

文章编号 1004-924X(2017)02-0334-08

## 本振功率对空间平衡探测器相干探测灵敏度的影响

梁赫西<sup>1,2,3</sup>, 代永红<sup>1\*</sup>, 艾勇<sup>1,3</sup>, 单欣<sup>1</sup>, 武强<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;
3. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**为了探寻空间相干光通信中本振功率与相干探测灵敏度间的关系,建立了本振光功率变化对相干探测灵敏度影响的数学模型,仿真分析了不同参数状态下本振功率对相干探测灵敏度的影响。采用自研开发的高速大面积空间耦合平衡探测器搭建了相干探测灵敏度测试实验系统,并就本振功率对探测灵敏度的影响进行了实验验证。实验结果表明:相干探测系统中,两光电管不可能完全匹配,探测灵敏度始终受到本振强度噪声的影响,在探测器环境参数一定时,存在最佳本振光功率值使得相干探测灵敏度取最大值。在误码率为  $10^{-12}$ 、通信速率为 5 Gb/s 的条件下,相干探测灵敏度测试的最大值为  $-40.16$  dBm,此时对应的本振光功率为 9 dBm,与理论极限值基本一致。该模型对提高相干探测系统的探测灵敏度具有指导意义。

**关键词:**相干光通信;平衡探测器;噪声抑制;灵敏度;本振功率

**中图分类号:** TN929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172402.0334

## Influence of local oscillator power on sensitivity of coherent detection of space balance detector

LIANG He-xi<sup>1,2,3</sup>, DAI Yong-hong<sup>1\*</sup>, AI Yong<sup>1,3</sup>, SHAN Xin<sup>1</sup>, WU Qiang<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;*
  3. *Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan 430072, China)*
- \* *Corresponding author, E-mail: 126959978@qq.com*

**Abstract:** To explore the relationship between the local oscillator power and the coherent detection sensitivity in free-space coherent optical communications, the mathematical model about the influence of the local oscillator power on the sensitivity of coherent detection was established, and the effect of local oscillator power on the sensitivity of coherent detection under different parameters was simulated. The coherent detection sensitivity testing system was set up by using the high-speed and large-area space-coupling balanced detector produced from Wuhan University, then the effect of the local oscillator power on the detection sensitivity was verified experimentally. The experimental results show that the detection sensitivity is always affected by the intensity noise of the local oscillator due to the

收稿日期:2016-09-21;修订日期:2016-11-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11204220, No. 61273053)

dismatch of the two photodiodes in the coherent detection system; thus there exist an optimal local oscillator power which can realize the maximum value of coherent detection sensitivity with certain environment parameters of the detector. When the bit error rate is  $10^{-12}$  and the communication rate is 5 Gbps, the maximum value of the coherent detection sensitivity in the test is  $-40.16$  dBm and the corresponding optical power is 9 dBm. The proposed model has an guiding significance for the improvement of detection sensitivity of coherent detection systems.

**Key words:** coherent optical communication; balanced detector; noise suppression; sensitivity; local oscillator power

## 1 引 言

近年来在空间相干光通信领域,使用本振激光与信号激光相干进行解调,可以提高抗干扰能力,增加相干探测灵敏度,因此成为现代光通信领域中的研究热点<sup>[1-5]</sup>。星地空间相干光通信系统中,本振激光的相对强度噪声对相干探测灵敏度有着重要的影响,故此开展提高相干探测灵敏度的大面积空间耦合平衡探测器与本振功率间的关系研究具有重要的现实意义。20 世纪 80 年代,Abbas 和 Slusher 等人通过研究相干探测系统的噪声性能,初步指出了本振过剩强度噪声对相干探测灵敏度的影响<sup>[6-7]</sup>。20 世纪 90 年代,Holmes 等人对本振光功率的优化进行了分析计算,以提高系统信噪比<sup>[8-9]</sup>。进入新世纪以来,各国学者在提高及优化相干探测灵敏度方面做了大量的探索和研究。2005 年,Josh 等人报道了 Discovery 半导体公司的平衡探测器,选在本振功率 LO 为 14 dBm、通信速率为 5 Gbps、误码率为  $10^{-9}$  的条件下,其探测灵敏度可以达到  $-35$  dBm<sup>[10]</sup>。2009 年,马宗峰等人给出了全光纤相干激光雷达本振光功率的优化方法<sup>[11]</sup>。2015 年,孔英秀等人探索了本振功率对目标微动探测领域的影响<sup>[12]</sup>。2016 年,郭力仁等人从探测器自身参数的角度研究了本振光功率对信噪比的影响<sup>[13]</sup>。不过,在国内使用大面积光敏探测面的空间耦合平衡探测器来抑制本振噪声,提高相干探测灵敏度,以及空间耦合平衡探测器本振光功率与相干探测灵敏度关系模型及实验的相关研究还未见报道。

本文就本振功率的变化对相干探测灵敏度的影响进行了理论建模及仿真分析,采用武汉大学自研的高速大面积(光敏探测面直径达  $100 \mu\text{m}$ )空间耦合平衡探测器搭建了空间相干探测实验系统,并

就本振功率对探测灵敏度的影响进行了实验验证。

## 2 理论基础

### 2.1 平衡探测器的结构及信噪比

空间相干光通信中,平衡探测技术可以很好地抑制本振相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN)和共模噪声,因此高灵敏度的平衡探测器已成为空间相干探测系统的关键。平衡探测器结构如图 1 所示:信号光与本振光经混频后耦合到探测器光电探测光敏面上,两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-经宽带低噪声差分合成放大器放大输出。

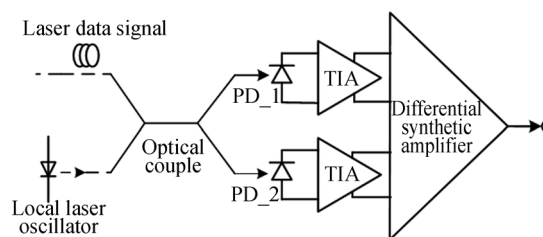


图 1 平衡探测器结构图

Fig. 1 Schematic diagram of balanced detector

设信号光  $E_s(t)$  和本振光  $E_l(t)$  的光场分布分别为:

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

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

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。

信号光与本振光通过相干混频后有:

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

式中:  $\theta$  表示  $180^\circ$  光混频器的反射相移,  $\epsilon$  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:

$$I_1 = \frac{\eta_1 e}{h\nu} \{ (1-\epsilon) A_s^2 + \epsilon A_i^2 - 2\sqrt{\epsilon(1-\epsilon)} A_s A_i \sin[\omega_F t + \Delta\varphi] \} + n_1(t), \quad (4)$$

$$i_{\text{balanced}} = \frac{e}{h\nu} \{ [(1-\epsilon)\eta_1 - \epsilon\eta_2] A_s^2 + [\epsilon\eta_1 - (1-\epsilon)\eta_2] A_i^2 - 2(\eta_1 + \eta_2) \sqrt{1-\epsilon} \sqrt{\epsilon} A_s A_i \sin[\omega_F t + \Delta\varphi] \} + n_1(t) - n_2(t), \quad (6)$$

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,  $\omega_F = \omega_s - \omega_i$  为中频信号的频率,  $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_i$  为中频信号的相位。

当分束比  $\epsilon=0.5$  时, 两光电管具有相同的量子效率, 输出中频电流最大, 此时平衡探测器输出的信号功率为<sup>[14]</sup>:

$$S = \frac{1}{2} (\eta_1 + \eta_2)^2 (e/h\nu)^2 P_s P_i R_{eg}, \quad (7)$$

式中  $P_s, P_i, R_{eg}$  分别为信号光功率、本振光功率和探测器电阻。

平衡探测器的噪声源主要为散粒噪声、本振激光噪声和热噪声。其中, 热噪声表示为<sup>[14]</sup>:

$$\langle i_{\text{th}}^2 \rangle = \frac{4KT B}{R_i}, \quad (8)$$

式中:  $K$  为玻尔兹曼常数,  $K=1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $B$  为传输带宽;  $T$  为凯尔文温度。

散粒噪声表示为<sup>[14]</sup>:

$$\langle i_{\text{sn}}^2 \rangle = 2e\alpha P_i B, \quad (9)$$

过剩强度噪声表示为<sup>[14]</sup>:

$$\langle i_{\text{RIN}}^2 \rangle = \text{RIN} \times B \times (\alpha P_i)^2, \quad (10)$$

从式(9)~式(10)可以看出, 本振光功率与散粒噪声呈线性比例, 而过剩强度噪声与本振光功率成平方率关系。因此, 随着本振光功率的增大, 散粒噪声及过剩强度噪声将远大于热噪声, 成为

$$\text{SNR} = \frac{[8/(3-\alpha')](e\eta/h\nu)^2 G^2 P_s P_i R_i}{2eG^2 ((e\eta/h\nu) P_i + I_d) BR_i + 4KT B + (1-\alpha') \alpha_{\text{RIN}} (e\eta/h\nu)^2 P_i^2 BR_i}. \quad (14)$$

为了获得足够大的转换增益, 探测器的本振功率越大越好, 但引入系统的本振噪声也进一步增强, 当本振光功率高于探测器的饱和光功率时, 探测器将工作于非线性区, 其输出电流可表示为:

$$\text{SNR} = \frac{[4/(3-\alpha')](e\eta/h\nu)^2 (1-2kP_i)^2 G^2 P_s P_i R_i}{2eG^2 (e\eta/h\nu) P_i (1-kP_i) BR_i + 4KT B + (1-\alpha') \alpha_{\text{RIN}} (e\eta/h\nu)^2 P_i^2 (1-kP_i)^2 BR_i}. \quad (16)$$

$$I_2 = \frac{\eta_2 e}{h\nu} \{ (1-\epsilon) A_i^2 + \epsilon A_s^2 + 2\sqrt{\epsilon(1-\epsilon)} A_s A_i \sin[\omega_F t + \Delta\varphi] \} + n_2(t). \quad (5)$$

信号光与本振光通过相干混频耦合到平衡探测器探测光敏面上平衡探测器的光电流输出为:

探测器的主要噪声。而随着激光器平均功率的进一步增加, 由于平方率关系, 单管探测时 RIN 噪声将成为探测器主要的噪声源, 相干通信链路的信噪比会降低, 这也限制了系统通信带宽的增加。双管平衡探测时, 若两个光电探测管的一致性能达到最优, 即  $\eta_1 = \eta_2 = \eta$ , 此时 RIN 噪声被完全抑制, 探测器系统噪声主要由散粒噪声和热噪声组成, 系统信噪比表示为<sup>[15]</sup>:

$$\text{SNR} = \frac{4(e\eta/h\nu)^2 G^2 P_s P_i R_i}{2eG^2 ((e\eta/h\nu) P_i + I_d) BR_i + 4KT B}, \quad (11)$$

式中:  $P_s, P_i$  分别为信号光功率、本振光功率,  $G$  为光电二极管的内部增益。

在实际的平衡探测系统中, 两光电探测管的一致性不可能完全匹配, 令两光电探测管的响应度为  $\alpha_1, \alpha_2$ , 引入平衡探测器平衡一致性系数, 即有:

$$\alpha' = \left[ 1 - \frac{2|\alpha_1 - \alpha_2|}{\alpha_1 + \alpha_2} \right] \times 100\%. \quad (12)$$

由两光电探测管不一致性引入的本振过剩强度噪声可表示为:

$$P_{\text{RIN}} = [1 - \alpha'] \alpha_{\text{RIN}} \left( \frac{e\eta}{h\nu} P_i \right)^2 BR_i. \quad (13)$$

此时平衡探测器的信噪比为:

$$i = \frac{e\eta}{h\nu} P_i (1 - kP_i) + \frac{e\eta}{h\nu} (1 - 2kP_i) \sqrt{2P_s P_i} |_{P_i \gg P_s}, \quad (15)$$

其中  $k$  为探测器参数。

探测器工作于非线性区的信噪比为:

## 2.2 本振功率与平衡探测器灵敏度的关系

平衡探测器的探测灵敏度一般描述为在给定误码率下可探测的输入信号光功率。在一定的误码率条件下,系统信噪比决定着相干探测灵敏度,而本振光功率对于相干平衡探测的信噪比有着重要影响。一般而言,本振光功率的增大会提高平衡探测器的转换增益,但同时本振噪声也随之增大,这将降低系统信噪比,从而影响平衡探测系统的探测灵敏度,因此存在最优本振光功率使得平衡探测系统灵敏度达到最佳值。

根据最佳判决原理,相干探测时,系统误码率与功率信噪比之间的关系为:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} [\text{erfc}(Q_{\text{max}}/\sqrt{2})] = \frac{1}{2} [\text{erfc}(\sqrt{4\text{SNR}})]. \quad (17)$$

在  $10^{-12}$  的误码率下,选用不同响应度的光电二极管,可得相干探测的理论极限灵敏度,如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

表 1 相干探测灵敏度参数

Tab. 1 Theoretical sensitivities of coherent detection

参数	通信速率	
	2.5 Gb/s	5 Gb/s
本振光功率/dBm	10	10
二极管结电容/pF	0.5-0.7	0.3-0.5
平衡一致性系数	98.5%	98.5%
最佳匹配负载/ $\Omega$	275-385	187-312
(PIN)响应度为 1 时		
灵敏度/dBm	-45.2	-41.9
(PIN)响应度为 0.85 时		
灵敏度/dBm	-44.6	-41.1

相干探测系统中,总噪声功率与表 1 中的最佳匹配负载息息相关。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  $R_d$  的并联电路模型,电路 -3 dB 带宽为:

$$f_c = \frac{(R_T + R_d)}{2\pi R_T R_d C_j} = \frac{1}{2\pi R C_j}, \quad (18)$$

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

式(18)表明,光电二极管节电容一定的情况下,为保证电路工作带宽,应尽可能地降低匹配负载值,但这会导致总噪声功率增大,从而影响系统的探测灵敏度。一般根据系统最高工作速率及光电管的结电容来确定最佳匹配负载。

## 3 仿真分析

设用于空间光通信的平衡探测器的工作速率为 5 Gb/s,激光波长为 1 550 nm,本振功率为 -10~15 dBm,平衡一致性系数为 1(两光电二极管完全匹配)。根据式(8)可得平衡探测器的探测灵敏度随本振光功率的变化,如图 2 所示。

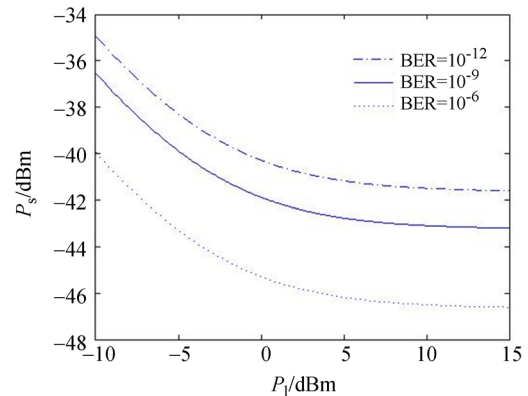


图 2 不同误码率下探测灵敏度随本振功率的变化关系(本振强度噪声完全抑制)

Fig. 2 Relationship between detection sensitivity and LO power with different BERs (neglecting LO intensity noise)

由图 2 可以看出,在一定的本振功率下,误码率越大,平衡探测器的探测灵敏度越大。两光电二极管完全匹配时,本振过剩强度噪声被完全抑制。在同一误码率条件下随着本振功率的增加,探测灵敏度逐步增大。当探测器的散粒噪声远远大于热噪声时,探测器的探测灵敏度趋于稳定。

当平衡探测器两光电二极管不完全匹配时,即平衡一致性系数小于 1,此时系统的本振过剩强度噪声不可忽略,在误码率为  $10^{-12}$  的条件下,根据式(11)可得平衡探测器探测灵敏度随本振功率的变化,如图 3 所示。

图 3 中给出了平衡一致性系数分别为 98.5%, 85%, 65% 条件下的探测灵敏度曲线。随着本振功率的增加,系统的主要噪声成分变为本振过剩强度噪声,探测灵敏度先增大后减小。平衡一致性系数越大,能获得的最大探测灵敏度越大;平衡一致性系数越小(两光电二极管匹配性能越差),本振强度噪声影响越大,探测灵敏度减小得越快。

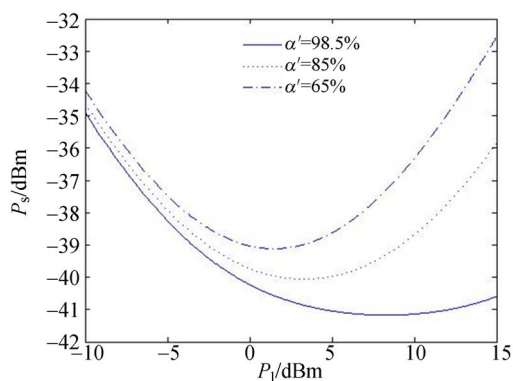


图 3 不同平衡一致性系数下探测灵敏度随本振功率的变化关系

Fig. 3 Relationship between detection sensitivity and LO power with different balanced coefficients

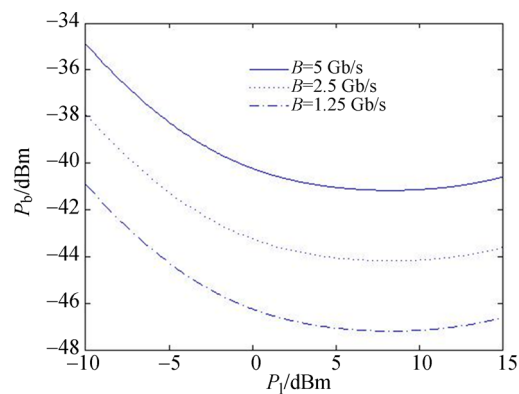


图 4 不同通信速率下探测灵敏度随本振功率的变化关系 ( $\alpha' = 98.5\%$ )

Fig. 4 Relationship between detection sensitivity and LO power with different communication rates ( $\alpha' = 98.5\%$ )

改变探测器的工作速率和本振过剩强度的噪声系数可得图 4、图 5。由图 4 可知,随着探测器工作速率的提高,探测灵敏度将减小。由图 5 可知,本振过剩强度的噪声系数越小,最佳本振功率越大;当噪声系数由  $-140$  dB/Hz 变为  $-150$  dB/Hz 时,最大探测灵敏度提高了约 4 dB。

随着本振功率的进一步增加,探测器工作于非线性区。根据式(13)可知,探测器的非线性自身参数  $k$  一定时,探测灵敏度随本振功率先增大后减小;且  $k$  取值越大,探测灵敏度减小得越快,如图 6 所示,这是因为  $k$  取值越大,探测器的非线性效应越强。

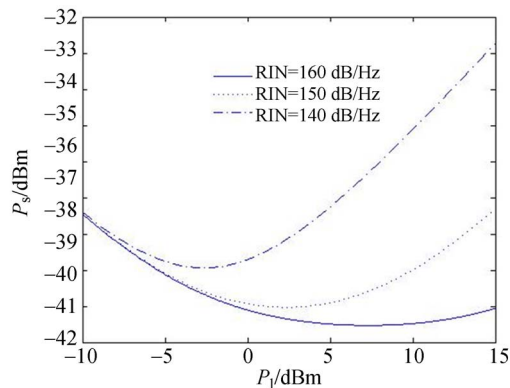


图 5 不同本振强度噪声系数下探测灵敏度随本振功率的变化关系 ( $\alpha' = 98.5\%$ )

Fig. 5 Relationship between detection sensitivity and LO power considering LO intensity noise in different RINs ( $\alpha' = 98.5\%$ )

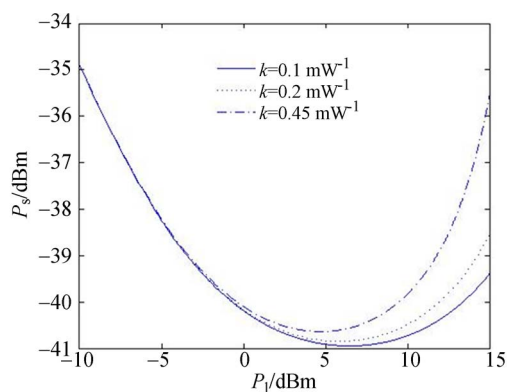


图 6 不同非线性参数下探测灵敏度随本振功率的变化关系 ( $\alpha' = 98.5\%$ )

Fig. 6 Relationship between detection sensitivity and LO power with different nonlinear parameters ( $\alpha' = 98.5\%$ )

## 4 实验

实验采用武汉大学激光通信实验室自行设计的空间耦合平衡探测器,其探测面直径为  $100 \mu\text{m}$ ,通信速率为  $5 \text{ Gb/s}$ ,如图 7 所示。

图 8 为实验室搭建的相干光通信平衡探测器相干灵敏度测试平台。该平台主要由窄带半导体激光器、光功率分束器、数字信号源、相位调制器、射频信号放大器、1800 光混频器、平衡光电探测器、保偏光纤 (Polarization Maintaining Optical Fiber, PMF)、示波器及频谱分析仪、光功率计等测试仪器组成。

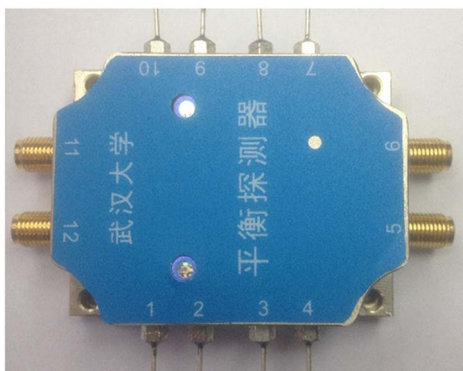


图 7 平衡探测器

Fig. 7 Photo of balanced detector

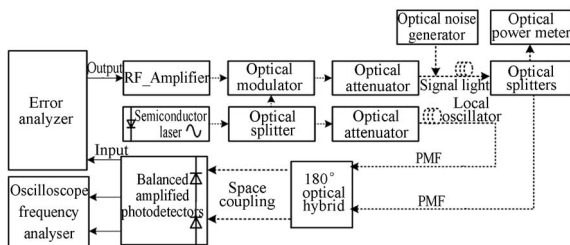


图 8 平衡探测相干灵敏度测试框图

Fig. 8 Block diagram of sensitivity test of coherence detection

相干探测灵敏度测试时, 半导体激光器输出波长为 1 550 nm 的光波。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; 另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 后作为相位调制器的调制信号。两路光信号通过 180° 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的探测光敏面上, 平衡光电探测器的输出端接误差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。

通过改变本振光功率的输出功率, 相干探测实验对通信速率分别为 2.5, 5 Gb/s 的空间耦合平衡探测器进行了灵敏度测试。实验中本振功率在 -10~15 dBm 变化, 选取本振功率为 -6, -3, 0, 3, 6, 9, 12 dBm 7 个本振功率点进行测试, 实验结果与理论分析值对比如图 9 所示。

从图 9 中可以看出, 在误码率分别为  $10^{-12}$ 、 $10^{-6}$  的条件下, 相干探测灵敏度随着本振功率的

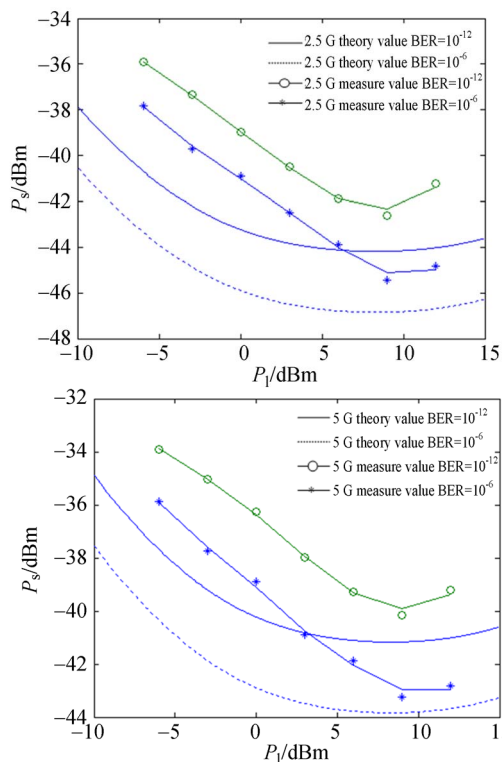


图 9 相干探测灵敏度测试图

Fig. 9 Sensitivity to contrast of coherence detection

增大先增大后减小, 存在最佳本振功率, 此时相干探测灵敏度的值最大。在误码率为  $10^{-12}$ 、通信速率为 5 Gb/s 的条件下, 其相干探测极限灵敏度为 -41.1 dBm, 测试结果为 -40.16 dBm; 误码率为  $10^{-6}$  的条件下, 测试结果为 -43.25 dBm。在误码率为  $10^{-12}$ 、通信速率为 2.5 Gb/s 的条件下, 其相干探测极限灵敏度为 -44.6 dBm, 测试结果为 -42.6 dBm; 误码率为  $10^{-6}$  的条件下测试结果为 -45.45 dBm。实际测试值与理论极限灵敏度稍有损耗, 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所致。在统一的环境参数下 (平衡一致性系数为 98.5%、RIN 噪声系数为 155 dB/Hz、探测器非线性自身参数  $k=0.2 \text{ mW}^{-1}$ ), 理论仿真分析结果与实际测试结果基本吻合, 进一步验证了所建立的本振功率与相干探测灵敏度间关系模型的正确性。通过实验系统优化本振光功率对提高相干探测系统的探测灵敏度有着重要意义。

### 5 结 论

本文建立了本振功率与相干探测灵敏度间的

关系模型,并选用武汉大学激光通信实验室自主研发的空间耦合平衡探测器,进行了本振光功率对相干探测灵敏度影响的实验研究。结果表明,本振光功率是影响空间相干探测灵敏度的重要因素。平衡探测器两探测光电管不可能完全一致,系统存在本振强度噪声,当本振光功率不断增大,系统的主要噪声为散粒噪声时,相干探测灵敏度随之增大;当系统本振过剩强度噪声为主要噪声源时,相干探测灵敏度增大到极限值后随之减小。

### 参考文献:

- [1] REGORY M, HEINE F, KÄMPFNER H, *et al.*. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(3):031202.
- [2] 吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. *中国光学*, 2013, 6(5):670-680.  
WU C J, YAN CH X, GAO ZH L. Overview of space laser communications [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(5):670-680. (in Chinese)
- [3] 张来线, 孙华燕, 樊桂花, 等. 猫眼逆向调制自由空间激光通信技术的研究进展[J]. *中国光学*, 2013, 6(5):681-691.  
ZHANG L X, SUN H Y, FAN G H, *et al.*. Progress in free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(5):681-691. (in Chinese)
- [4] 王旭, 王挺峰, 王弟男, 等. 无线光链路快速同步技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(2):245-252.  
WANG X, WANG T F, WANG D N, *et al.*. Rapid synchronization technology for wireless optical link[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2):245-252. (in Chinese)
- [5] CAPLAN D O, CARNEY J J, FITZGERALD, *et al.*. Multi-rate DPSK optical transceivers for free-space-applications [J]. *SPIE*, 2014, 8971:8971K.
- [6] ABBAS G L, CHAN V, YEE T. A dual-detector optical heterodyne receiver for local oscillator noise suppression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1984, 3(5):1110-1122.
- [7] 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):2409-2412.
- [8] HOLMES J F, RASK B J. Optimum optical local oscillator power levels in coherent detection systems [J]. *SPIE*, 1993, 1982:157-163.
- [9] HOLMES J F, RASK B J. Optimum optical local-oscillator power levels for coherent detection with photodiodes [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(6):927-933.
- [10] JOSHI A, BECKER D, WREE C, *et al.*. Coherent optical receiver system with balanced photodetection[J]. *SPIE*, 2006, 6243:62430E.
- [11] 马宗峰, 王纪强, 罗光明, 等. 全光纤相干激光雷达本振光功率优化[J]. *半导体光电*, 2009, 30(2):286-290.  
MA Z F, WANG J Q, LUO G M, *et al.*. Optimum optical local-oscillator power for all-fiber coherent lidar[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(2):286-290. (in Chinese)
- [12] 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):234-239.  
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):234-239. (in Chinese)
- [13] 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.  
GOU 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)

- [14] 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与实现[J].激光与光电子学进展,2014,51(7):070601.  
LIU H Y,ZHANG Y G,AI Y, *et al.*. Design and implementation of balance detector used in coherent optical communication system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51 (7): 070601. (in Chinese)
- [15] 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):125002.  
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):125002. (in Chinese)
- [16] 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.  
DAI Y H,LIU Y F,ZHOU H T, *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)

## 作者简介:



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

## 通讯作者:



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,主要研究方向为光通信系统。E-mail: 126959978@qq.com