

空间相干光通信中平衡探测器灵敏度测试实验

代永红, 刘彦飞, 周浩天, 单欣, 艾勇

(武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 在空间相干光通信中, 为了对本振激光器和大气信道产生的共模噪声进行有效的抑制, 接收机中广泛引入平衡探测器, 通过分析可知, 平衡探测器在相干探测时灵敏度明显提高。为了探求空间相干通信中平衡探测器的性能, 对其噪声形成的机理进行了分析, 给出了 2.5 Gbps 和 5 Gbps 平衡探测器在非相干与相干探测条件下的灵敏度理论极限。设计了 2.5 Gbps 和 5 Gbps 平衡探测器, 构建了平衡探测器测试系统, 并对其灵敏度进行了测试, 在 2.5 Gbps 通信速率下, 非相干探测灵敏度达到 -21.1 dBm, 相干探测的灵敏度达到 -41.2 dBm, 测试结果与理论分析值基本吻合。空间相干光通信中平衡探测器分析与设计为空间相干光通信系统提供了理论依据和实现条件。

关键词: 光电探测器; 相干光通信; 解调; 灵敏度; 跨阻放大器

中图分类号: TN929.12; TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3110-07

Sensitivity testing and experiment of balanced photodetectors in the space coherent optical communication

Dai Yonghong, Liu Yanfei, Zhou Haotian, Shan Xin, Ai Yong

(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Balanced photodetectors can suppress effectively common-mode noise produced by laser and atmospheric channel in the space coherence optical communication. The sensitivity of balanced detectors are obviously improved in the coherent detection. In order to explore the performance of balanced detector, noise mechanism of balanced photodetector was analyzed. The 2.5 Gbps and 5 Gbps theoretical limit of sensitivity was presented in the condition of incoherent and coherent detection. Balanced photodetectors were designed and test system was built for the measurement of sensitivity. In 2.5 Gbps communication rate, incoherent detection sensitivity reached -21.1 dBm, and coherent detection sensitivity reached -41.2 dBm. Test results roughly coincide with theoretical analysis. The reason that test results deviates from the theoretical value was analyzed. Sensitivity analysis and design of balanced photodetectors provide a theoretical basis for the realization of the space coherent optical communication system.

Key words: photodetector; coherence optical communication; demodulation; sensitivity; TIA

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61273053, 11204220); 航空科学基金(201351S5002)

作者简介: 代永红(1969-), 男, 讲师, 博士, 主要从事信号与信息处理方面的研究。Email: yhdai@whu.edu.cn

0 引言

空间相干光通信与传统的非相干光通信相比,其探测灵敏度能够提高 10~25 dB,一直是人们致力研究的重要领域。其中,具有高灵敏度的探测器是空间相干光通信的关键组成部分。20 世纪 80 年代,参考文献[1-3]对相干探测器的外差与零差噪声性能进行了分析,指出本振相对强度噪声(RIN)对探测器灵敏度的影响,提出使用两个分束器消除本振 RIN 噪声来提高探测器的灵敏度。20 世纪 90 年代初期,相干光通信灵敏度的研究也有一定进展,参考文献[4-5]指出在相干光通信系统中,通过引入 ASK 与 FSK 体制可提高探测器的灵敏度。但是 90 年代后期,采用 EDFA 来提高检测灵敏度的方法使光通信一度向多信道通信的方向发展^[6-8],相干光通信的进展研究一度处于停滞状态。进入 21 世纪,空间相干光通信再次成为了研究热点^[9-18];2005 年,美国 discovery 半导体公司使用平衡探测器在 10^{-9} 的误码率下,将 2.5 Gbps 和 5 Gbps 通信速率的探测器灵敏度分别提高到了 -40 dBm 和 -35 dBm^[10];2008 年以来,TerraSAR-X^[11]使用相干平衡探测的方式进行了上百次双向卫星链路在数据率 5.625 Gbps 的相干 BPSK 通信实验^[9,12-13];2014 年,美国月球与地面的相干光通信演示项目使用平衡相干探测技术完成了上行链路 34 Mbps、下行链路 622 Mbps 数据率的空间相干光通信^[17-18]。在国外,使用平衡探测器抑制本振的 RIN 噪声和大气信道等产生的共模噪声,提高探测系统的探测灵敏度在空间相干光通信中已成为一种趋势;国内空间光通信起步较晚,相干光通信正处于研究阶段,关于平衡探测器灵敏度的研究还未见报道。

文中在空间相干光通信的背景下,对平衡探测器灵敏度的影响因素进行了分析,推导出平衡光电探测器的最小噪声的理论公式,得到了灵敏度的理论极限值。设计了通信速率分别为 2.5 Gbps 和 5 Gbps 平衡探测器,构建了测试系统,分别在非相干探测和相干零差探测的情况下对平衡探测器的灵敏度进行了测试与分析。

1 理论分析

一个性能优良的光电探测器应具有尽可能高的

接收灵敏度,而探测器的灵敏度与噪声、探测方式、光电二极管的负载特性、误码率密切相关。下面在非相干和相干零差探测方式下对平衡探测器的噪声特性进行分析。

1.1 平衡探测器的噪声分析

平衡探测器的结构框图如图 1 所示:光电二极管 D_1 和 D_2 相互级联,将光信号 Signal1 和 Signal2 转换成光生电流 I_{s1} 和 I_{s2} ;负载电阻 R_m 对光生电流之差 $I_{s1}-I_{s2}$ 进行取样,以电压的形式从 R_m 两端输出;Amplifier 为后级连接的宽带低噪声电压放大器。平衡探测器的噪声源主要分为散粒噪声、热噪声和 RIN 噪声。探测器的前级信号一般很弱,受噪声影响较大,虽然后级的宽带电压放大器也引入噪声,但相对于前级来说,其噪声的影响可以忽略^[19]。下面通过前端引入的噪声对平衡探测器的噪声性能进行分析。

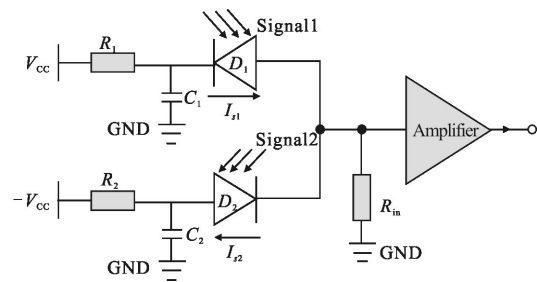


图 1 平衡探测器的结构框图

Fig.1 Structure diagram of balanced detector

1.1.1 非相干探测

与传统的光电探测器一样,平衡探测器可使用单管进行非相干探测,另一个光电管在无光输入的条件下处于高阻状态。因此,平衡探测器单管非相干探测时的主要噪声是光电二极管的散粒噪声和负载电阻 R_m 的热噪声^[20],其输入端引入的噪声可用输入参考噪声电流来等效:

$$I_{th} = \sqrt{I_{sn}^2 + I_{jn}^2} \quad (1)$$

式中: I_{sn}^2 为光电二极管的散粒噪声; I_{jn}^2 为放大器输入阻抗上的热噪声。两者表示为:

$$(I_{sn})^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f_B \quad (2)$$

$$I_{jn}^2 = \frac{4KT\Delta f_B}{R_m} \quad (3)$$

式中: $q=1.6 \times 10^{-19}$ C 为电子电量; I_p 为输入信号的光生电流; I_d 为光电二极管的暗电流; Δf_B 为探测器的噪声测量带宽; K 为玻耳兹曼常数,其值为 $1.38 \times$

10^{-23} J/K ; T 为开氏温度。

1.1.2 相干零差探测

相干零差探测时,平衡光电探测器的噪声除了散粒噪声和热噪声外,本振光的相对强度噪声对其影响也不能忽略。平衡探测器两输入支路的噪声可以分别用 I_{th1} 和 I_{th2} 的均方值来等效:

$$I_{th1}^2 = I_{sn1}^2 + I_{jn1}^2 + I_{in1}^2 \quad (4)$$

$$I_{th2}^2 = I_{sn2}^2 + I_{jn2}^2 + I_{in2}^2 \quad (5)$$

式中: I_{sn1}^2 、 I_{sn2}^2 为散粒噪声; I_{jn1}^2 、 I_{jn2}^2 为热噪声,也可以分别用公式(2)、(3)表示; I_{in1}^2 、 I_{in2}^2 为 RIN 噪声^[21]。由于本振 RIN 噪声远大于信号 RIN 噪声,这里只考虑本振 RIN 噪声,可以表示为:

$$I_{in}^2 = 2\alpha_{RIN}(\alpha P_{in})^2 \Delta f_B \quad (6)$$

式中: α_{RIN} 为相对强度噪声系数,激光器的相对强度噪声系数通常在 $-160 \sim -135 \text{ dB/Hz}$ 之间; α 为光电二极管的响应度; Δf_B 为探测器的噪声测量带宽。在平衡探测时,两个支路的输入参考噪声电流经过合成形成平衡探测器的输入参考噪声电流 I_{in} 。由于两光电管的输入端的散粒噪声和热噪声不相关,叠加后的噪声只有均方值才有意义,而作用于两个光电管支路的本振激光的 RIN 噪声是同源的,彼此相关。因此,相干零差探测时,总输入噪声电流均方值为:

$$I_{th}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2TR_L} \int_0^T \left(\sqrt{I_{th1}^2 R_L^2} - \sqrt{I_{th2}^2 R_L^2} \right)^2 dt \quad (7)$$

假定平衡探测器两支路的平衡一致性为 η ,根据公式(7),相干零差检测的噪声性能用等效的输入参考噪声电流可以表示为:

$$I_{th} = \sqrt{I_{sn1}^2 + I_{jn1}^2 + I_{sn2}^2 + I_{jn2}^2 + (1-\eta)^2 I_{in1}^2} \quad (8)$$

1.2 光电管的负载性能分析

根据公式(2)可知,散粒噪声主要来源于光生电流和光电二极管的暗电流。公式(3)说明热噪声与光电二极管的负载和测量带宽有关,在满足电路最小带宽的条件下,增大光电二极管的负载电阻就可以减小热噪声。虽然采用高输入阻抗放大器可以减小热噪声,但是高输入阻抗会降低电路带宽^[18]。一般而言,光电二极管可以用一个电流源(I_s)、一个并联电容(C_d)、一个并联电阻(R_d)和一个串联电阻(R_s)来进行等效, R_m 为光电二极管的负载(电压放大器的输入

电阻),电路图如图 2 所示,电路模型的传递函数为:

$$T(j\omega) = \frac{R_m R_d}{j\omega(R_m + R_s)R_d C_d + R_m + R_s + R_d} \quad (9)$$

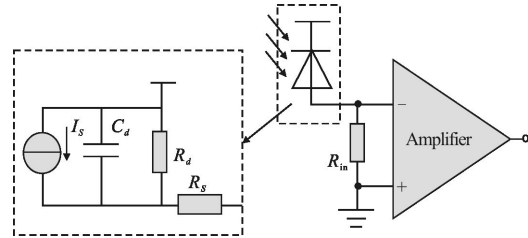


图 2 前置放大器等效电路图

Fig.2 Preamplifier equivalent circuit diagram

光电二极管的暗电流极小,对应的漏电阻 R_d 较大,串联电阻 R_s 较小,相对于放大器的输入电阻而言, R_d 和 R_s 均可以忽略。则上限转折频率为:

$$f_H = \frac{1}{2\pi \frac{(R_m + R_s)R_d}{R_m + R_s + R_d} C_d} \approx \frac{1}{2\pi R_m C_d} \quad (10)$$

公式(10)说明:在光电管的结电容一定的条件下, R_m 越大, f_H 越小。要满足电路的带宽必须降低 R_m ,而降低 R_m 必然导致热噪声增大,使探测器的输入参考噪声增大。可见,降低输入参考噪声和增大电路带宽满足通信速率是相互矛盾的。

在平衡探测器中,一般采用如图 3 所示的跨阻前置放大器,跨阻放大器是一个电压并联负反馈放大器,图中, R_f 为反馈电阻,由密勒定理可知,跨接在放大器输入和输出端的跨阻可以等效为输入端电阻和输出电压源^[20]。假设放大器增益为 A ,其输入阻抗和输出电压为:

$$R_{in} = \frac{R_f}{A+1}, v_{out} = -I_s R_f \quad (11)$$

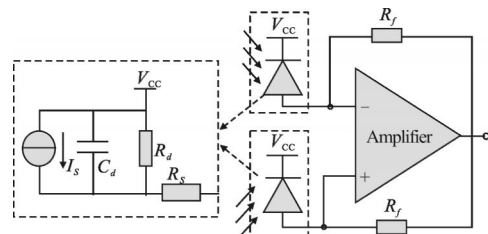


图 3 跨阻放大器等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of TIA

由公式(11)可见,跨阻放大器的等效输入电阻是反馈电阻的 $1/(A+1)$ 倍,带宽没有降低,因为输出

电压与反馈电阻成正比,所以输出信号的幅度与高输入阻抗放大器相比并没有降低。平衡探测器在实现宽带放大的同时具有较小的输入参考噪声电流,可以获得较高的灵敏度。因此,平衡跨阻放大器是平衡探测器电路设计中一种较好的选择。

1.3 误码率与信噪比关系

通常,误码率是衡量光电探测器性能的重要参数。在一定的检测方式下,平衡探测器的误码率与信噪比密切相关。根据最佳判决准则,非相干检测时,误码率与信噪比之间的关系^[9]可以表示为:

$$BER = \frac{1}{2} [\operatorname{erfc}(Q_{\max}/\sqrt{2})] = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{SNR}}{2} \right) \right] \quad (12)$$

相干零差检测时,误码率与信噪比表示为:

$$BER = \frac{1}{2} [\operatorname{erfc}(Q_{\max}/\sqrt{2})] = \frac{1}{2} [\operatorname{erfc}(\sqrt{SNR})] \quad (13)$$

图 4 给出了不同电流信噪比条件下,非相干检测和相干零差检测时平衡探测器的误码率与电流信噪比之间的关系。可见,要保证 10^{-12} 以下的误码率,非相干检测时,光生信号电流与输入参考噪声电流之比需要大于 14.07。相干零差检测时,信号电流与输入参考噪声电流之比需要大于 4.974。可见,在同样误码率的条件下,相干检测比非相干检测的信噪比要低,可以获得的灵敏度要高。

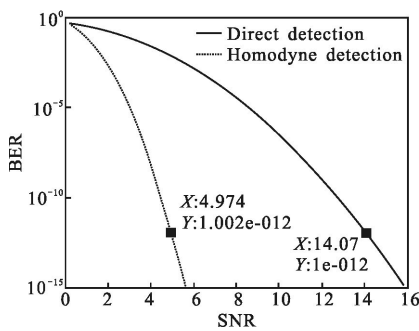


图 4 光电探测器误码率与电流信噪比

Fig.4 Relationship between BER and current SNR of photodetector

1.4 灵敏度分析

根据光电二极管结电容以及通信带宽,合理地设计平衡跨阻放大器,在带宽和输入阻抗良好匹配的条件下,可以确定平衡探测器在不同检测方式下的探测灵敏度。

1.4.1 非相干检测光电探测器的灵敏度

根据公式(1)和(12)得到输入光信号功率与输入参考噪声电流以及输入光功率与电流信噪比之间的

对应关系,如图 5 所示。其中,通信速率为 5 Gbps, PIN 的响应度为 0.85 A/W, 3 dB 带宽为 3.5 GHz, 结电容为 0.4 pF 的光电二极管组成的平衡探测器。

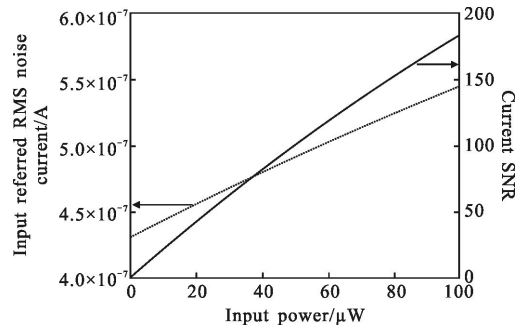


图 5 输入功率、输入参考噪声流、电流信噪比之间的关系

Fig.5 Relationship among input power & reference noise current & SNR

由图可见,信号光的输入功率越大,光电二极管的散弹噪声越大,相应的输入参考噪声电流也越大。当输入光功率减小时,散弹噪声虽然减小,但是由于热噪声的影响,即使输入功率为零,输入参考噪声电流也不为零。从输入光功率与电流信噪比之间的关系曲线可以看出,信噪比总是随着输入光功率的增大而增大。

灵敏度是指在一定误码率下的光输入信号功率。表 1 给出了 2.5 Gbps 和 5 Gbps 的通信速率下、光电二极管的结电容不同,所对应的最佳等效输入阻抗的范围、等效的输入参考噪声电流的范围与光电二极管的不同响应度(α)的探测器理论灵敏度之间的对应关系。

表 1 非相干探测灵敏度表

Tab.1 Direct detection sensitivity table

Data communication rate	2.5 Gbps	5 Gbps
Diode junction capacitance/pF	0.5-0.7	0.5-0.3
Diode optimal load/ Ω	275-385	187-312
Input reference noise current/ μ A	0.25-0.31	0.41-0.53
$\alpha=0.4$ (MSM), sensitivity/dBm	-21.0--20.3	-18.0--19.1
$\alpha=0.85$ (PIN), sensitivity/dBm	-24.4--23.6	-22.3--21.2
$\alpha=1$ (PIN), sensitivity/dBm	-25.1--24.3	-23.1--22.0
$\alpha=10$ (APD), sensitivity/dBm	-35.1--34.3	-33.1--32.0

1.4.2 相干零差检测光电探测器的灵敏度

根据公式(8)和(13)得到输入光信号功率与输入参考噪声电流以及输入光功率与电流信噪比之间的对应关系,如图 6 所示。

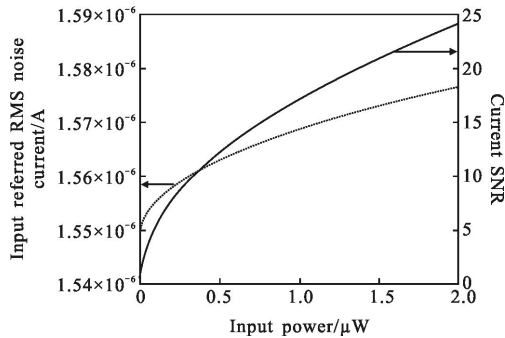


图 6 相干零差检测参量关系图

Fig 6 Parameter diagram in coherent homodyne detection

其中,通信速率为 5 Gbps, PIN 光电二极管的响应度为 0.85 A/W, 结电容为 0.4 pF, RIN 噪声系数为 -150 dBm/Hz, 本振光信号功率为 0 dBm(1 mW), 平衡一致性为 98.5%。表 2 给出了相干零差检测时, 2.5 Gbps 和 5 Gbps 通信速率下的灵敏度。

表 2 相干零差检测灵敏度参数表

Tab.2 Coherent homodyne detection sensitivity parameter

Data communication rate	2.5 Gbps	5 Gbps
Single-ended shot noise/ μA	0.7	0.98
Diode junction capacitance/pF	0.6	0.4
Single-ended thermal noise/ μA	0.31	0.498
Single-ended local oscillator RIN/ μA	0.67	1.25
Consistencies	98.5%	98.5%
Local laser power/mW	1	1
Reference noise current($\alpha=0.85$)/ μA	1.07	2.57
$\alpha=0.35$ (MSM), sensitivity/dBm	-41.4	-37.2
$\alpha=0.85$ (PIN), sensitivity/dBm	-44.1	-40.8
$\alpha=1$ (PIN), sensitivity/dBm	-44.9	-41.7

相干零差探测时的灵敏度与 RIN 噪声系数、本振光的输入功率、平衡探测器的不对称性、输入信号的功率等有关。表 3 给出了灵敏度与本振功率之

间的关系,其中,一致性为 98.5%, RIN 噪声系数为 -150 dBm/Hz, 本振光功率在 0.1~10 mW 变化, 误码率为 10^{-12} 。

表 3 相干零差检测的灵敏度与本振功率关系

Tab.3 Relationship between sensitivity and local oscillation signal in coherent homodyne detection

Local power/mW	Sensitivity(2.5 Gbps) /dBm	Sensitivity(5 Gbps) /dBm
0.1	-40.5	-36.2
0.2	-42.2	-38.2
0.4	-43.3	-39.6
0.8	-43.9	-40.6
1.6	-44.3	-41.2
3.2	-44.5	-41.5
6.4	-44.6	-41.7
10	-44.6	-41.7

从表 3 中可以看出,本振功率较小时,灵敏度随着本振功率的增大而增大。但是本振功率增大到一定程度时,灵敏度随着本振功率变化不明显,这是因为本振的增大导致输入参考噪声增大。RIN 噪声系数越大,平衡探测器的不对称度越大,参考噪声电流越大,本振进入拐点的功率越小。

2 实验测试与分析

设计了 2.5 Gbps 和 5 Gbps 的平衡探测器,实物图如图 7 所示。在实验室搭建了测试系统,分别在非相干检测和相干零差检测的情况下对探测器的灵敏度进行了测试。

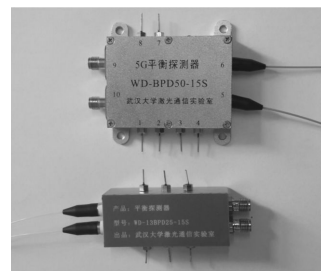


图 7 2.5 Gbps 和 5 Gbps 的平衡探测器实物图

Fig.7 Real figure of 2.5 Gbps and 5 Gbps balanced photodetector

2.1 非相干探测灵敏度测试与分析

非相干探测时,从误码分析仪的光端口输出 OOK 光信号,通过可变衰减器模拟信道衰减,然后通过 1:1 光功率分配器,一路送到光功率计测试信号的功率,一路通过光电探测器检测信号误码。调节可变衰减器,对 2.5 Gbps 和 5 Gbps 的两种 PIN 光电二极管组成的平衡探测器的灵敏度进行了测试。测试数据与理论分析值进行对比,如图 8 所示。

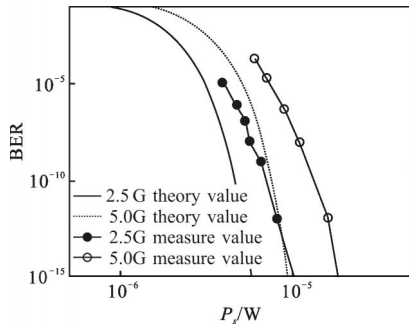


图 8 非相干探测灵敏度对比图

Fig.8 Sensitivity to contrast figure of direct detection

图 8 说明非相干探测器灵敏度的理论值和测试值基本吻合,但测试值对应的灵敏度偏低,其主要的原因为:

(1) 消光比引起的灵敏度恶化。一般假定在“1”比特时的输出功率与“0”比特时的输出功率之比定义为消光比,通常 PIN 管在消光比为 7.94 的条件下,一般引入 1.1 dB 左右灵敏度恶化^[21]。

(2) 前置放大器的输入电阻与最佳等效负载电阻不一致引起的灵敏度恶化。例如,在表 1 中,2.5 Gbps 的光电探测器,光电二极管的负载电阻在 275~385 Ω 的范围内变化时,PIN 管引入的灵敏度恶化约为 0.8 dB。

(3) 时钟抖动引起的灵敏度恶化。在前文的分析中,光电探测器的灵敏度是在信号电压峰值的基础上计算得到的,由于输入时钟恢复电路的噪声性质,使得取样时间在采样比特中间的平均值附近波动,这种波动称为时间抖动。当时间抖动的方差与通信速率的乘积小于 0.16 时,灵敏度恶化可以达到 2 dB,当大于 0.2 时,抖动导致的灵敏度恶化将无限大^[18]。

(4) 后置放大器引入的噪声引起灵敏度的恶化,在理论分析中,没有考虑后置放大器的噪声对灵敏度的影响,后置放大器是一个宽带放大器,其噪声性

能对灵敏度也有一定的影响。

2.2 相干零差探测灵敏度测试与分析

相干零差探测时,灵敏度测试框图如图 9 所示。

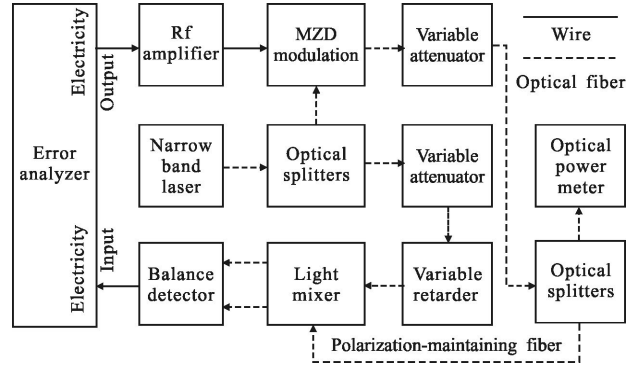


图 9 平衡探测灵敏度测试图

Fig.9 Sensitivity test pattern of coherence detection

误码分析仪输出的电信号通过射频宽带功率放大器放大后作为马赫曾德尔相位调制器的基带信号源。窄带激光信号源经过光功分器后分为两路信号,一路输出至相位调制器作为调制激光源,另一路衰减后作为本振信号。相位调制器的输出经过可变衰减器和功分器后分为两路,一路用于信号功率监控,一路作为光混频器的输入信号。光混频器的两路输出信号分别连接到平衡探测器的两个输入端,将平衡探测器的两个输出端连接到误码分析仪的两个电输入端进行误码检测。

对 2.5 Gbps 和 5 Gbps 的平衡探测器进行了测试,并将测试数据与理论分析值进行对比,如图 10 所示。

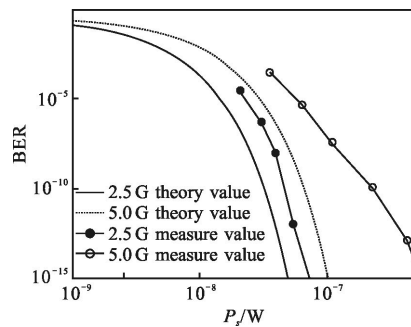


图 10 相干零差检测灵敏度对比图

Fig.10 Sensitivity to contrast figure of coherence homodyne detection

从图 10 可以看出,灵敏度的测试结果与理论分析值基本吻合,相干零差探测的灵敏度优于非相干

探测的灵敏度。同样的,测试的数据与理论分析也有一定的偏差。除了与非相干探测论述的相同的原因之外,RIN 噪声与假设 RIN 噪声系数不一致也是造成理论值与测试值出现偏差一个重要原因。

3 结 论

文中对空间光通信中的平衡探测器灵敏度进行了理论分析,对研制的 2.5 Gbps 和 5 Gbps 平衡探测器进行了灵敏度测试。当误码率为 10^{-12} 时,2.5 Gbps 平衡探测器相干零差检测灵敏度理论极限值为 -44.1 dBm,测试结果为 -41.2 dBm;非相干探测灵敏度理论极限值为 -23.9 dBm,测试结果为 -21.1 dBm。当误码率为 10^{-12} 时,5 Gbps 平衡探测器相干零差检测灵敏度理论极限值为 -40.8 dBm,测试结果为 -34.3 dBm;非相干探测灵敏度理论极限值为 -21.2 dBm,测试结果为 -18.1 dBm。5 Gbps 的相干与非相干灵敏度测试值与理论值的差距较 2.5 Gbps 的大,其原因有待进一步的分析与判定。平衡探测器灵敏度的分析对空间相干光通信的实现以及空间相干光通信的链路预算具有一定的现实意义。

参考文献:

- [1] Yuen H P, Chan V W S. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. *Optics Letters*, 1983, 8(3): 177-179.
- [2] Abbas G L, Chan V W S, Yee T. A dual-detector optical heterodyne receiver for local oscillator noise suppression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(5): 1110-1122.
- [3] Slusher R E, Hollberg L W, Yurke B, et al. Observation of squeezed states generated by four-wave mixing in an optical cavity[J]. *Physical Review Letters*, 1985, 55(22): 2409.
- [4] Smithy D T, Beck M, Raymer M G, et al. Measurement of the Wigner distribution and the density matrix of a light mode using optical homodyne tomography: Application to squeezed states and the vacuum[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 70(9): 1244.
- [5] 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.
- [6] Beck M, Smithy D T, Raymer M G. Experimental determination of quantum-phase distributions using optical homodyne tomography[J]. *Physical Review A*, 1993, 48(2): R890.
- [7] Wan Lin, Feng Ying. Research progress and trend of satellite coherent optical communication[J]. *Laser and Optoelectronics*, 2007, 44(6): 49-53. (in Chinese)
- [8] Yao Zhoushi, Hu Yu. Satellite coherent optical communication technology development course and trend[J]. *Optical Communication Technology*, 2005, 29(1): 44-46. (in Chinese)
- [9] Li Guifang. Recent advances in coherent optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(2): 279-307.
- [10] Wree C, Becker D, Mohr D, et al. Optical coherent receivers for 2.5 and 5 Gb/s [C]//The 18th Annual Meeting of the IEEE: Laser and Elector-optics Society 2005, 2005: 1548125.
- [11] Clark T R, Dennis M L. Coherent optical phase-modulation link[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2007, 19(16): 1206-1208.
- [12] Shieh W, Bao H, Tang Y. Coherent Optical OFDM: theory and design[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 841-859.
- [13] Gregory M, Troendle D, Muehlnikel G. 3 years coherent space to ground links:performance results and outlook for the optical ground station equipped with adaptive optics [C]//Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation, SPIE, 2013, 8610: 861004.
- [14] Joshi A, Becker D, Wree C, et al. Coherent optical receiver system with balanced photodetection [C]//SPIE, 2006, 6243: 62430E.
- [15] Ip E, Lau A P T, Barros D J F, et al. Coherent detection in optical fiber systems[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 753-791.
- [16] Armstrong J. OFDM for optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 189-204.
- [17] Caplan D O, Carney J J, Fitzgerald, et al. Multi-rate DPSK optical transceivers for free-space-application [C]//SPIE, 2014, 8971: 8971K.
- [18] 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.
- [19] Yang Xianglin. Optical Fiber Communication System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 139-141, 217-220. (in Chinese)
- [20] Wu Zhongqin. An Introduction to Optical Communications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 168-170. (in Chinese)
- [21] William, Ivan Djordjevic. OFDM for Optical Communications [M]. Bai Chenglin, Feng Min, Luo Qinglong, translated. Beijing: Electronics Industry Press, 2011: 76-80. (in Chinese)