

文章编号: 1001-3806(2015)02-0182-03

## 用于高速微弱光信号的平衡探测技术研究

刘宏阳, 张燕革\*, 艾勇, 代永红, 陈晶  
(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

**摘要:** 长距离高速微弱光电探测技术在激光通信中应用广泛。为了在未被噪声淹没的环境中检测出所需的微弱信号, 采用平衡探测技术对单管探测和平衡探测进行对比, 并且对具体的平衡探测器电路进行了理论分析和仿真, 得出了在一致性系数较大( $k > 0.6$ )时平衡探测器的信噪比优于单管探测的结论。从理论上分析了单管和双管探测的最小可探测光功率。结果表明, 把平衡探测技术用于高速微弱光信号探测具有很大的优越性。

**关键词:** 探测器; 高速微弱光信号; 平衡探测; 信噪比

**中图分类号:** TN929.14      **文献标志码:** A      **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.007

## Research of balanced detection techniques for high speed weak optical signal

LIU Hongyang, ZHANG Yanke, AI Yong, DAI Yonghong, CHEN Jing  
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** Long-distance high speed weak photoelectric detection technology is widely used in laser communication. To detect the weak signal which is not buried in the noisy environment, balanced detection technology becomes more and more important. Single pipe coherent detection and balanced coherent detection were compared firstly. After theoretical analysis and numerical simulation, signal-to-noise ratio of the balanced detection was greatly superior to that of the single tube detection when the consistency coefficient was bigger than 0.6. The minimum detectable optical power of the single tube detection and balanced detection was analyzed. The results prove the superiority of balanced detection technology used in high speed weak optical signal detection.

**Key words:** detector; high speed weak optical signal; balanced detection; signal-to-noise ratio

### 引言

激光通信传输链路按照其接收端的探测解调方式, 可以分为相干与非相干两大类体制。与强度调制直接探测的调制解调(非相干)方式相比, 相干解调方式可以达到接近散粒噪声极限的性能, 系统的接收灵敏度得到了极大提升, 是功率受限的长距离链路技术中极具潜力的调制解调方式<sup>[1-2]</sup>。能接收双极性光信号、抑制或消除信号中共模噪声的平衡探测器, 是相干探测技术的核心器件之一。采用平衡探测的相干探测技术, 光接收机的灵敏度可达到量子噪声极限, 比通常的直接探测技术接收灵敏度高约 20dB<sup>[3-6]</sup>, 显著消除了接收机热噪声和电子电

路噪声对微弱光信号检测的影响<sup>[7]</sup>。在单探测器的射频(radio frequency, RF)系统中, 由于 3dB 耦合器混合本振光和信号光光场产生的中频信号, 其两个输出端口中仅一个被接收机使用, 输入功率的一半将被损失; 而使用平衡探测器的 RF 系统, 3dB 耦合器两个输出端口的光可以分别入射到串联的两个光电二极管上, 输入信号光功率完全被利用, 从而提高光的有效利用率。

平衡探测器主要用于空间光通信相干探测系统的接收机, 是由两个反平行偏置的光电二极管构成, 对两只光电二极管及其辅助电路的一致性要求非常高, 要想将信号质量的下降控制在可以忽略的范围, 两只管子响应度的差异必须尽可能小。目前美国 Thorlabs 公司和德国 U2T 公司已经生产出各种型号的平衡光电探测器, 但是国内尚未见报道。本文中从平衡探测技术的原理出发, 分析了平衡探测技术对微弱信号检测的优势, 并对具体的平衡探测器进

作者简介: 刘宏阳(1988-), 女, 硕士研究生, 现主要从事平衡探测器的研制以及相干光通信的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zyg@whu.edu.cn

收稿日期: 2014-06-24; 收到修改稿日期: 2014-07-04

行了理论分析和实验研究。

### 1 平衡探测技术对相干光通信信噪比的改善

设信号光用  $E_s(t)$  表示,本振光用  $E_{LO}(t)$  表示,当本振光与信号光完全满足相干条件时,光场发生叠加干涉,由光电探测器实现光电转换:

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

$$E_{LO}(t) = E_{LO} \exp[-i(\omega_{LO} t + \phi_{LO})] \quad (2)$$

单管光电探测器产生的电流(相干光通信中  $P_{LO} \gg P_s$ )为:

$$I_0(t) = \frac{\eta e}{h\nu} P_{LO} + \frac{\eta e}{h\nu} \sqrt{P_s P_{LO}} \times \cos(\omega_{IF} t + \phi_s - \phi_{LO}) \quad (3)$$

式中,  $E_s$  和  $E_{LO}$ ,  $\omega_s$  和  $\omega_{LO}$ ,  $\phi_s$  和  $\phi_{LO}$  分别为信号光和本振光的频率、振幅和相位,  $P_s$  和  $P_{LO}$  分别为信号光和本振光的光功率,  $\eta$  为光电探测器的量子效率,  $e$  为电荷量,  $h$  为普朗克常量,  $\nu$  为光频率;  $\omega_{IF}$  为探测器的传输带宽,是中频信号的频率,  $\omega_{IF} = \omega_s - \omega_{LO}$ 。平衡探测器输出的电流信号为:

$$I_1(t) - I_2(t) = 2 \frac{\eta e}{h\nu} \sqrt{P_s P_{LO}} \times \cos(\omega_{IF} + \phi_s - \phi_{LO}) \quad (4)$$

对比(3)式和(4)式可知:平衡探测器对共模信号起到抑制作用,并对有用信号的能量提高了3dB,降低了整个系统的噪声,提高了系统的信噪比。

## 2 平衡探测器设计实例

### 2.1 平衡探测器主要结构

平衡探测器主要用于相干光探测系统,要求其辅助电路及两只光电二极管的一致性系数要尽可能的高。用于相干探测的信号光束在混频过程中获得

增益,等效为一个无噪声的光放大器。如图1所示,通过两个带跨阻放大器(transimpedance amplifier, TIA)的PIN型探测器分别加入相同的偏置,将一个TIA的差分输出端和另一个TIA的差分输出端经过混频魔T进行耦合。

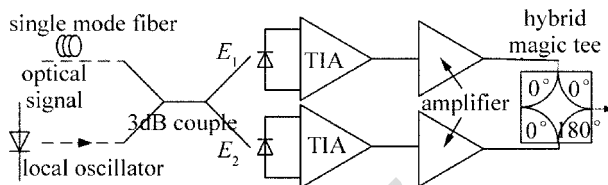


Fig. 1 Block diagram of balanced detection

混频魔T能进行功率的分配与合成是微波射频电路中的重要器件,因此被广泛应用于微波集成电路。光信号转换为电流信号后经过跨阻放大器放大后输出电压信号<sup>[8]</sup>,再经过一个差分放大器使信号电压放大到一定的数值。当外部干扰源同时影响差分放大电路的两端,经过混频魔T后,在差分输出端将相互抵消,因此平衡探测器具有良好的抗噪声性能。

### 2.2 平衡一致性对信噪比的影响

设探测器的响应度用  $\alpha$  来表示:

$$\alpha = \eta e / (h\nu) \quad (5)$$

平衡探测器由两个光电二极管接后级放大电路构成,光电二极管经光照后会输出相应的光电流,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。设两个光电二极管的响应度分别为  $\alpha_1, \alpha_2$ , 则平衡探测器的一致性系数  $k$  可用下式表示:

$$k = 1 - [2|\alpha_1 - \alpha_2| / (\alpha_1 + \alpha_2)] \times 100\% \quad (6)$$

考虑散粒噪声、热噪声和激光器相对强度噪声,根据信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)的定义,得到单管探测器的信噪比公式<sup>[9-10]</sup>:

$$R_{SNR,s} = \frac{\alpha^2 M^2 R P_s P_{LO}}{2M^2 e \alpha P_{LO} R \omega_{IF} + N_{RIN} \omega_{IF} (\alpha P_{LO})^2 + 4k_B T \omega_{IF} / R} \quad (7)$$

同理可得出平衡探测器的信噪比表达式为:

$$R_{SNR,b} = \frac{8\alpha^2 M^2 R P_s P_{LO}}{2M^2 e \alpha P_{LO} R \omega_{IF} + N_{RIN} \omega_{IF} [(1-k)\alpha P_{LO}]^2 + 4k_B T \omega_{IF} / R} \quad (8)$$

式中,  $M$  为放大电路的内部增益系数,  $k$  为平衡探测器的一致性系数,  $k_B$  是玻尔兹曼常数,  $R$  为跨阻值,第1项为散粒噪声项,第2项为相对强度噪声(relative intensity noise, RIN)的噪声项,第3项为热噪声项,  $N_{RIN}$  是 RIN 噪声常量。根据(7)式和(8)式

可以得到平衡探测和单管探测随一致性系数变化时,信噪比分布对比如图2所示。

由图2可以看出,平衡式探测的信噪比相对于单管探测大大提高了,并且随着一致性系数的增大逐渐变大。

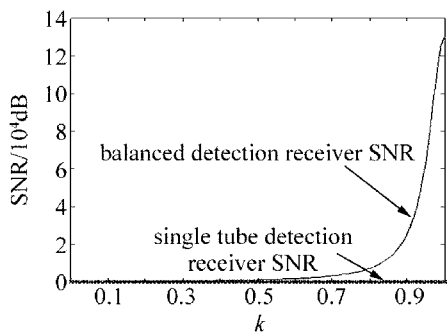


Fig. 2 SNR comparison between balanced detection and single tube detection

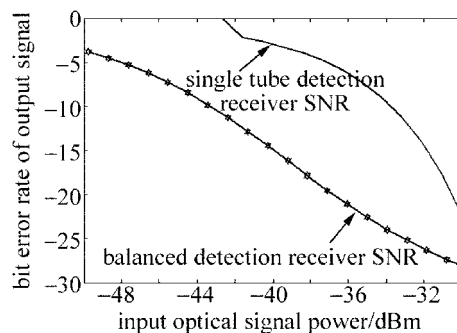


Fig. 4 Bit error rate of output signal vs. input optical signal power

### 3 仿真结果与讨论

下面讨论平衡探测一致性系数对通信眼图和误比特率的影响。

建立相干通信系统模型,对影响相干通信灵敏度的参量进行仿真,当一致性系数为 100%时,仿真眼图如图 3a 所示,此时误比特率优于  $10^{-9}$ ;当一致性系数为 90%时,误比特率优于  $10^{-5}$ ,仿真眼图如图 3b 所示,可以看出一致性系数对误比特率的影响较大。

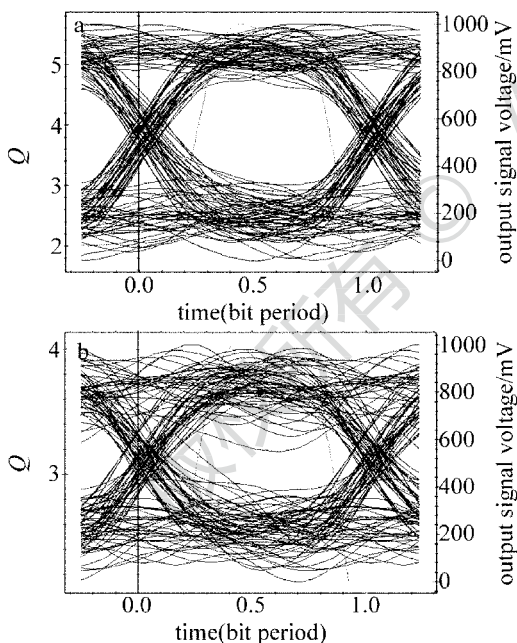


Fig. 3 a—eye diagram at consistency coefficient of 100% b—eye diagram at consistency coefficient of 90%

对平衡探测和单管探测的输入信号光功率和输出信号误比特率之间的关系进行仿真,在 2.5Gbit/s 通信速率的条件下,仿真结果如图 4 所示,随着输入光功率的减小,误比特率逐渐增加,单管探测在输入光功率小于  $-43\text{dBm}$  的条件下,无法通信,但是使用平衡探测的误比特率要远小于单管探测,因此验证了平衡探测应用于高速微弱信号探测的优越性。

### 4 结 论

分析了平衡探测技术对微弱信号检测的优势,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,从仿真分析可知,在平衡探测器一致性系数较小的情况下,单管和平衡探测的信噪比相差不大,但在一致性系数较大的情况下,平衡探测器一致性微小的变化会引起平衡探测器的信噪比巨大变化。建立了相干光通信的仿真模型,仿真结果表明,使用平衡探测技术可以降低系统的误比特率,实现微弱信号的检测。

#### 参 考 文 献

- [1] CHAN W S V. Free-space optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12):4750-4862.
- [2] SALZ J. Modulation and detection for coherent lightwave communications[J]. IEEE Communication Magazine, 1986, 24(6):38-49.
- [3] PAINCHAUD Y, POULIN M, MORIN M T. Performance of balanced detection in a coherent receiver[J]. Optics Express, 2009, 17(5):3659-3672.
- [4] BARRY J R, LEE E A. Performance of coherent optical receivers [J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(8):1369-1394.
- [5] XU N, LIU L R, LIU D A, et al. Technologies and recent progress of coherent optical communications in free space[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007(8):44-51 (in Chinese).
- [6] LE Y F, LI X X, JU A S. Design of phase comparator in a laser heterodyne interferometer[J]. Laser Technology, 2014, 38(1):119-123 (in Chinese).
- [7] ARVIZU A, MENDIETA F J, CHÁVEZ R. Balanced photoreceiver for coherent optical communications [J]. Instrumentation and Development, 1998, 3(10):3-14.
- [8] JIANG H, WU H J, WU Y F. A novel ultra-broadband photoelectric detection module[J]. Laser Technology, 2013, 37(1):16-19 (in Chinese).
- [9] PANG Y J, GAO L, WANG Ch H. Analysis of IQ demodulation and signal noise ratio for  $2\mu\text{m}$  dual-balanced heterodyne detection [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1):0114001 (in Chinese).
- [10] YUEN H P, CHAN V W S. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. Optics Letters, 1983, 8(3):177-179.