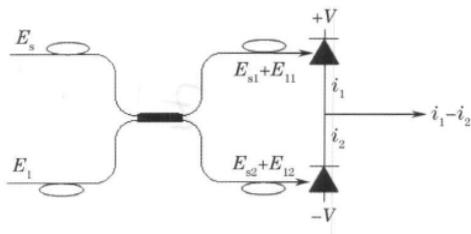


图 2 平衡式外差探测原理图

Fig. 2 Schematic of balanced heterodyne detection

这里假设进入到平衡式探测系统中信号光的功率是 P_s , $P_s = \frac{1}{2} E_s^2$, 本振参考光的功率是 P_l , $P_l = \frac{1}{2} E_l^2$ 。经过光束分束器后,形成的 4 束光束分别是

$$E_{s1} = \sqrt{(1-\epsilon)} E_s \cos(\omega_s t + \phi_s),$$

$$E_{s2} = \sqrt{\epsilon} E_s \cos(\omega_s t + \phi_s),$$

$$E_{l2} = \sqrt{(1-\epsilon)} E_l \cos(\omega_l t + \phi_l),$$

$$E_{l1} = \sqrt{\epsilon} E_l \cos(\omega_l t + \phi_l), \quad (8)$$

式中 $\epsilon(0 \leq \epsilon \leq 1)$ 表示光纤分束比,那么在两个光电探测器上产生的中频光电流分别为

$$I_1 = \alpha \sqrt{\epsilon(1-\epsilon)} E_s E_l \cos(\omega_{if} t + \phi_s - \phi_l),$$

$$I_2 = -\alpha \sqrt{\epsilon(1-\epsilon)} E_s E_l \cos(\omega_{if} t + \phi_s - \phi_l). \quad (9)$$

经过差分处理后,总的中频电流和中频功率分别为

$$I_{\text{system}} = 2\alpha \sqrt{\epsilon(1-\epsilon)} E_s E_l \cos(\omega_{if} t + \phi_s - \phi_l), \quad (10)$$

$$P_{\text{system}} = 8M^2 \alpha^2 \epsilon(1-\epsilon) P_l P_s R_l, \quad (11)$$

式中 $R_l, \alpha, M, \omega_{if}$ 分别代表负载电阻,光电转换效率系数,探测器的内部增益和信号光与本振光的频率差, α 在数值上等于 $\eta e/h\nu$ 。

最后根据(11)式,考虑本振光强度过剩噪声、散粒噪声和热噪声,并结合信噪比的定义,得到平衡式外差探测系统的信噪比表达式为

$$R_{\text{SN}}^{\text{balanced}} = \frac{P_{\text{system}}}{P_{\text{b-excess}} + P_{\text{b-shot}} + P_{\text{b-thermal}}} = \frac{8M^2 \alpha^2 \epsilon(1-\epsilon) P_l P_s R_l}{2e\gamma \alpha^2 M^2 P_l^2 (2\epsilon - 1)^2 \Delta f_{if} R_l + 2M^2 e\alpha [1 - 2\sqrt{\epsilon(1-\epsilon)}] \Delta f_{if} P_l R_l + 4k_B T \Delta f_{if}}, \quad (12)$$

同理可得单源探测系统的信噪比表达式为^[11,12]

$$R_{\text{SN}}^{\text{conventional}} = \frac{P_{\text{conventional}}}{P_{\text{c-shot}} + P_{\text{c-excess}} + P_{\text{c-thermal}}} = \frac{2\alpha^2 M^2 P_s P_l R_l}{2e\gamma \alpha^2 M^2 P_l^2 \Delta f_{if} R_l + 2M^2 e\alpha P_l \Delta f_{if} R_l + 4k_B T \Delta f_{if}}. \quad (13)$$

根据(12)式和(13)式可以得到平衡外差探测和单源探测随分束比变化时的信噪比分布对比如图 3 所示。

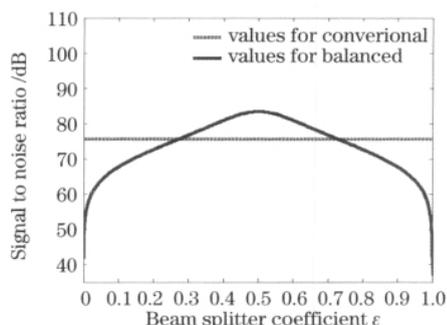


图 3 平衡式与单源探测信噪比对比图

Fig. 3 Comparison chart of balanced and single-source detection SNR

如图 3 所示,分束比 ϵ 在 $(0 \sim 0.272)$ 和 $(0.728 \sim 1.000)$ 时单源探测信噪比大于平衡式探测,分束比 ϵ 在 $(0.272 \sim 0.728)$ 时平衡式探测信噪比大于单源探

测,当分束比 ϵ 为 0.272 或 0.728 时两种探测方式信噪比相等。分束比 ϵ 为 0.5 时,平衡式探测信噪比达到最大值,比单源探测提高了大约 10 dB,即 0.5 为最佳分束比。

4 实验研究

首先根据双平衡式外差探测的理论推导和分析进行实验研究,实验图如图 4 所示。把 2 μm 激光器的输出光注入 100 MHz 声光移频器,声光移频器的 1 级光作为本振光,0 级光经过衰减器后作为信号光,分别注入系统的两个输入端。在 4 个输出端,用 4 个光纤耦合器分别把 4 路输出光由自由空间耦合到光纤中,然后两两组合后用两个相同的 2 μm 平衡探测器探测接收并用示波器进行观察。

转动 $\lambda/4$ 波片,改变本振光 o 光和 e 光的相位差,分别得到了, IQ 相位相差 $0, \pi$ 和 $\pi/2$ 的信号,并用示波器进行了观察,结果如图 5(a)、(b)和(c)所示。

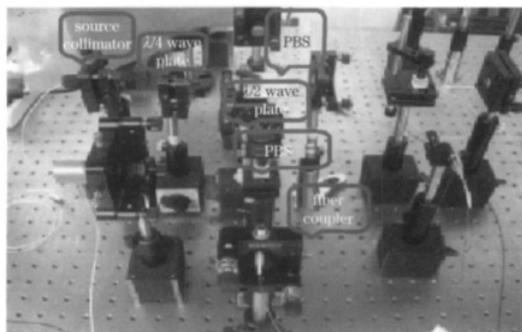


图 4 双平衡式外差探测实验图
Fig. 4 Experimental diagram of dual-balanced heterodyne detection

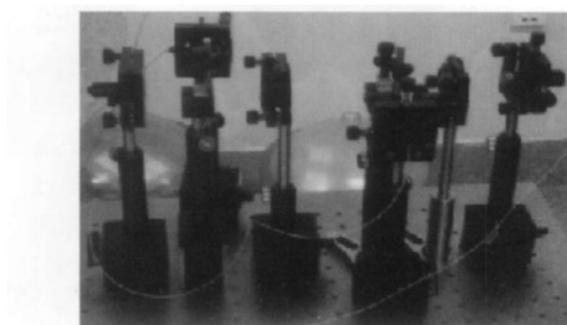


图 6 信噪比实验图
Fig. 6 Experimental diagram of SNR

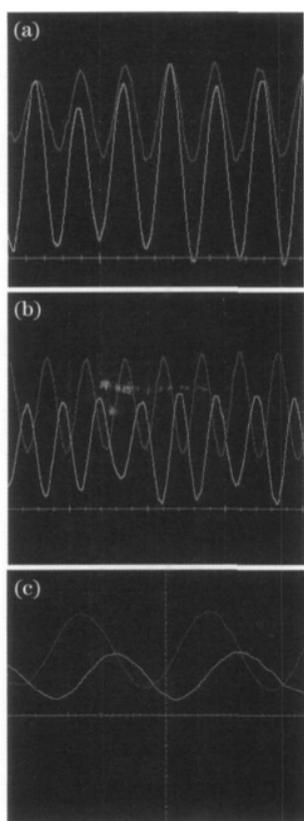


图 5 IQ 正交信号图
Fig. 5 IQ orthogonal signal graph

为了研究信噪比,搭建平衡式外差探测系统,实验图如图 6 所示,其原理图如图 7 所示。同样把声光移频器的 1 级光和 0 级光分别作为本振光和信号光注入系统中,把探测器的输出端接到频谱分析上,进行信噪比分析。

通过调节两个偏振分束棱镜之间的 $\lambda/2$ 波片来调节入射到平衡相干探测系统上的两束光束的光功率比例,实验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,分束比 ϵ 在 $(0 \sim 0.24)$ 和 $(0.85 \sim 1.00)$ 时单源探测信噪比大于平衡式探测,分束比 ϵ

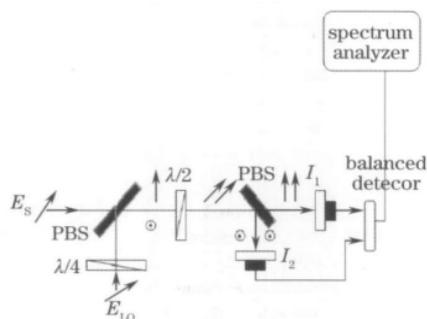


图 7 信噪比实验原理图
Fig. 7 Schematic of SNR

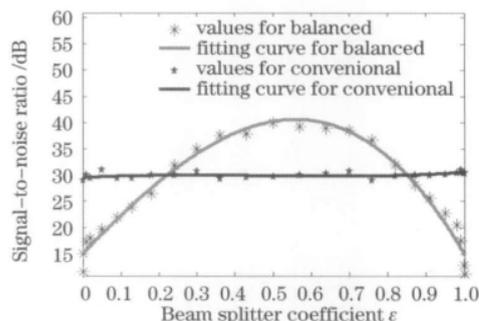


图 8 信噪比实验结果图

Fig. 8 Experimental results figure of SNR

在 $(0.24 \sim 0.85)$ 时平衡式探测信噪比大于单源探测,当分束比 ϵ 为 0.24 或 0.85 时两种探测方式信噪比相等,分束比 ϵ 为 0.52 时平衡式探测信噪比达到最大值,约比单源探测高 10 dB。

5 结 论

本文研究了双平衡式相干探测的物理机制,给出了基于光信号正交解调系统的数学模型,通过系统中的 $\lambda/4$ 波片可以实现信号间相位的精确控制。其次,将散粒噪声,强度过剩噪声和热噪声结合起来,给出了基于光纤耦合的平衡式相干探测系统的信噪比数学模型,通过研究该模型发现,平衡式相干

探测系统的信噪比是关于分束比等于 0.5 呈对称分布的。仿真结果表明,在相同的输入光信号下,平衡式相干探测系统的最大信噪比比普通相干探测系统的信噪比要高 10 dB 以上。最后搭建了 2 μm 双平衡式相干探测系统,实现了光信号的正交解调,并通过改变实验系统中的 λ/2 波片来调节平衡式相干探测系统中的光束分束比,对信噪比也进行了实验研究,实验结果和理论仿真基本吻合。

参 考 文 献

- 1 Yves Painchaud, Michel Poulin, Michel Morin Michel Tetu. Performance of balanced detection in a coherent receiver[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3659~3672
- 2 Wang Chunhui, Gao Long. Investigation of balanced detection and receiver for coherent lidar[C]. *SPIE*, 2009, **7382**: 738201
- 3 Rod Frehlich, Stephen, Sammy. Performance of a 2-μm coherent Doppler lidar for wind measurement[J]. *Frehlich. AL*, 1994, **11**: 1517~1528
- 4 Kimio Asaka, Takayuki Yanagisawa, Yoshihito Hirano. 1.5-μm eye-safe coherent lidar system for wind velocity measurement[C]. *SPIE*, 2001, **4153**: 321~328
- 5 Russell Targ, Bruce C. Steakley, James G. Hawley *et al.*. Coherent lidar airborne wind sensor II; flight-test results at 2 and 10 mm[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(36): 7117~7127
- 6 Soreq NRC. Optical noise in a coherent lidar[C]. *SPIE*, 1992, **1971**: 337~344
- 7 Gregory L. Abbas, Vincent W. S. Chan, Ting K. Yee. A dual-detector optical heterodyne receiver for local oscillator noise suppression[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(5): 1110~1122
- 8 Li Sikun, Su Xianyu, Chen Wenjing. A new wavelet transform method for optical carrier-fringe pattern phase reconstruction[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3060~3065
李思坤, 苏显渝, 陈文静. 一种新的小波变换空间载频条纹相位重建方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3060~3065
- 9 Yang Junbo, Li Xiujian, Yang Jiankun *et al.*. Optical matrix computing of rearrangeable optical interconnection network in free space[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1762~1771
杨俊波, 李修建, 杨建坤等. 自由空间可重构光互连网络的光学矩阵运算[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1762~1771
- 10 Qian Xiaofan, Rao Fan, Lin Chao *et al.*. Speckle noise reduction algorithm based on principle of shearing interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0708003
钱晓凡, 饶帆, 林超等. 基于剪切干涉原理的散斑噪声降噪算法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0708003
- 11 G. L. Abbas, V. W. S. Chan. Local-oscillator excess-noise suppression for homodyne and heterodyne detection [J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(8): 419~421
- 12 R. Garreis, Carl Zeiss. 90° optical hybrid for coherent receivers [C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 210~219

栏目编辑:何卓铭