

用于相干光通信的平衡探测器的设计与实现

刘宏阳 张燕革 艾勇 代永红 陈晶

武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072

摘要 针对国内长距离相干光通信接收系统采用单管探测器接收微弱信号噪声大、信噪比低等缺点,设计了一种应用于相干光通信系统的平衡探测器,运用两个PIN管分别加跨阻放大器(TIA),经过两个180°混频魔T进行耦合相减,消除了大部分的激光器相对强度噪声(RIN)。搭建了测试平衡探测器的相干光通信系统,使本振光和信号光进行光混频,输出眼图显示通信状态良好。通过对比双管和单管的频谱图,进一步说明相干光通信系统的噪声通过这种平衡探测器得到了降低,系统的信噪比提高了大约10 dB,从而证明了该平衡探测器运用于相干光通信系统的可行性和优越性。

关键词 相干光通信; 相对强度噪声; 平衡探测器; 信噪比

中图分类号 TN929.14 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.070601

Design and Implementation of Balance Detector Used in Coherent Optical Communication System

Liu Hongyang Zhang Yange Ai Yong Dai Yonghong Chen Jing

School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

Abstract Considering the shortcomings of the existing long distance coherent optical communication receiving system using single tube detectors which receives weak signals with large noise and low SNR, a balanced detector is designed for coherent optical communication system. The balanced detector uses two diodes with TIA respectively and reduces most of the laser's relative intensity noise after two hybrid magic Tee's coupling and subtraction. The coherent optical system is set up to test the performance of the balanced detector. The local-oscillator and signal laser are mixed and then the eye diagram shows that communication is in good condition. By comparing the spectrum, the results show that the noise of the coherent optical communication system is reduced by using the balance detector compared to the single tube. The signal-to-noise ratio of system is enhanced about 10 dB, which proves the balance detector's feasibility and superiority for application in the coherent optical communication system.

Key words coherent optical communication; relative intensity noise; balanced detector; signal to noise ratio

OCIS codes 060.1660; 030.1640; 040.5160; 250.0040

1 引言

激光通信按照传输链路的调制和检测方式,可以分为非相干与相干两种基本方式。相干光通信技术由于具有高的转换增益、可获得全部的频率和相位信息、良好的滤波性能、有利于微弱信号的检测等诸多优点^[1-3],近年来越来越多地被应用于各个领域,成为光通信链路技术发展极具潜力的选择。但是在相干检测体制中,本振光的噪声、激光器产生的相对强度噪声(RIN)、散粒噪声和温差的影响仍无法消除^[4-6],为了更好地利用本振光功率和抑制RIN,进一步提高系统的灵敏度,近来各种基于相干探测技术的平衡探测器被广泛应用于数字光纤通信领域,其中比较典型的有美国Thorlabs公司生产的各种型号平衡光电放大器以及德国U2T公司的平衡光电探测器等,但是国内尚未见报道。近几十年来,空间激光通信被广泛研究,各种技术日趋成熟。为满足将来自由空间光通信终端高精度、高码率、小型化、工业化的应用标准,美国、欧洲、日本等国家

收稿日期: 2014-01-13; 收到修改稿日期: 2014-03-07; 网络出版日期: 2014-06-18

作者简介: 刘宏阳(1988—),女,硕士研究生,主要从事平衡探测器的研制以及空间相干激光通信等方面的研究。

E-mail: liuhongyang1005@whu.edu.cn

导师简介: 张燕革(1962—),男,副教授,主要从事光学测量和光学探测等方面的研究。E-mail: zyg@whu.edu.cn

都先后开始研究空间相干光通信的关键技术,并已经有成功的空间链路实验。2007年,德国研制出了轻量化、高码率的星间相干激光通信终端,并将平衡探测器应用于其中,成功实现了低轨卫星之间的5.6 Gb/s激光通信。由于平衡探测器在相干探测中的优势,目前国际上已经开展平衡探测器在空间光通信领域的应用研究^[7-10]。因此研制出适用于空间激光通信的高接收灵敏度的平衡探测器具有重要意义。本文从相干光探测的原理出发,分析了平衡探测器对相干光通信的优势,设计出一种适用于相干光通信系统的平衡探测器,并对平衡探测器的参数进行了理论分析和实验研究。

2 平衡探测器对相干光通信性能的改善

平衡探测器是相干探测技术的核心器件之一。采用平衡探测器的相干探测技术,比通常的直接探测技术光探测器的接收灵敏度高约20 dB,显著消除了接收机噪声和电子线路噪声对微弱光信号检测的影响^[11]。在单管探测器的相干光接收系统中,由光混频器接收的本振光和信号光光场发生干涉产生中频信号,输出的两路信号中,仅一路被光探测器使用,输入的光功率将损失一半,而使用平衡探测器的相干光通信系统,光混频器两个输出端口的光信号可以分别入射到两个光电探测器上,输入信号光功率基本被完全利用,从而提高了光的有效利用率并且抵消掉很大一部分噪声。

2.1 平衡探测器对相干光通信系统灵敏度的改善

图1、图2分别给出了单管和双管平衡探测器接收相干光的原理图,当本振光与信号光完全满足相干条件时,光场发生干涉,由光电探测器实现光电转换。设信号光用 $E_s(t)$ 表示,本振光用 $E_L(t)$ 表示,有

$$E_s(t) = E_s \exp[-i(\omega_s t + \phi_s)], \quad (1)$$

$$E_L(t) = E_L \exp[-i(\omega_L t + \phi_L)]. \quad (2)$$

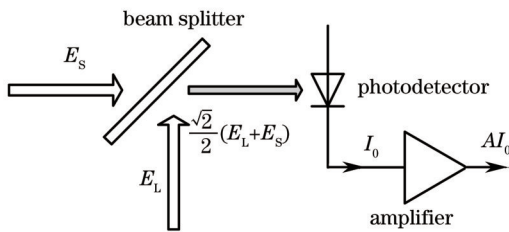


图1 单管探测器相干光接收框图

Fig.1 Diagram of single tube detector receiving coherent laser

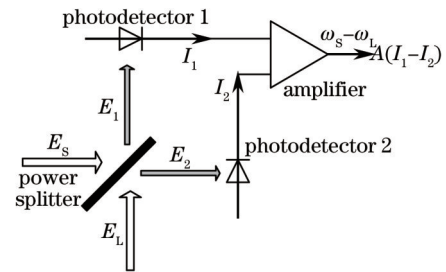


图2 平衡探测器相干光接收框图

Fig.2 Diagram of balanced detector receiving coherent laser

设功率分束镜为理想的器件,即线性、对称、无损耗,则有

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \exp(j\psi_r) \begin{bmatrix} 1 & \exp(j\frac{\pi}{2}) \\ \exp(j\frac{\pi}{2}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_L \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 ψ_r 为功率分束镜的反射相移。

单管光电探测器产生的电流

$$I_0(t) = \frac{\eta e}{h\nu} [P_L + P_s + \sqrt{P_s P_L} \cos(\omega_{IF} t + \phi_s - \phi_L)]. \quad (4)$$

而相干光通信中 $P_L \gg P_s$,因此

$$I_0(t) = \frac{\eta e}{h\nu} P_L + \frac{\eta e}{h\nu} \sqrt{P_s P_L} \cos(\omega_{IF} t + \phi_s - \phi_L), \quad (5)$$

式中 ω_s 和 ω_L , E_s 和 E_L , ϕ_s 和 ϕ_L 分别为信号光和本振光的频率、振幅和相位; P_s 和 P_L 分别为信号光和本振光的光功率; $\omega_{IF} = \omega_s - \omega_L$ 为中频信号的频率, η 为光电探测器的量子效率, e 为电荷量, h 为普朗克常量, ν 为光频率。平衡探测器输出的电流信号为

$$I_1(t) - I_2(t) = 2 \frac{\eta e}{h\nu} \sqrt{P_s P_L} \cos(\omega_{if} t + \phi_s - \phi_L). \quad (6)$$

对比(5)式和(6)式可知,平衡探测器对共模信号起到了抑制作用,抑制了本振光的噪声^[12],并且对有用信号的能量提高了3 dB,噪声得到减小,进而探测器的灵敏度得到提高。

2.2 相干光通信系统对平衡探测器一致性的要求

平衡探测器的噪声主要有热噪声、散粒噪声、相对强度噪声(RIN)等噪声组成,其中探测器的响应度用 α 来表示

$$\alpha = \frac{\eta e}{h\nu}. \quad (7)$$

平衡探测器由两个光敏面构成,每个光敏面都是一个光电二极管,经光照后会输出相应的光电流,光电流经过串联的电阻后转换为电压信号输出,它们之间的差别体现在两个光电二极管的响应度不一致性。两个探测器的响应度越接近越好。设两个光电二极管的响应度分别为 α_1 和 α_2 ,则平衡探测器的一致性系数 k 可表示为

$$k = 1 - \left(\frac{2|\alpha_1 - \alpha_2|}{\alpha_1 + \alpha_2} \right) \times 100\%. \quad (8)$$

热噪声为

$$\langle i_{in}^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_L}. \quad (9)$$

按照室温 $T=290$ K和 $B=4$ GHz带宽进行计算,得到

$$\langle i_{in}^2 \rangle = 6.4 \times 10^{-11} / R. \quad (10)$$

若 $R=50 \Omega$,则

$$\langle i_{in}^2 \rangle = 1.28 \times 10^{-12} \text{ (A}^2\text{)}. \quad (11)$$

通过增加负载和降低温度,热噪声还可进一步降低,因此热噪声并不是影响平衡探测器工作的主要噪声。

探测器的散粒噪声电流均方值表示为

$$\langle i_{sn}^2 \rangle = 2e\alpha P_L B. \quad (12)$$

由于暗电流远小于由本振光(5 mW)产生的光电流,所以由暗电流产生的散粒噪声远远小于由本振光产生的散粒噪声,为此可以忽略暗电流。 η 取0.8,带宽 $B=4$ GHz,计算得到

$$\langle i_{sn}^2 \rangle = 6.4 \times 10^{-12} \text{ (A}^2\text{)}. \quad (13)$$

散粒噪声远大于热噪声,且不能消除,为此散粒噪声对探测器的影响较大。

RIN噪声的表达式为

$$\langle i_{RIN}^2 \rangle = R_{IN} \times B \times (\alpha P_L)^2. \quad (14)$$

一般毫瓦级半导体激光器的RIN噪声范围为 $-155 \sim -130$ dB/Hz,此处取 $R_{IN} = -135$ dB/Hz,计算得到

$$\langle i_{RIN}^2 \rangle = 3.1643 \times 10^{-9} \text{ (A}^2\text{)}. \quad (15)$$

对比(10)、(13)、(15)式可以看出,RIN噪声的数量级比热噪声和散粒噪声的要大。而把平衡探测器应用于相干通信系统,可以有效抑制RIN噪声,提高通信系统的灵敏度。为了使探测器的RIN噪声小于散粒噪声(即使RIN噪声得到有效抑制),使探测器的灵敏度由散粒噪声决定,对平衡探测器的两个PD的一致性有着严格的要求,平衡探测器的一致性系数为 k ,则 k 必须满足

$$R_{IN} \times B \times [(1-k)\alpha P_L]^2 < 2e\alpha P_L B, \quad (16)$$

此时 k 必须满足 $k > 95.5\%$ 。

3 平衡探测器的设计与理论分析

平衡探测器主要用于相干光通信探测系统,要求两只光电二极管及其辅助电路的一致性要尽可能高。光束在相干探测的混频过程中获得增益,等效为一个无噪声的光放大器。目前国外采用的平衡探测器的结

构主要有将两个光电二极管串联后中间抽头接 TIA 和每只二极管后接跨阻放大器(TIA)再并联两种结构,这里采用第二种结构,其结构原理框图如图 3 所示。

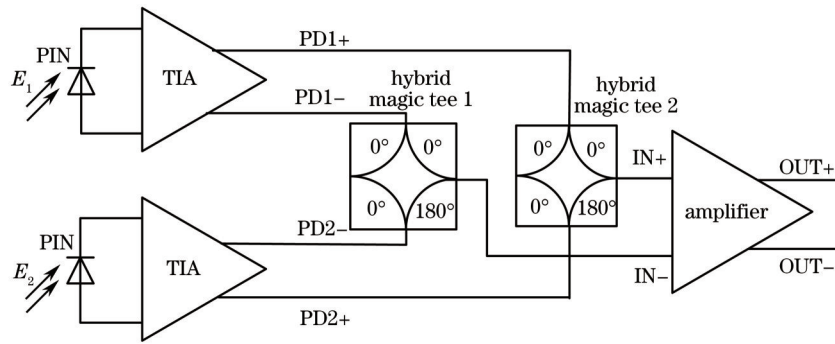


图 3 平衡探测器结构原理图

Fig.3 Block diagram of balanced detector

如图 3 所示,通过两个带 TIA 的 PIN 探测器分别加入相同的偏置,将一个 TIA 的差分输出的同向端 PD1+和另一个 TIA 的差分输出的反向端 PD2-经过混频魔 T 进行耦合,作为限幅放大器的同向端输入,另一个按照相反的方式也进入耦合器,作为限幅放大器的反向输入端。

$$\begin{cases} V_{PD1+} = \frac{1}{2} \cdot I_1 \cdot R \\ V_{PD1-} = -\frac{1}{2} \cdot I_1 \cdot R \end{cases}, \quad \begin{cases} V_{PD2+} = \frac{1}{2} \cdot I_2 \cdot R \\ V_{PD2-} = -\frac{1}{2} \cdot I_2 \cdot R \end{cases} \quad (17)$$

混频魔 T 是微波射频电路中的重要器件,能进行功率的分配与合成,被广泛应用于微波集成电路。混频魔 T 有四个端口,其中两路输入、两路输出。不计插入损耗,则各端口的输入输出如图 4 所示。

平衡探测器的接收端均采用某型号的 PIN 光敏芯片,两个光敏芯片和封装完成后 PD 的结构如图 5 所示,封装完成后的 PD 包括光敏芯片和 TIA,挑选出两个一致性较好的芯片,两个光敏芯片的参数如表 1 所示。

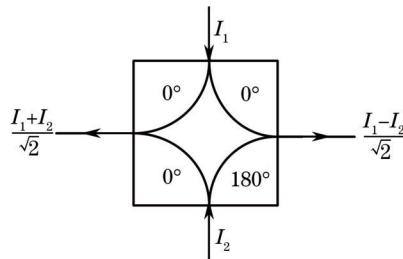


图 4 0°~180°混频魔 T

Fig.4 0°~180° microwave hybrid junction

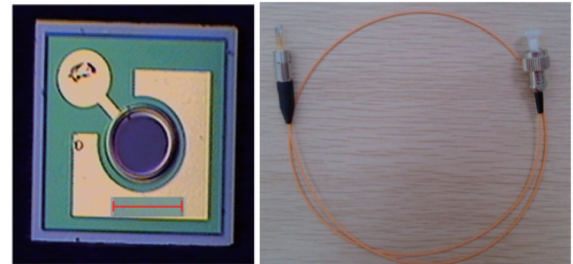


图 5 PIN 光敏芯片和封装完成后的 PD

Fig.5 Photosensitive chip of PIN and packed PD

表 1 光敏芯片参数表

Table 1 Parameter table of photosensitive chip

Photosensitive detector	Sensitivity /dBm	Responsibility in wavelength of 1550 nm
PD1	-25.4	0.81
PD2	-24.9	0.83

不考虑辅助电路失配性的情况下,探测器的响应度一致性为

$$k = 1 - \left(\frac{2|\alpha_1 - \alpha_2|}{\alpha_1 + \alpha_2} \right) \times 100\% = 97.5\%.$$

因此,符合系统对一致性的要求。

考虑散粒噪声、热噪声和激光器相对强度噪声,根据信噪比的定义,得到单管探测器的信噪比为^[13-15]

$$\left[\frac{S}{N} \right]_s = \frac{\frac{1}{8} \cdot \alpha G^2 R P_s P_L}{2G^2 e \alpha P_L R \cdot B + R_{IN} \times B \times (\alpha P_L)^2 + 4k_B T \cdot B/R} \quad (18)$$

同理可得出平衡探测器的信噪比为

$$\left[\frac{S}{N}\right]_B = \frac{\frac{1}{2} \cdot \alpha G^2 R P_s P_L}{2G^2 e \alpha P_L R \cdot B + R_{IN} \times B \times [(1-k)\alpha P_L]^2 + 4k_B T \cdot B/R} \quad (19)$$

式中 G 为放大电路的内部增益系数, B 为探测器的传输带宽。

根据(18)和(19)式可以得到平衡探测和单管探测随通信带宽变化时信噪比的分布。如图6所示。

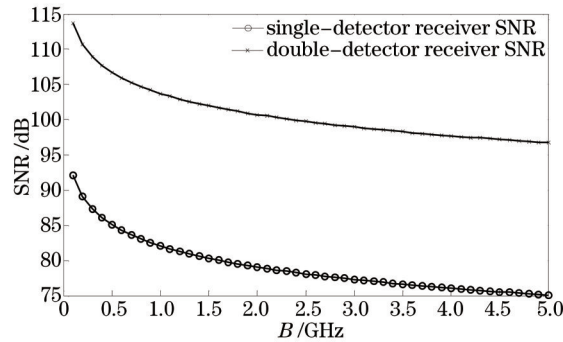


图6 单管探测和平衡探测信噪比对比图

Fig.6 Comparison chart of balanced and single tube detection SNR

由图6可以看出平衡式探测的信噪比比单管探测提高了大约20 dB,并且随着带宽的增加逐渐降低。

4 实验研究

首先根据平衡探测的理论推导和分析进行实验研究,为了测试平衡探测器的性能,根据现有的实验条件,搭建了测试系统,测试系统的框图如图7所示。

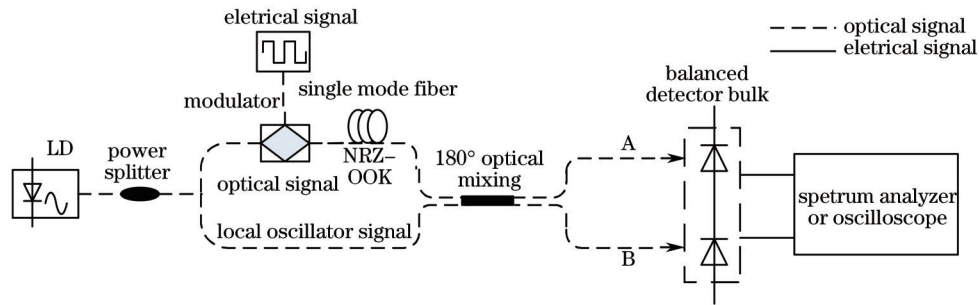


图7 测试原理图

Fig.7 Principle diagram of test

把1550 nm激光器的输出光,经过1:99的光分束器,分光比为1的激光束经过相位调制器后输出的光作为信号光,另一束则作为本振光,本振光和信号光的频率在理想情况下是相等的,本振光和信号光经过180°光混频器发生相干,最后输出两束频率相等但是有微小相位差的激光束,把两束激光(A和B)分别输入到平衡探测器的两端,输出端接示波器,经过测试,输入码型为NRZ-OOK、传输速率为2.5 Gb/s的信号输出眼图如图8所示,眼图显示,采用平衡探测器的系统通信性能良好。

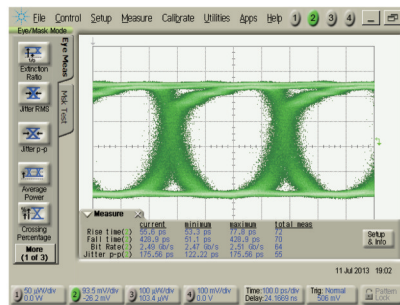


图8 双管输入测试眼图

Fig.8 Eye diagram of balanced detector

为了研究平衡探测器应用于相干光通信系统的优势,在平衡探测器输出端接频谱分析仪,通过分别测

试双管探测和单管探测的频谱输出进行信噪比分析。在通信速率为 2.5 Gb/s 的情况下,只把两束激光束其中的一端(A 端)输入平衡探测器其中的一端,测试结果如图 9 所示,此时把另一端(B 端)也输入平衡探测器的另一端,此时测试结果如图 10 所示,对比图 9 和图 10 可以看出,信号光的光功率得到了增强,噪声功率明显下降。通过进一步测试,测得信号光的光功率提高了大约 2.4 dB,同时噪声功率降低了 8 dB,平衡探测相对于单管探测的信噪比提高了 10 dB 左右。

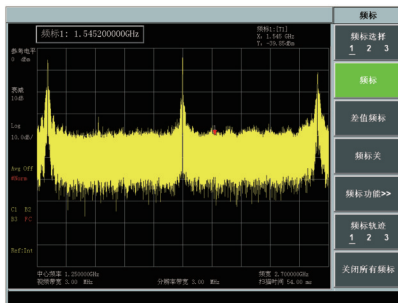


图9 单管输入下输出频谱图

Fig.9 Output spectrum of single tube

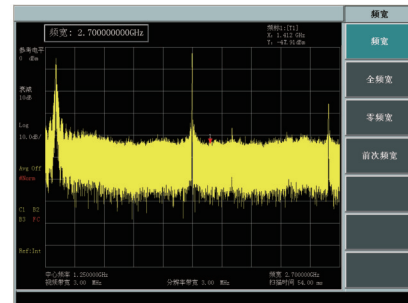


图10 双管输入下输出频谱图

Fig.10 Output spectrum of balanced detector

5 结 论

根据相干光通信的需要,设计了一种应用于相干光通信系统中的平衡探测器,并且研究了平衡探测器应用于相干光通信系统的优势。分析了平衡探测器对相干光通信系统灵敏度的改善,并且详细分析了儿种对相干光通信系统起主要影响作用的儿种噪声。分别给出了平衡探测和单管探测在相干光通信体制下的信噪比数学模型,仿真结果和实验数据均表明,使用平衡探测器可以提高系统的信噪比,把平衡探测器应用于相干光通信接收系统有一定的优势。

参 考 文 献

- 1 A Leven, N Kaneda, U Koc, *et al.*. Coherent receivers for practical optical communication systems[C]. Anaheim: Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007, OThK4.
- 2 J R Barry, E A Lee. Performance of coherent optical receivers[C]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(8): 1369-1394.
- 3 Wang Chunhui, Gao long, Li Yanchao, *et al.*. Investigation of balanced detection and receiver for coherent lidar[C]. SPIE, 2009, 7382: 73820I.
- 4 Xu Nan, Liu Liren, Wan Lingyu, *et al.*. Coherent detection of position errors in space laser coherent communications [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 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.
- 5 Pei Aihua, Zhang Shuren. Research on a balanced detector of coherent optical fiber communication system[J]. J Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1993, 16(4): 12-16.
裴爱华,张舒仁.相干光纤通信系统平衡探测器的研究[J].长春光学精密机械学院学报,1993,16(4):12-16.
- 6 I Bar-David, J Salz. On dual optical detection: Homodyne and transmitted-reference heterodyne reception[C]. IEEE Trans Commun, 1988, 36(12): 1309-1315.
- 7 Wu Yunyun, Li Xinyang, Rao Changhui. Effect of atmospheric turbulence aberration on the bit-error performance of homodyne binary phase shift keying coherent optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0606002.
武云云,李新阳,饶长辉.大气湍流像差对空间零差二进制相移键控相干光通信误码性能的影响[J].光学学报,2013,33(6):0606002.
- 8 Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Liu Liren. Effect of aberration on performance of the bit-error rate in an inter-satellite coherent optical communication receiving system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0106002.
刘宏展,纪越峰,刘立人.像差对星间相干光通信接收系统误码性能的影响[J].光学学报,2012,32(1):0106002.
- 9 Wu Feng, Yu Siyuan, Zhou Jie, *et al.*. Analysis of the stability of bidirectional beam tracking in inter-satellite optical communication[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1105003.
武凤,于思源,周洁,等.星间光通信链路双向光束稳定跟踪约束条件分析[J].中国激光,2013,40(11):1105003.

- 10 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Ya'nan, *et al.*. Reearch of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706017.
马小平, 孙建锋, 职亚楠, 等. DPSK调制/自差动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706017.
- 11 A Arvizu, F J Mendieta, R Chavez. Balanced photo-receiver for coherent optical communications[J]. *Instrumentation and Development*, 1998, 3(10): 3-14.
- 12 G L Abbas, V W S Chan, T K Yee. A dual-detector optical heterodyne receiver for local oscillator noise suppression[J]. *Lightwave Technol*, 1985, (5): 1110-1122.
- 13 Pang Yajun, Gao Long, Wang Chunhui. Analysis of IQ demodulation and signal noise ratio for 2 μm dual-balanced heterodyne detection[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0114001.
庞亚军, 高 龙, 王春晖. 2 μm 双平衡式外差探测 IQ解调与信噪比研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0114001.
- 14 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.
- 15 H P Yuen, V W S Chan. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. *Opt Lett*, 1983, 8(3): 177-179.