

文章编号 1004-924X(2017)10-2736-08

高速空间相干光平衡探测器结构优化

代永红¹, 梁赫西^{1,2*}, 武 强¹, 杨海峰³, 卢欧欣³

- (1. 武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072;
2. 湖北师范大学 教育信息与技术学院, 黄石 435002;
3. 中国电子科技集团公司第十研究所, 成都 610000)

摘要:分析了高速空间相干光平衡探测器的电路结构和噪声性能,明确了平衡探测器的关键技术参数与电路结构之间的关系。采用电阻取样型和双跨阻放大器(TIA)合成型结构设计了两种高速空间平衡光电探测器,并对其性能参数进行了实验验证。实验显示:两种高速空间相干光电探测器均可用于高速空间相干探测,且双 TIA 型电压合成型平衡探测器比电阻取样型平衡探测器具有更高的探测灵敏度和更好的抗噪声性能。在通信速率为 5 Gbps,误码率 10^{-8} 条件下电阻取样型平衡探测器实测最优探测灵敏度为 -33.51 dBm,双 TIA 型电压合成型平衡探测器实测最优灵敏度为 -43.4 dBm。对比 Discovery 公司通信速率为 5 Gbps 的平衡探测器产品,双 TIA 型电压合成型探测灵敏度提高了近 8 dB。结果表明高速空间相干光电探测器的结构研究为创建高灵敏的高速空间相干光通信系统提供了理论基础。

关键词:平衡探测器;相干光通信;本振光功率;结构优化;噪声功率

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2736

Structure optimization of high speed space coherent optical balance detectors

DAI Yong-hong¹, LIANG He-xi^{1,2*}, WU Qiang¹, YANG Hai-feng³, LU Ou-xin³

- (1. *Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*
 2. *School of Educational Information and Technology, Hubei Normal University, Huangshi 435002, China;*
 3. *The 10th Institute, Institute of China Electronics Technology Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: hexiliang@whu.edu.cn*

Abstract: The circuit structure and noise characteristics of a high-speed spatial coherent balanced detector were analyzed, and the dependence of key technical parameters on the circuit structure of the balanced detector was clarified. Two kinds of high-speed spatial balanced photoelectric detectors were designed by using resistance sampling and double TIA (Transimpedance Amplifier) synthesis, and their performance parameters were verified by experiments. The experiments indicate that both kinds of high-speed coherent detectors can be used for high-speed coherent detection, while the detection sensitivity and anti-noise performance from the double TIA voltage synthesis balanced detector are better than those from the resistance sampling type detector. When the communication rate is 5Gbps

收稿日期:2017-04-25;修订日期:2017-06-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11204220, No. 61273053);中国西南电子技术研究所技术创新基金资助项目(No. H15017)

and the bit error rate is 10^{-8} , the optimal detection sensitivity of resistance sampling type balanced detector is -33.51 dBm, and that of the double TIA synthesis balanced detector is -43.4 dBm, higher nearly 8dB than that of the Discovery's 5Gbps balanced detector. The research on the structure of high-speed spatial coherent photodetector provides a theoretical basis for the establishment of a high-sensitivity and high-speed spatial coherent optical communication system.

Key words: balanced detector; coherent optical communication ; local-oscillator power; structure optimization; noise power

1 引言

在空间相干弱光探测过程中,受到本振激光强度的波动及大气湍流的影响,采用单探测器会导致光电探测系统的噪声增加,信噪比降低,直接影响探测系统的性能^[1]。本振半导体激光器的相对强度噪声可导致探测器灵敏度下降 $2 \sim 40$ dB^[2-3];大气湍流的波动可导致探测器的灵敏度下降 $10 \sim 20$ dB^[4-5]。针对这一不足,研究者在相干检测系统中采用两个性能近似一致的光电探测二极管组成的光电平衡探测器来抑制噪声,改善系统信噪比,提高相干探测灵敏度^[6]。这里平衡探测器的电路结构及双管一致性直接决定了相干探测系统的性能^[7],因此国内外的研究者们在该领域进行了大量的工作。文献[8]采用电路调谐的结构方案来保证探测器双管的平衡一致性,但该种结构严重影响了探测器的通信带宽;文献[9]采用了无源器件魔 T 的信号合成结构保证了通信带宽,但其信号输出衰减严重;文献[10]采用差分跨阻放大器的信号合成结构保证了信号放大增益,但放大器工作带宽限制了系统的通信速率。

比较成熟的商业平衡探测器产品均采用了双管差分跨阻放大器结构,但多用于高速光纤通信领域,例如美国的 Discovery、Thorlabs 公司及德国 U2T 公司的系列产品^[11]。针对空间耦合平衡探测器,国内外厂商的产品多以低速通信为主,例如 Thorlabs 公司的 PDB210A 空间耦合探测器,其通信速率仅为 2 MHz。因此,通过研究空间耦合平衡探测器的结构特点,实现用于空间相干光通信领域的大面积、高速空间耦合平衡探测器意义重大。

本文设计并实现了电阻取样型和双跨阻放大器(Trans-impedance Amplifier, TIA)电压合成型两种结构的空

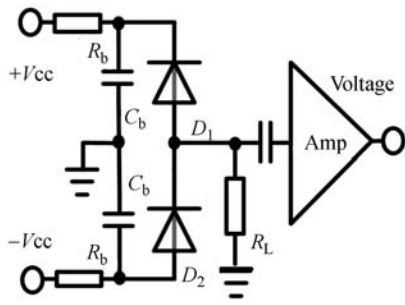
间耦合高速平衡探测器,分析了两种不同电路结构的平衡探测器噪声性能以及本振激光器相对强度噪声对两种探测器性能的影响。实验验证了两种不同电路结构的性能优势,其中电阻取样型平衡探测器在 5 Gb/s 的通信速率下,非相干探测器的灵敏度可达 -20 dBm,平衡相干探测器的灵敏度为 -33.51 dBm;双 TIA 电压合成型平衡探测器在 5 Gb/s 的通信速率下,非平衡探测器的灵敏度为 -21 dBm,平衡相干探测器的灵敏度为 -43.4 dBm。实验数据与理论分析结果基本一致,证明了高速平衡光电探测器的电路设计与性能分析可以为相干光通信系统的建立提供实现基础和理论指导。

2 平衡探测器结构分析

2.1 平衡探测器的电路结构

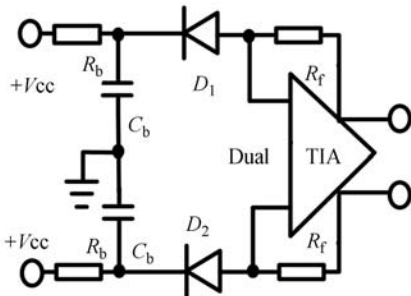
平衡探测器有以下几种结构,图 1(a)为电阻取样结构,通过双电源将性能近似一致的两个光电二极管串联,中间轴头点采用 50Ω 的电阻进行光生电流的采样,最后通过电压放大器输出;图 1(b)为双管差分 TIA (Dual TIA)结构,两个性能一致的光电二极管分别加到平衡的双端 TIA 的输入端,经过差分合成后形成电压输出;图 1(c)为电压合成结构,采用两个性能一致的单 TIA 分别输出,光信号相差 180° ,经过差分放大器后,信号合成输出。

电阻取样型结构采用电压放大器减少了 TIA 结构设计,使电路的设计与微波放大器相兼容,降低了射频放大器的设计难度;双管差分 TIA 型结构,使用电压并联反馈使放大器获得最佳的匹配阻抗,从而最好的噪声性能;单 TIA 的电压合成结构,可以在现有的单 TIA 的结构上,使用功率合成或者双输入运算放大器更容易实现高速空间耦合平衡探测器。



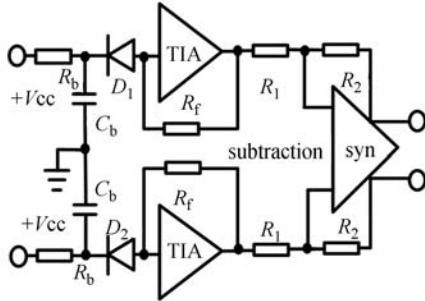
(a) 电阻取样结构

(a) Resistance sampling structure



(b) 双管差分跨阻放大器结构

(b) Dual TIA structure



(c) 电压合成结构

(c) Voltage synthesis structure

图 1 平衡探测器结构图

Fig. 1 Structure diagrams of balance detectors

2.2 不同电路结构的噪声性能分析

平衡探测器的噪声与探测器的接收灵敏度及系统误码率密切相关,是评价平衡探测器性能的关键参数。平衡探测器噪声来源主要有光电二极管的散粒噪声、电阻的热噪声、本振光信号的相对强度噪声(RIN)以及放大器的噪声。对于平衡探测器中的放大器而言,一般采用低噪声放大器,其引入的噪声可以被忽略不计。电路结构不同,输入端引入的参考噪声也不同。因此,可以通过分析输入参考噪声电流来评价电路结构的性能。

图 1(a)电阻取样型平衡探测器的噪声等效电路如图 2 所示。图中光电二极管 D_1 和 D_2 的漏电阻分别是 R_{d1} 和 R_{d2} ,光电二极管 D_1 和 D_2 的散粒噪声分别是 I_{sn1} 和 I_{sn2} ,本振激光在光电二极管 D_1 和 D_2 引入的相对强度噪声(RIN)分别为 I_{in1} 和 I_{in2} , R_L 是取样电阻, I_{jn} 是取样电阻 R_L 上的热噪声, I_{sn1} 、 I_{sn2} 、 I_{in1} 、 I_{in2} 、 I_{jn} 五个噪声电流,在电路关系上表现为并联, I_{in1} 、 I_{in2} 是同一激光器的输出经过分光后分别在两个探测器上形成的,彼此相关,其他噪声电流互不相干,且只有在均方意义上成立。

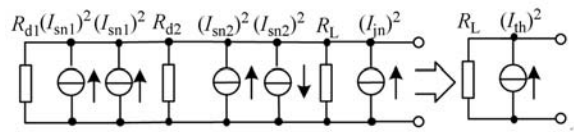


图 2 电阻取样型输入端噪声等效电路

Fig. 2 Input noise equivalent circuit diagram of sampling resistor type

其中,光电二极管光生电流和暗电流产生的散粒噪声可以用均方噪声电流表示为^[12]:

$$(I_{Sn1})^2 = 2q(I_{P1} + I_{d1})\Delta f_B, (I_{Sn2})^2 = 2q(I_{P2} + I_{d2})f_B, \quad (1)$$

式中 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑,是电子电量, I_{P1} 、 I_{P2} 分别是 D_1 和 D_2 的光生电流, I_{d1} 、 I_{d2} 分别是 D_1 和 D_2 的暗电流, Δf_B 为噪声测量带宽。

本振激光器引入的相对强度噪声可以用均方噪声电流表示为^[13]:

$$I_{in1}^2 = 2\alpha_{RIN}(\alpha P_{in1})^2 \Delta f_B, I_{in2}^2 = 2\alpha_{RIN}(\alpha P_{in2})f_B, \quad (2)$$

式(2)中, α 为光电二极管的响应度, α_{RIN} 为激光器的相对强度噪声系数。由于本振激光器经过分光后分别送至两个探测器,假定本振的分光比的不一致性和平衡探测器的不一致性共同导致接收相对强度噪声的不一致性总系数为 η , 则:

$$I_{in1}^2 = (1 - \eta)I_{in2}^2. \quad (3)$$

取样电阻上的热噪声用的热噪声电流的均方值为^[14]:

$$I_{jn}^2 = 4KT\Delta f_B/P_L. \quad (4)$$

合成的噪声电流用输入参考噪声电流来表示,其数值只在均方数值才有意义,于是:

$$(I_{th})^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (I_{Sn1} + I_{Sn2} - I_{in2} + I_{jn})^2 dt = I_{Sn1}^2 + I_{Sn2}^2 + \eta I_{in1}^2 + I_{jn}^2. \quad (5)$$

因此,电阻取样型电路结构的平衡探测器的

等效输入参考噪声电流可以表示为:

$$I_{th} = \sqrt{I_{Sn1}^2 + I_{Sn2}^2 + \eta I_{in1}^2 + I_{jn}^2}. \quad (6)$$

平衡双 TIA 型结构的平衡探测器噪声等效电路如图(3)所示,图中 R_{d1} 和 R_{d2} 分别是光电二极管 D_1 和 D_2 的漏电阻, I_{sn1} 和 I_{sn2} 分别是光电二极管 D_1 和 D_2 的散粒噪声,也可以用式(1)来表示, I_{in1} 和 I_{in2} 分别为本振激光在光电二极管 D_1 和 D_2 引入的 RIN 噪声,散粒噪声和 RIN 噪声并联后分别加载于双 TIA 的 2 个输入端。在平衡探测时,信号光电流是差分输入的, $R_{in}/2$ 是双 TIA 的两个输入端对应的输入电阻, I_{jn} 是输入电阻 $R_{in}/2$ 上的热噪声,从单端输入来看: I_{sn1} 、 I_{in1} 、 I_{jn} 3 个噪声电流并联; I_{sn2} 、 I_{in2} 、 I_{jn} 3 个噪声电流也并联。从双端输入来看:两个输入端口的噪声为串联关系,除了 I_{in1} 、 I_{in2} 相关外(同电阻取样,也可满足表达式(3)),其他所有的噪声电流也只有均方意义上成立,且互不相干。因此,两个端口看其等效的输入参考噪声电流可以分别表示为:

$$I_{th1}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (I_{sn1} + I_{in1} + I_{jn})^2 dt = I_{sn1}^2 + I_{in1}^2 + I_{jn}^2$$

$$I_{th2}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (I_{sn2} + I_{in2} + I_{jn})^2 dt = I_{sn2}^2 + I_{in2}^2 + I_{jn}^2 \quad (7)$$

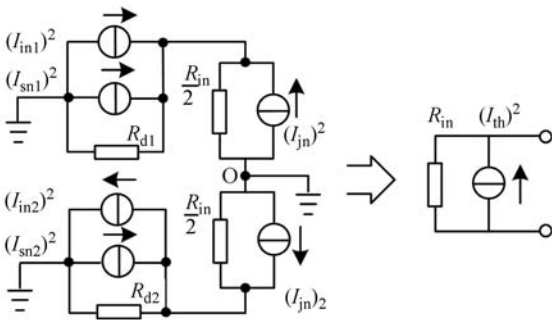


图 3 双 TIA 型噪声等效电路

Fig. 3 Input noise equivalent circuit diagram of sampling resistor type

两个输入端的参考噪声电压表现为串联关系,其数值只在均方意义上成立,故合成的输入参考噪声电流可以表示为:

$$I_{th} = \frac{\sqrt{V_{th}^2}}{R_{in}} = \frac{1}{R_{in}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\frac{1}{2} R_{in} I_{th1} - \frac{1}{2} R_{in} I_{th2})^2 dt = \frac{1}{2} \sqrt{I_{sn1}^2 + I_{sn2}^2 + \eta I_{in1}^2 + 2 I_{jn}^2}}. \quad (8)$$

从图 1 (c) 的结构分析可以看出,电压合成型平衡探测器是利用两个单 TIA 经过电压合成信

号得到平衡探测。如果忽略单 TIA 引入的噪声,对于差分输入信号而言,其噪声等效电路图也可以使用图 3 的双 TIA 等效电路来表示,不同之处在于输入等效电阻分别为单 TIA 对应的输入电阻,不是双 TIA 输入电阻的二分之一,其噪声特性与双 TIA 一致。

3 相干系统中平衡探测器的性能分析

探测灵敏度是评价平衡探测器性能的一个非常重要的指标,探测灵敏度表示在一定误码率(通常是 10^{-9}) 条件下,输入信号的最小探测功率。而平衡探测器在相干零差检测条件下的误码率(BER)与信噪比(SNR)表示为^[6]:

$$BER = \frac{1}{2} [\text{erfc}(Q_{max}/\sqrt{2})] = \frac{1}{2} [\text{erfc}(\sqrt{SNR})] = \frac{1}{2} [\text{erfc}(\sqrt{\frac{\alpha P_s}{I_{th}}})], \quad (9)$$

其中 A 为光电二极管响应度, P_s 为输入信号光功率。

图 1(a) 中电阻取样型平衡探测器的取样电阻选用 50Ω 匹配电阻,电压放大器可以采用低噪声宽带高线性放大器,放大倍数的设置以直接探测的灵敏度为探测下限。根据平衡探测器性能优势,在本振光功率较大的条件下要获得较大的中频信号增益;由于本振光的引入,使平衡探测器的输入参考噪声电平比直接探测的输入干扰噪声电平要大,因此,宽带放大器的最小增益设置必须满足将中频信号放大到给定输出信号的幅度范围的要求,为了使输出信号与数字电路相结合,图 1 (a) 中的电压放大器后面还必须连接限幅放大器。

图 4 左边给出了设计带宽为 5 GHz,混频效益为 100%,本地振荡激光器的 RIN 噪声系数为 -140 dB/Hz ,响应度为 0.9 A/W 的 PIN 光电二极管组成的电阻取样型平衡探测器。从图中可以看到,在不同本振光功率,总的不对称度为 2% 的条件下,输入参考噪声电流与输入信号功率之间的对应关系:输入参考噪声电流随着本振信号的增大明显增大,随输入中频信号的增大变化缓慢,但即使输入功率为 0,输入参考噪声电流也有一个不小的初值。图 4 右边给出了不同本振光功率的条件下,信噪比与输入功率之间的对应关系,由式(8)可得,在信噪比为 3.967 时,误码率为

10^{-8} , 可得电阻取样型平衡探测器在不同本振光功率时的灵敏度, 如表 1 所示。

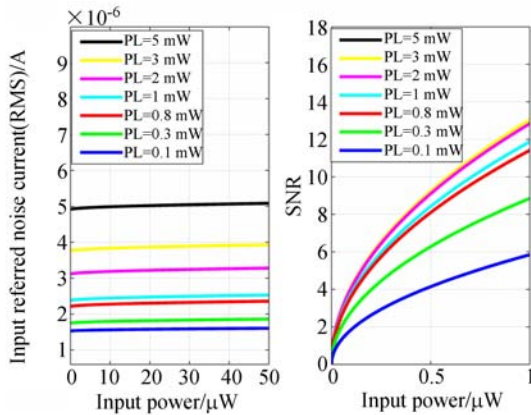


图 4 输入功率、输入参考噪声流、电流信噪比之间的关系

Fig. 4 Relationship among input power, reference noise current and SNR

可见, 本振激光器输入功率的大小对探测器的灵敏度有一定的影响, 本振光的功率越大, 其等效的输入参考噪声电流也越大, 混频增益也越大, 但两者的增加率不同。本振功率较小时, 混频增益导致信号增加率比输入参考噪声的增加率要高, 灵敏度提高; 本振信号较大时, 混频增益导致信号的增加率比输入参考噪声的增加率低, 灵敏度下降。因此, 在本振激光的 RIN 噪声系数一定的条件下, 通过改变本振激光器的输出功率的大小, 可以在一定范围内提高相干探测的灵敏度, 存在一个最优本振光功率将使得相干探测灵敏度取最大值。

表 1 电阻取样型平衡探测器灵敏度

Tab. 1 Parameters of sampling resistor type detection sensitivity

本振光功率 /mW	输入等效噪声 /μA	灵敏度 /μW
5	4.92	0.095(-40.22 dBm)
3	3.763	0.092(-40.36 dBm)
2	3.13	0.095(-40.22 dBm)
1	2.382	0.11(-39.59 dBm)
0.8	2.216	0.12(-39.21 dBm)
0.3	1.752	0.199(-37.01 dBm)
0.1	1.536	0.458(-33.39 dBm)

双管差分 TIA 型与电压合成型相干平衡探测器, 由于采用电压并联负反馈作为光电二极管

的负载并与其相连接。可以根据光电二极管的结电容以及电压并联负反馈的等效输入阻抗在满足通信的带宽条件下实现最佳匹配, 可以获得比较好的抗噪声性能。因此, 设计的关键问题在于实现 TIA 的反馈电阻与最佳匹配电阻之间的转换以及输出信号电压之间的合成问题。电压合成可以采用功率合成器和宽带运算放大器来实现信号的加减运算。同样, 为了与数字电路结合, 在经过合成后也相应地要使用限幅放大器。

图 5 左边与电阻取样型平衡探测器一样给出了设计带宽为 5 GHz, 混频效益为 100%, 本地振荡激光器的 RIN 噪声系数为 -140 dB/Hz, 响应度为 0.9 A/W 的 PIN 光电二极管组成的双 TIA 或者电压合成型平衡探测器。在不同本振光功率, 总的不对称度为 2% 的条件下, 输入参考噪声电流与输入信号功率之间的对应关系。图 4 右边给出了输入功率与信噪比之间的对应关系。表 2 给出了双 TIA 型或者电压合成型平衡探测器在 5GHz 带宽下的灵敏度。

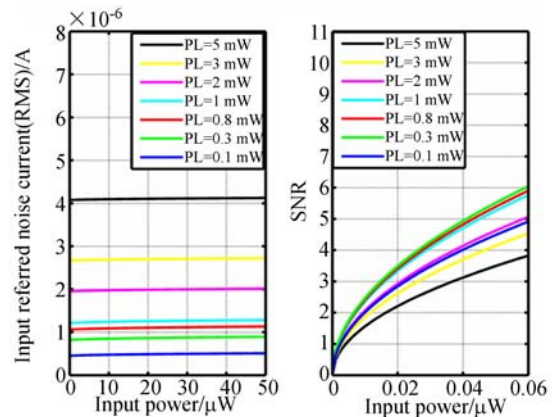


图 5 输入功率、输入参考噪声流、电流信噪比之间的关系

Fig. 5 Relationship among input power, reference noise and SNR

表 2 双 TIA 差分型平衡探测器灵敏度

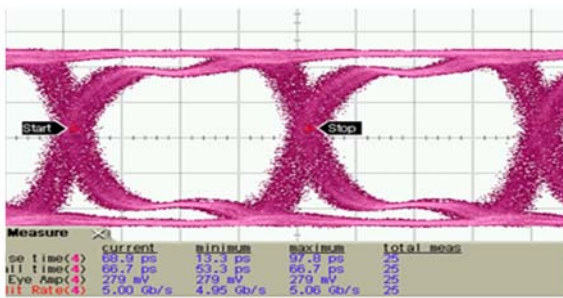
Tab. 2 Parameters of dual TIA type detection sensitivity

本振光功率 /mW	输入等效噪声 /μA	探测灵敏度 /μW
5	4.074	0.064(-41.94 dBm)
3	2.662	0.046(-43.37 dBm)
2	1.946	0.039(-44.09 dBm)
1	1.209	0.028(-45.53 dBm)
0.8	1.056	0.027(-45.68 dBm)
0.5	0.815	0.026(-45.85 dBm)
0.1	0.448	0.037(-44.32 dBm)

由表 2 可知,双 TIA 型平衡光电探测器与电阻取样型平衡探测器一样,输入本振光功率改变时,探测器的灵敏度也对应的改变,但由于采用了最佳匹配,以及两个输入端散弹噪声与 RIN 噪声串联的连接,减少了等效的输入参考噪声,使平衡探测器的灵敏度明显地提高。

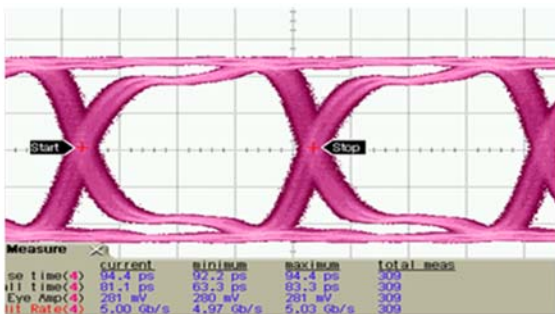
4 测试与验证

按照图(1)的电路结构,对电阻取样型、双 TIA 型和平衡探测器进行了设计实现,将两款平衡探测器在相干检测系统中进行了测试。平衡探测器单端输入的条件下,对探测器进行了功能测试,结果显示,平衡探测器在速率为 1.25 Gbps、2.5 Gbps、4.25 Gbps、5 Gbps、6 Gbps 和 10 Gbps 的条件下均可正常工作,性能良好。图 6 给出了两种结构平衡探测器输出信号的眼图(累积时间 3 min)。



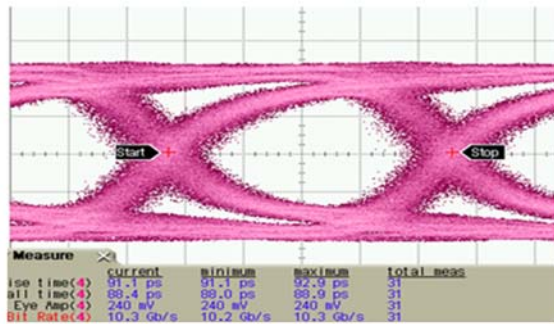
(a)电阻取样型 5 Gb/s 通信眼图

(a)Communication eye diagram of resistance sampling at vitesse of 5 Gb/s



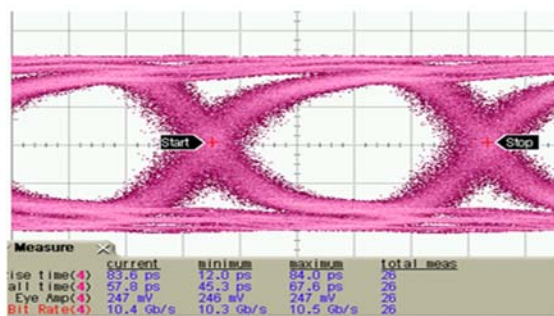
(b)双 TIA 电压合成型 5 Gb/s 通信眼图

(b)Communication eye diagram of dual TIA at vitesse of 5 Gb/s



(c)电阻取样型 10 Gb/s 通信眼图

(c)Communication eye diagram of resistance sampling at vitesse of 10 Gb/s



(d)双 TIA 电压合成型 10 Gb/s 通信眼图

(d)Communication eye diagram of dual TIA at vitesse of 10 Gb/s

图 6 输出眼图

Fig. 6 Output eye diagram

图 7 给出了实验室搭建的相干光通信测试平台。如图 7 所示,半导体激光器输出波长为 1 550 nm 的光波,经光功率分束器分按功率分束比 1 : 1 分为两路光信号,一路经保偏光纤模拟本振光,一路经光调制器进行相位调制、光功率衰减及叠加信道噪声模拟信号光,其中数字信号源给出的基带信号送至射频信号放大器放大 20 dB 后作为

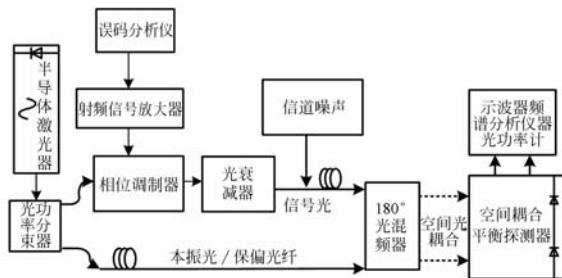


图 7 相干光通信测试平台框图

Fig. 7 Diagram of the coherent optical communications test platform

相位调制器的调制信号;两路光信号通过 1800 光混频器进行相干混频,其输出经空间耦合输入到平衡探测器探测光敏面上,平衡光电探测器的输出端分别误码分析仪的电输入端进行误码检测或接示波器及频谱分析仪等电学测试仪器。

在本振光功率不同条件下(0.05~1.5 mW),分别对电阻取样型和双 TIA 型平衡探测器进行了相干探测灵敏度测试,测试结果如表 3 所示。(通信速率 5 Gbps,误码率在 10^{-8} 、平衡一致性系数 98.5%、RIN 噪声系数 155 dB/Hz)。

表 3 实测相干探测灵敏度

Tab. 3 Measured coherent detection sensitivity

本振光功率 /mW	电阻取样型相干 探测灵敏度/dBm	双 TIA 型相干探测 灵敏度/dBm
1.5	-33.51	-37.9
1	-32.42	-39.4
0.5	-31.32	-41.7
0.3	-30.90	-42.8
0.15	-30.59	-43.4
0.08	-30.46	-42.8
0.05	-30.41	-41.9

测试结果表明:两种探测器实验测试的相干

探测灵敏度与理论分析近似一致,并且双 TIA 型平衡探测器的灵敏度略高于电阻取样型平衡探测器。在通信速率为 5 Gbps,误码率 10^{-8} 条件下电阻取样型平衡探测器实测最优探测灵敏度为 -33.51 dBm,接近文献[11]中 Discovery 公司通信速率 5 Gbps 条件下 -35 dBm 探测灵敏度,而双 TIA 电压合成型平衡探测器实测最优灵敏度为 -43.4 dBm 对比文献[11]中 Discovery 公司工作速率为 5 Gbps 的平衡探测器产品,探测灵敏度提高了近 8 dB。

5 结 论

本文对相干光通信中的平衡光电探测器的结构及噪声性能进行了分析,从理论上对电阻取样型和电压合成型结构的性能参数进行了比较,并以此为基础设计了这两款平衡探测器。验证实验发现,两款平衡探测器均能适用于相干与非相干的光电平衡探测器,可正常工作在 100 Mb/s~10 Gb/s 通信速率下,电压合成型比电阻取样型平衡探测器有更高的灵敏度和更好的抗噪声性能,但随着通信带宽进一步提高,这种优势随之减弱,两种类型的平衡探测器性能更加接近。

参考文献:

- [1] 许楠,刘立人,刘德安,等.自由空间相干光通信技术及发展[J].激光与光电子学进展,2007,44(8):44-51.
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, 44(8): 44-51. (in Chinese)
- [2] LI G F. Recent advances in coherent optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(2): 279-307.
- [3] 梁赫西,代永红,艾勇,等.空间光耦合平衡探测器设计与测试[J].红外与激光工程,2017,46(3):320002.
LIANG H X, DAI Y H, AI Y, et al.. Design and test of space optical coupling balance detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 320002. (in Chinese)
- [4] 郭力仁,胡以华,李政,等.本振功率对目标微动激光平衡外差探测的影响研究[J].红外与激光工程,2015,44(10):2933-2937.
GUO L R, HU Y H, LI ZH, et al.. Influence of Local Oscillate power on micro-motion balanced heterodyne detection for Lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2933-2937. (in Chinese)
- [5] BARRIOS R, DIOS F. Exponentiated Weibull model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through atmospheric turbulence[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 13-20.
- [6] 代永红,艾勇,肖伟,等.高速相干光通信平衡探测器研究[J].光子学报,2015,44(1):173-179.
DAI Y H, AI Y, XIAO W, et al.. The research of balance detector for high-speed coherence optical communications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 173-179. (in Chinese)
- [7] 梁赫西,代永红,艾勇,等.本振功率对空间平衡探测器相干探测灵敏度的影响[J].光学精密工

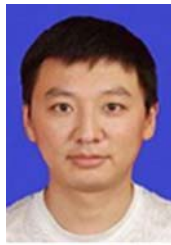
- 程, 2017, 25(2): 334-341.
- LIANG H X, DAI Y H, AI Y, *et al.*. Influence of local oscillator power on sensitivity of coherent detection of space balance detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 334-341. (in Chinese)
- [8] AFLATOUNI F, BAGHERI M, HASHEMI H. Design methodology and architectures to reduce the semiconductor laser phase noise using electrical feedforward schemes[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(11): 3290-3303.
- [9] CHO P S, HARSTON G, GREENBLATT A, *et al.*. Integrated optical coherent balanced receiver [C]. *Coherent Optical Technologies and Applications*. America: Optical Society of America, 2006.
- [10] JACOBSEN G, KAN J X, GARRETT I. Tuned front-end design for heterodyne optical receivers [J]. *Proceedings of Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(1): 105-114.
- [11] JOSHI A, BECKER D, WREE C, *et al.*. Coherent optical receiver system with balanced photodetection [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2006, 6243: 62430E.
- [12] WAN Q, WEI C. Research on technology of free-space coherent optical modulation and detection [C]. *Proceedings of 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*. XianNing, China: IEEE, 2011: 3475-3477.
- [13] 孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 空间相干光通信中本振光功率对信噪比的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 222002.
- KONG Y X, KE X ZH, YANG Y. Impact of local oscillator power on SNR in space coherent optical communications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 222002.
- [14] KAZOVSKY L G, TONGUZ O K. ASK and FSK coherent lightwave systems; a simplified approximate analysis [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(3): 338-352.

作者简介:



代永红(1969—),男,湖北天门人,讲师,博士,2015年于武汉大学获得博士学位,现为武汉大学电子信息学院讲师,主要研究方向为光通信系统。E-mail: 126959978@qq.com

通讯作者:



梁赫西(1982—),男,湖北黄石人 讲师,博士研究生,2011年于华中科技大学获得硕士学位。现为湖北师范大学信息学院讲师,主要研究方向为空间光通信技术。E-mail: hexiliang@whu.edu.cn