

## 空间光耦合平衡探测器设计与测试

梁赫西<sup>1,2</sup>, 代永红<sup>1</sup>, 艾勇<sup>1</sup>, 石倩芸<sup>1</sup>, 周凌林<sup>1</sup>, 单欣<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430072;  
2. 湖北师范大学教育信息与技术学院, 湖北黄石 435002)

**摘要:** 星地空间相干光通信中, 受大气湍流及空间光耦合效率因素的影响, 要实现高速率、高探测灵敏度的通信变得异常困难。针对星地空间相干光通信链路中空间光耦合较难的问题, 提出了采用大面积平衡探测器来提高探测灵敏度的方法。通过分析平衡探测技术的原理及平衡探测器结构, 设计了一种探测面直径为 100  $\mu\text{m}$ 、工作速率为 5 Gbps 的平衡探测器, 搭建了空间相干光通信测试平台。在 5 Gbps 通信速率下, 探测器的直接探测灵敏度达到  $-18.6$  dBm, 相干探测灵敏度达到  $-43.89$  dBm, 共模抑制比高于 38.5 dB。测试结果验证了该空间光耦合平衡探测器用于空间相干光通信的可行性。  
**关键词:** 平衡探测; 相干解调; 灵敏度; 共模抑制比

中图分类号: TN247 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0320002

## Design and test of space optical coupling balance detector

Liang Hexi<sup>1,2</sup>, Dai Yonghong<sup>1</sup>, Ai Yong<sup>1</sup>, Shi Qianyun<sup>1</sup>, Zhou Linglin<sup>1</sup>, Shan Xin<sup>1</sup>

(1. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;  
2. School of Educational Information and Technology, Hubei Normal University, Huangshi 435002, China)

**Abstract:** Affected by the factor of atmospheric turbulence and spatial optical coupling efficiency in the satellite-ground coherent optical, it's extraordinarily difficult to achieve high data rate and high detection sensitivity of communication. In view of the difficulty of spatial optical coupling in the satellite-ground coherent optical communication link, the method to improve the detection sensitivity by using large area balance detector was proposed. Based on the analysis of the balance detection technology's principle and structure, the balance detector with a diameter of 100  $\mu\text{m}$  and a working speed of 5 Gbps was designed, and the simulation test platform of the spatial coherent optical communication was built. Under the communication rate of 5 Gbps, the direct detection sensitivity of the detector is  $-18.6$  dBm, the coherent detection sensitivity is  $-43.89$  dBm, and the common mode rejection ratio is above 38.5 dB. The test results verify the feasibility of the spatial coupling balance detector for coherent optical communication.

**Key words:** balance detection; coherent demodulation; sensitivity; common mode rejection ratio

收稿日期: 2016-07-05; 修订日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61273053, 11204220)

作者简介: 梁赫西(1982-), 男, 博士生, 主要从事信号处理与光通信方面的研究。Email: hexiliang@whu.edu.cn

通讯简介: 代永红(1969-), 男, 讲师, 博士, 主要从事信号处理与光通信方面的研究。Email: yhdai@whu.edu.cn

## 0 引言

在高速空间相干光通信应用领域中,平衡探测器是相干光通信系统的核心器件之一<sup>[1-2]</sup>。采用平衡探测可以有效地抑制甚至消除共模噪声,其相干探测灵敏度接近量子噪声极限,比相同条件下的直接探测灵敏度高 10~25 dB,显著消除了接收机热噪声和电路噪声对微弱光信号探测的影响<sup>[3]</sup>。近几十年来,国内外学者对空间光相干探测技术展开了深入研究。2008 年,德国 TerraSAR-X 卫星完成了数百次双向卫星链路、通信速率为 5.625 Gbps 的相干通信实验<sup>[4-5]</sup>。2014 年,美国成功完成了上行链路通信速率 34 Mbps、下行链路通信速率 622 Mbps 的地月间空间相干光通信实验<sup>[6-7]</sup>。

目前,国内外商业上比较成熟的平衡探测器产品普遍采用了双管差分 TIA 结构、光纤耦合的方式。产品主要用于工作速率 10 Gbps 以上、工作波长覆盖 1 550 nm 的高速数字光纤通信领域<sup>[8-9]</sup>。最常见的空间光耦合方式是采用单模光纤将激光耦合到探测器的探测光敏面上,这对探测器光面敏直径没有太高要求。但单模光纤的芯径较小,以及大气湍流引起的强度闪烁、光斑抖动等现象严重影响了空间光耦合到 PD(Photo-Detector)光敏面上的耦合效率,单模光纤耦合损耗通常在 3~8 dBm,从而不利于提高探测灵敏度。通过将空间光直接耦合到平衡探测器的探测光敏面上会进一步提高探测系统的探测灵敏度,但要尽可能地增大平衡探测器探测光敏面的面积,以克服大气湍流效应带来的光斑抖动的影响。商业市场上主流产品有德国 U2T 公司的 BPRV213A 平衡探测器,工作速率 43Gbps,探测直径 35 μm;美国 Discovery 公司的 DSC-R412 平衡探测器工作速率 20 Gbps,探测直径 45 μm;而 Thorlabs 公司的 PDB480C 平衡探测器探测直径达到了 75 μm,但其工作速率只有 1.6 Gbps。Thorlabs 公司推出了空间光耦合封装的平衡探测器 PDB210A,其探测直径为 3 mm,但通信速率只有 2 Mbps。遗憾的是平衡探测器探测光敏面直径在 100 μm 以上、通信速率在 5 Gbps 以上的大面积高速空间光耦合平衡探测器产品目前还未见报道。文中通过分析平衡探测器的原理,设计了一种探测面直径为 100 μm、工作速率为 5 Gbps 的空间耦

合平衡探测器,搭建了空间相干光通信模拟实验系统,并对探测器关键参数进行了实验分析。

## 1 平衡探测器原理及结构

### 1.1 相干平衡探测技术原理

平衡探测技术通过对光电探测器的两路接收信号进行相减,实现了差模信号放大与共模噪声抑制,其原理如图 1 所示。图 1 中两束相位相反的光波  $E_1$ ,  $E_2$  由信号光  $E_s$  与本振光  $E_l$  经过 180° 光混频器相干混频产生;两个光电探测器完成光电转换输出的光电流分别为  $I_1$  和  $I_2$ ,经差分跨阻放大器放大后输出中频信号  $V_{out}$ 。

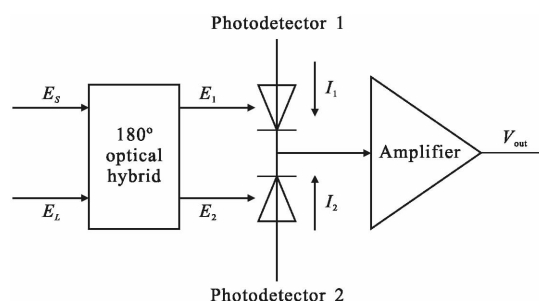


图 1 相干平衡探测原理图

Fig.1 Principle diagram of coherent balance detection

信号光  $E_s(t)$  和本振光  $E_l(t)$  的光场分布为:

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

$$E_l(t) = A_l \exp[-i(\omega_l t + \varphi_l)] \quad (2)$$

式中:  $\omega_s$ 、 $\varphi_s$ 、 $A_s$  和  $\omega_l$ 、 $\varphi_l$ 、 $A_l$  分别表示信号光及本振光的角频率、相位和振幅。

假设 180° 光混频器为理想器件,即无损耗、线性可逆对称耦合器。信号光与本振光通过相干混频后则有:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \exp(j\theta) \begin{bmatrix} \sqrt{1-\varepsilon} & \sqrt{\varepsilon} e^{j\pi/2} \\ \sqrt{\varepsilon} e^{j\pi/2} & \sqrt{1-\varepsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_s \\ A_l \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\theta$  表示 180° 光混频器的反射相移;  $\varepsilon$  表示 2×2 混频器的分束比。则光电探测器光电转换产生的光生电流可表示为:

$$I_1 = \frac{\eta_1 c}{h\nu} \{ (1-\varepsilon) A_s^2 + \varepsilon A_l^2 - 2\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)} A_s A_l \sin[\omega_{IF} t + \Delta\varphi] \} + n_1(t) \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{\eta_2 c}{h\nu} \{ (1-\varepsilon) A_l^2 + \varepsilon A_s^2 + 2\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)} A_s A_l \sin[\omega_{IF} t + \Delta\varphi] \} + n_2(t) \quad (5)$$

式中： $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为两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； $\omega_{IF}=\omega_s-\omega_l$  为中频信号的频率； $\Delta\varphi=\varphi_s-\varphi_l$  为中频信号的相位。

平衡探测器输出的响应电流为<sup>[10]</sup>：

$$I_{\text{balanced}} = \frac{e}{h\nu} \{ [(1-\varepsilon)\eta_1 - \varepsilon\eta_2] A_s^2 + [\varepsilon\eta_1 - (1-\varepsilon)\eta_2] A_l^2 \} - \{ 2(\eta_1 + \eta_2) \sqrt{1-\varepsilon} \sqrt{\varepsilon} A_s A_l \sin[\omega_{IF}t + \Delta\varphi] \} + n_1(t) - n_2(t) \quad (6)$$

当分束比  $\varepsilon=0.5$  时，两光电管具有相同的量子效率时，输出中频电流最大，依据信噪比定义单管相干探测时其信噪比可表示为：

$$S_{\text{single}} = \frac{P_{\text{single}}}{P_{\text{excess}} + P_{\text{shot}} + P_{\text{thermal}}} = \frac{(e\eta/h\nu)^2 P_s P_l R_{\text{eq}}}{R_{\text{IN}} B (\alpha P_l) 2R_{\text{eq}} + 2eG^2 [(e\eta/h\nu) P_l + I_d] BR_{\text{eq}} + 4KTB} \quad (7)$$

考虑到两只光电二极管的响应度差异，引入平衡一致性系数：

$$\alpha_k = \left( 1 - \frac{2|\eta_1 - \eta_2|}{\eta_1 + \eta_2} \right) \times 100\% \quad (8)$$

则平衡探测信噪比可表示为<sup>[9,11]</sup>：

$$S_{\text{balance}} = \frac{P_{\text{balance}}}{P_{\text{excess}} + P_{\text{shot}} + P_{\text{thermal}}} = \frac{8/(3-\alpha_k)(e\eta/h\nu)^2 P_s P_l R_{\text{eq}}}{R_{\text{IN}}(1-\alpha_k)B(e\eta/h\nu)P_l + 2eG^2 [(e\eta/h\nu)P_l + I_d]BR_{\text{eq}} + 4KTB} \quad (9)$$

图 2 给出了相对强度噪声  $R_{\text{IN}}=-140$  dB/Hz，本振光功率为 10 mW 时，不同平衡一致性系数下平衡探测与单管探测的信噪比分布。可见平衡探测相对于单管探测信噪比提高了 20 dB 以上，平衡探测的信噪比随着一致性系数的增大而提高，要保证 5 Gbps 工作速率下的信噪比，必须保证一致性系数达到 95% 以上。

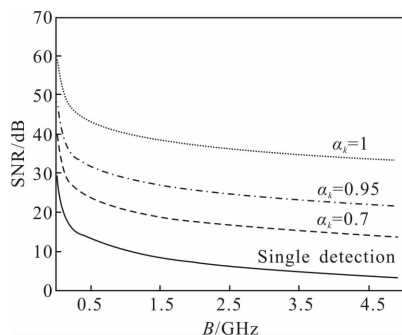


图 2 平衡探测与单管探测信噪比对比图

Fig.2 Comparison chart of balanced & single detection SNR

## 1.2 平衡探测器结构

平衡探测器被广泛应用于相干光通信探测系统中，设计时要求两只光电探测器响应度、响应时间等特性尽量一致，光束在相干探测混频过程中的增益可以等效为一个无噪声光放大器<sup>[12]</sup>。如图 3 所示，两个光电探测管以相同的偏置分别接两个跨组放大器 (Trans-impedance Amplifier, TIA), TIA 的差分输出端  $PD_1^+$  与另一个 TIA 的互补输出端  $PD_2^-$  经过差分合成放大器进行耦合，作为限幅放大器的输入端；Monitor\_1 及 Monitor\_2 分别为两光电探测二极管光功率监控端口，用于监控调整两输入端光路耦合效率，解决分光系统引入的光路不一致性造成信噪比的降低。

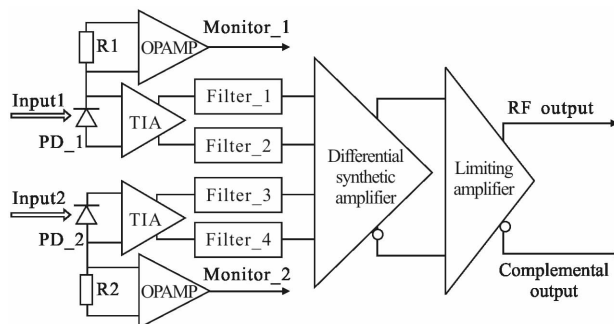


图 3 平衡探测器结构图

Fig.3 Structure diagram of balanced detector

在图 3 所示的平衡探测系统中，光电二极管是探测器的核心器件，光电管的选择及性能参数直接决定了系统的灵敏度及工作速率。工程设计中常采用雪崩二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 和 PIN 光电二极管。雪崩二极管产生光生电流时的雪崩倍增效应会引入较强的附加噪声，不利于提高平衡探测系统的灵敏度。相比而言，PIN 管虽然探测灵敏度不及 APD，但其结构简单、结电容小、引入附加噪声小、具有较高的响应带宽等优点，更适合应用于低噪声平衡探测系统中<sup>[13]</sup>。目前，商用市场上工作速率在 5 Gbps 以上，响应波长覆盖 1 550 nm 的 InGaAs PIN 光电二极管最大有效探测光敏面直径为 60  $\mu\text{m}$ ，难以满足高速空间光耦合平衡探测器的性能要求。文中设计采用了实验室和某研究所自主研发的大面积 PIN 光敏芯片，其性能参数如表 1 所示，PIN 光敏芯片实物如图 4 所示，PIN 光敏芯片经高频 TO 封装后其相对频率响应度测试结果如图 5 所示。从图 5 可

以看出封装后的 PIN 光敏二极管频率响应度在带宽在 4 GHz 范围内较为平坦, 带内波动在 0.6 dB 范围以内, 在 5 Gbps 通信速率下可以正常工作。

表 1 光敏芯片参数一览表

Tab.1 Parameter table of photosensitive chip

PIN parameters	Typical value
Photoelectric detector material	InGaAs
Operating wavelength/nm	1 270-1 610
Responsivity in wavelength of 1550nm/A·W <sup>-1</sup>	0.85
Sensitivity/dBm	-21
Photosensitivity surface size/μm	100
Responsivity bandwidth/GHz	5
Diode junction capacitance/pF	0.4
Dark current/nA	0.15

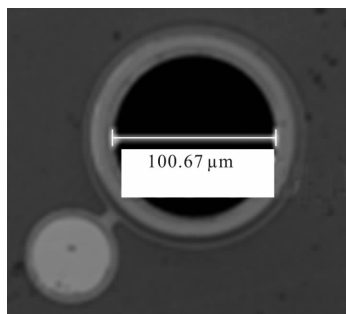


图 4 PIN 光敏芯片

Fig.4 Photosensitive chip of PIN

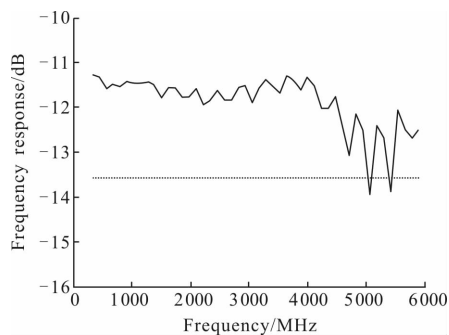


图 5 光电二极管相对频率响应测试图

Fig.5 Photoelectric diode relative frequency response test

表 1 中 PIN 管光电响应度及灵敏度数据均为典型值, 工程中选用了光敏面直径为 100 μm, 响应度

分别为(单位 A/W) $\alpha_1=0.83, \alpha_2=0.85$  的两只光电二极管, 在忽略电路适配性的情况下, 可以得到平衡探测器响应度的一致性为 97.6%, 达到了一致性的要求。

光电探测器是一个电流器件, 光电转换后输出光生电流信号, 其等效为电流源  $I_s$ 、电容  $C_j$  及电阻  $R_d$  并联电路模型, 电路的 -3 dB 带宽为<sup>[14]</sup>:

$$f_c = \frac{(R_T + R_d)}{2\pi R_T R_d C_j} = \frac{1}{2\pi R C_j} \quad (10)$$

式中:  $C_j$  为光电探测管等效结电容;  $R$  为等效负载电阻。

可见通过减小负载阻抗的形式可以提高电路带宽, 但其噪声性能会变差, 会降低输出信号的信噪比, 从而影响系统的灵敏度。一种广泛应用的方案是在放大器输入端和输出端之间跨接反馈电阻, 形成电压并联负反馈放大器。该反馈电阻使放大器的输入等效电阻得到了有效降低, 同时对放大器的相位也有一定的补偿, 使系统获得稳定的电路增益, 频带得到展宽。

## 2 空间光耦合分析

空间相干光探测系统中, 信号光与本振光混频后通过薄透镜聚焦在光电探测器 PD 的光敏面上, 其模型如图 6 所示<sup>[15]</sup>。

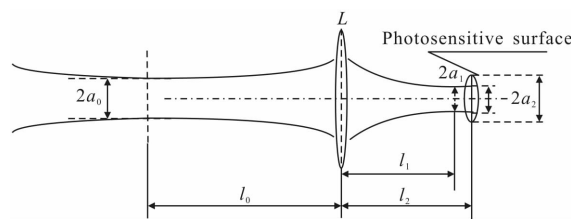


图 6 透镜对高斯光束的变换

Fig.6 Transform of Gaussian beams through lens

图中,  $a_0$  为空间入射光束的束腰半径;  $a_1$  为汇聚光束的束腰半径;  $a_2$  为 PD 光敏面上的光斑半径;  $r_0$  为 PD 光敏面半径;  $l_0$  为薄透镜到空间入射光束腰位置的距离;  $l_1$  为薄透镜到汇聚光束腰位置的距离;  $l_2$  为薄透镜到 PD 光敏面的距离。

空间信号光混频后经薄透镜输出汇聚光束在 PD 上的光强分布为:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{a_2^2}\right) \quad (11)$$



式中： $I_0$  为出射光束位于中心的光强； $r$  为与光斑中心的距离。根据薄透镜对高斯光束的变换规律，可以得到薄透镜入射光束的束腰半径  $a_0$ 、束腰位置  $l_0$ ，汇聚光束的束腰半径  $a_1$ 、束腰位置  $l_1$  之间的关系为：

$$a_1^2 = \frac{a_0^2 f^2}{(l_0 - f)^2 + (\pi a_0^2 / \lambda)^2} \quad (12)$$

$$l_1 = f + \frac{(l_0 - f) f^2}{(l_0 - f)^2 + (\pi a_0^2 / \lambda)^2} \quad (13)$$

式中： $f$  为薄透镜的焦距； $\lambda$  为光束的波长。则 PD 光敏面上高斯光斑的半径为：

$$\eta = \eta_1 \left[ 1 - \exp \left\{ - \frac{2r_0^2}{\frac{a_0^2 f^2}{(l_0 - f)^2 + (\pi a_0^2 / \lambda)^2} + \frac{\lambda^2}{\pi} \left[ l_2 - f - \frac{(l_0 - f) f^2}{(l_0 - f)^2 + (\pi a_0^2 / \lambda)^2} \right]^2} \right\} \right] \quad (16)$$

式中：给出了  $l_0$ 、 $l_2$  与探测效率  $\eta$  之间的关系，其中  $\eta_1$  为薄透镜的透过率。

### 3 实验研究

设计实现了探测面直径为  $100 \mu\text{m}$ ，通信速率为  $5 \text{ Gbps}$  空间光耦合平衡探测器，实物如图 7 所示。

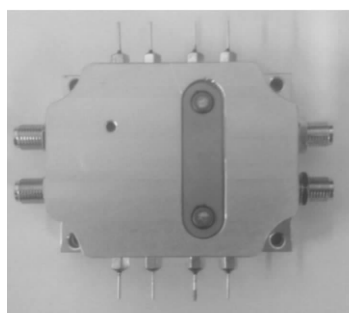


图 7 平衡探测器

Fig.7 Balanced detector

平衡探测器在相干光通信领域应用广泛。图 8 给出了实验室搭建的相干光通信测试平台，主要由窄带半导体激光器 (Semiconductor laser)、光功率分束器 (Optical splitter)、数字信号源 (Digital source) 相位调制器 (Optical modulator)、射频信号放大器 (RF\_amplifier)、 $180^\circ$  光混频器 (Spatial  $180^\circ$  optical hybrid)、平衡光电探测器 (Balance photodetectors)、保偏光纤 (PMF, Polarization maintaining optical fiber)、示波器 (Oscilloscope) 及频谱分析仪 (Frequency analyser) 等测试仪器组成。相干测试实验时，半导体

$$a_2 = a_1 \sqrt{1 + \left[ \frac{\lambda(l_2 - l_1)}{\pi a_1^2} \right]^2} \quad (14)$$

当 PD 光敏面为半径  $r$  的圆形时，PD 光敏面上高斯光斑的有效探测效率为：

$$\eta_0 = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{a_2^2}\right) r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{a_2^2}\right) r dr d\theta} = 1 - \exp\left(-\frac{2r_0^2}{a_2^2}\right) \quad (15)$$

综合公式 (12)、(13)、(14)、(15) 可以得到探测效率表达式为：

激光器输出波长为  $1550 \text{ nm}$  的光波，经光功率分束器分为等功率的两路光信号，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  $20 \text{ dB}$  后作为相位调制器的调制信号；两路光信号通过  $180^\circ$  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接示波器及频谱分析仪等电学测试仪器。

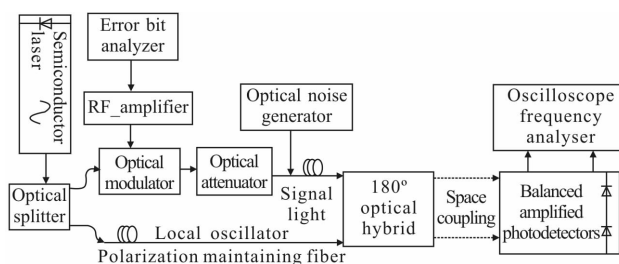


图 8 相干光通信测试平台框图

Fig.8 Diagram of the coherent optical communications test platform

#### 3.1 平衡探测器参数测试

将误码分析仪的电输出口作为信号源，通过空间光耦合系统耦合到平衡探测器的单臂输入端，调节不同的频率，用示波器观察伪随机序列实时波形及眼图。从图 9 可以看出， $5 \text{ Gbps}$  的通信速率下，两路互补输出的实时信号边沿陡峭，纹波抑制良好，眼图端正、轮廓清晰，波形无失真，具有较好的通信质量。互补输出信号的幅度平均值为  $387.4 \text{ mV}$ ，最大上

升和下降时间分别为 60.90 ps 和 62.86 ps, 输出幅度随输入信号的频率变化关系不大, 在 1 Mbps~5 Gbps 的通信速率上基本保持一致。

平衡探测器探测灵敏度是衡量其性能的关键参数, 参考文献[16]给出了 5 Gbps 通信速率下, 在光电二极管的光电响应度  $\alpha=0.85$  A/W, 结电容  $C=0.4$  pF 条件下, 其理论极限灵敏度为  $-22.3\sim-23.6$  dBm。实验测试结果显示: 设计的空间平衡探测系统在 5 Gbps 通信速率,  $10^{-9}$  误码率条件下, 其直接探测灵敏度为  $-18.68$  dBm, 与理论极限灵敏度基本一致。造成约 3 dB 的损耗, 这主要由时钟抖动、宽带放大器引入的噪声及空间耦合效率带来的灵敏度恶化。

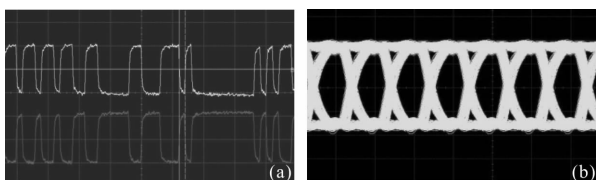


图 9 5 Gbps 速率下实时信号(a)及眼图(b)

Fig.9 5 Gbps rate real-time signal (a) and eye diagram (b)

### 3.2 相干测试

根据图 8 的相干光通信测试系统, 对空间平衡探测器进行了相干测试。图 10(a)为相干光通信系统在伪随机序列脉冲输入时, 5 Gbps 通信速率下探测器及误码分析仪实时输出的波形, 图中上半部分是平衡探测器输出, 下半部分是误码分析仪输出。图 10(b)为输出信号眼图。测试结果显示, 在 5 Gbps 通信速率下, 平衡探测器相干解调输出波形良好, 眼图清晰, 取得了良好的通信效果; 在  $10^{-9}$  误码率条件下, 平衡探测器相干探测灵敏度为  $-43.89$  dBm, 较直接探测灵敏度  $-18.68$  dBm 获得了约 25 dB 的相干增益。

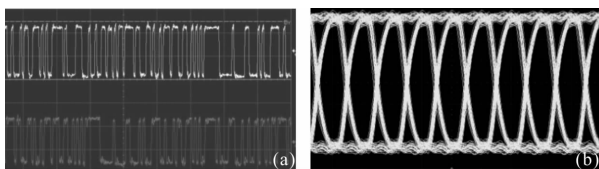
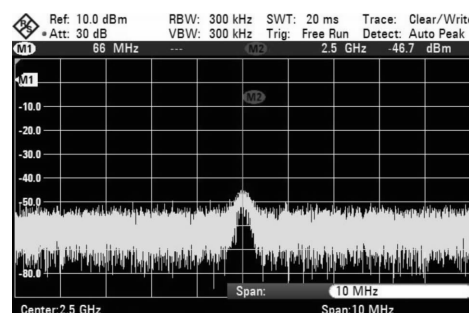


图 10 5 Gbps 速率下相干通信实时解调信号和眼图

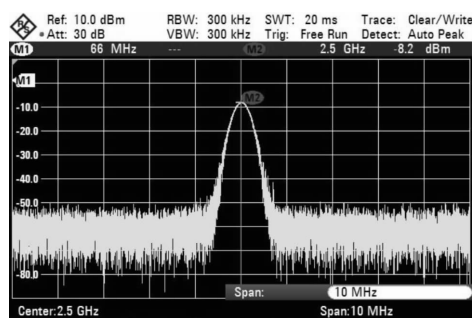
Fig.10 5 Gbps coherent communication real-time demodulation signal and eye diagram

平衡探测器的一致性常常用共模抑制比来衡量。图 11(a)、(b)分别给出了双端输入差模信号与双端输入共模信号的频谱, 测试结果显示在 5 Gbps 通信速率下, 双端输入差模信号在中心频点上(2.5 GHz)

的频谱幅度为  $-8.2$  dBm, 同频点共模信号的频谱幅度为  $-46.7$  dBm, 平衡探测器共模抑制比高于 38.5 dB, 反映了探测器良好的平衡一致性。



(a)



(b)

图 11 相干探测频谱

Fig.11 Coherent detection spectrum

## 4 结论

为解决相干光通信中空间光耦合困难的问题, 提出了采用大面积高速平衡探测系统来改善链路损耗, 提高探测灵敏度的方法。文中对平衡探测器的原理进行了分析, 给出了一种大面积、高速平衡探测器的结构, 搭建了空间相干光通信测试平台。测试表明, 在 5 Gbps 通信速率下, 空间耦合方式平衡探测器实现了可靠的相干探测, 其直接探测灵敏度达  $-18.6$  dBm, 相干探测灵敏度达  $-43.89$  dBm, 探测器共模抑制比高于 38.5 dB。5 Gbps 通信速率下, 与参考文献[9, 17]相比, 其相干探测灵敏度分别提高了 16 dB 和 8 dB, 验证了该平衡探测器用于相干空间光通信的可行性。

### 参考文献:

[1] Clark T R, Dennis M L. Coherent optical phase-modulation link [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2007, 19(13-16):

- 1206–1208.
- [2] Li Guifang. Recent advances in coherent optical communication [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(2): 279–307.
- [3] Zhuang L, Roeloffzen C G H, Meijerink A, et al. Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas-part II: experimental prototype[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(1): 19–31.
- [4] Fields R, Lunde C, Wong R, et al. NFIRE-to-TerraSAR-X laser communication results: satellite pointing, disturbances, and other attributes consistent with successful performance [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing, 2009, 7330: 73300Q.
- [5] Mark Gregory, Heine F F, Kämpfner H, et al. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(3): 031202.
- [6] Caplan D O, Carney J J, Fitzgerald, et al. Multi-rate DPSK optical transceivers for free-space-application[C]//SPIE, 2014, 8971: 8971K.
- [7] Spellmeyer N W, Browne C A, Caplan D O, et al. A multi-rate DPSK modem for space-laser communication[C]//SPIE, 2014, 8971: 8971J.
- [8] Liu Hongyang, Zhang Yange, Ai Yong, et al. Design and implementation of balance detector used in coherent optical communicationsystem [J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2014, 51(7): 070601. (in Chinese)  
刘宏阳, 张燕革, 艾勇, 等. 用于相干光通信的平衡探测器的设计和实现[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 070601.
- [9] Dai Yonghong, Ai Yong, Xiao Wei, et al. The research of balance detector for high-speed coherence optical communications [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 0125002. (in Chinese)  
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): 0125002.
- [10] Yang Yanlin, Li Yanchao, Gao Long, et al. Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (10): 1918–1922. (in Chinese)  
杨彦玲, 李彦超, 高龙, 等. 相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1918–1922.
- [11] Guo Liren, Hu Yihua, Li Zheng, 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)  
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.
- [12] Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean, et al. Optical phase locked loops in intersatellites coherent optical communications [J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2008, 45 (4): 25–33. (in Chinese)  
许楠, 刘立人, 刘德安, 等. 星间相干光通信中的光学锁相环[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(4): 25–33.
- [13] Fan Chengcheng, Cheng Xiang, Yan Huangpin, et al. Realization of a high sensitivity fully-integrated receiver with optimized large-area photodetector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(4): 0423001. (in Chinese)  
范程程, 程翔, 颜黄苹, 等. 集成大面积光电探测器接收芯片的优化设计 (英文)[J]. *光子学报*, 2015, 44(4): 0423001.
- [14] Razavi B. Prospects of COMS technology for high-speed optical communication circuits [J]. *IEEE Journal of Solid State Circuits*, 2002, 37(1): 1135–1145.
- [15] Zhang Shiqinag, Zhang Zheng, Cai Lei, et al. Laser injecting method from free space beam to single-model fiber using single lens [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(3): 35–39. (in Chinese)  
张世强, 张政, 蔡雷, 等. 基于单透镜的空间光-单模光纤耦合方法[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(3): 35–39.
- [16] Dai Yonghong, Liu Yanfei, Zhou Haotian, et al. Sensitivity testing and experiment of balanced photodetectors in the space coherent optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3110–3116. (in Chinese)  
代永红, 刘彦飞, 周浩天, 等. 空间相干光通信中平衡探测器灵敏度测试实验 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44 (10): 3110–3116.
- [17] Abhay Joshi, Becker D, Wree C, et al. Coherent optical receiver system with balanced photodetection[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2006, 6243: 62430E.