

引用格式: LI Bin, LEI Hongjie, JIN Wenhua, et al. Approach for Measuring the Optimal Local Optical Power of Coherent Detection System (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10):1004005

李彬,雷宏杰,靳文华,等. 相干探测系统最佳本振光功率测量方法(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(10):1004005

## 相干探测系统最佳本振光功率测量方法(特邀)

李彬,雷宏杰,靳文华,岳亚洲

(中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所,西安 710065)

**摘 要:**相干探测系统受光电探测器非线性效应作用,难以达到散粒噪声极限下信噪比,存在最佳本振光功率使得系统信噪比最大。针对系统最佳本振光功率难以确定的问题,首先分析基于平衡探测器的最佳本振光功率理论,提出基于互相关法和频谱法直接测量外差信号并计算信噪比以确定最佳本振光功率,搭建实验完成了三型光电探测器对应的系统测试。结果表明,测量的信噪比随本振光功率的变化曲线与理论基本吻合,可以准确得到不同探测器对应的最佳本振光功率。本文方法可用于确定相干探测系统最佳本振光功率以及提高系统信噪比。

**关键词:**相干探测;本振光功率;外差探测;信噪比;互相关法;频谱法

中图分类号:TP79

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215010.1004005

### Approach for Measuring the Optimal Local Optical Power of Coherent Detection System (Invited)

LI Bin, LEI Hongjie, JIN Wenhua, YUE Yazhou

(Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, AVIC, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The Signal-to-Noise Ratio (SNR) of coherent detection system, which is affected by the non-linear effect of the photodetector, can not achieve the SNR level under the shot noise limited operation. Hence, there is an optimal local optical power to maximize the SNR. Aiming at the problem that the optimal local optical power of the system is difficult to determine, the theory of optimal local optical power based on balance detector is analyzed firstly. A method for determining the optimal local optical power which measure the heterodyne signal directly and calculate the SNR based on cross-correlation method and spectrum method is proposed subsequently. The experiments are conducted by setting up the experimental system for testing three type photodetector. The results demonstrate that the curve of measured SNR versus the local oscillator optical power basically consistent with the theoretical value, the optimal local optical power can be accurately measured for different detectors. The proposed method in this paper can be used to determine the optimal local optical power of a coherent detection system and improve the system SNR.

**Key words:** Coherent detection; Local optical power; Heterodyne detection; SNR; Cross-correlation method; Spectrum method

**OCIS Codes:** 040.2840; 280.3340; 060.2840

## 0 引言

光学相干探测具有探测灵敏度及精度高、对太阳背景光不敏感、接近散粒噪声极限探测能力等优点,广

第一作者(通讯作者):李彬(1987-),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为光学大气数据测量技术。Email:libinemail@163.com

导师:雷宏杰(1970-),男,研究员,博士,主要研究方向为导航、制导与控制技术。Email:hjlei@facri.com

收稿日期:2021-06-24;录用日期:2021-09-09

<http://www.photon.ac.cn>

泛应用于激光雷达、激光测量、激光通信、光纤传感等领域<sup>[1-4]</sup>。相干探测系统利用本振光对信号光的“放大”作用,极大地提高了系统信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)。理论上,信噪比随本振光功率的增大而增大,并最终趋于恒定值,达到散粒噪声极限下信噪比。实际上由于光电探测器响应的非线性,探测器输出光电流随着输入光功率的增大会出现饱和,信噪比反而会随着本振光功率的增大而减小,影响实际探测系统的应用<sup>[5-7]</sup>。1992年, FREHLICH R G<sup>[8]</sup>通过分析探测器的非线性特性,指出探测信噪比存在随本振光功率的增大而减小的趋势。1995年, HOLMES J F<sup>[9]</sup>研究了使用光电二极管的相干探测系统的最佳本振光功率理论,并给出通过测量探测器非线性参数确定最佳本振光功率的方法。2008年,马宗峰<sup>[10]</sup>对全光纤相干激光雷达本振光功率优化进行了研究,以带尾纤的PIN光电二极管作为探测器,给出了本振光功率对相干探测信噪比的影响和本振光功率的优化方法并进行了相应试验。以上研究均针对不含放大电路的光电二极管,而对于含有高增益放大电路的光电探测器集成模块,如PIN-FET光电探测器、双管差分双跨阻放大(Trans-impedance Amplifier, TIA)平衡光电探测器等,放大电路会先于光电二极管出现饱和,且随着技术及制造工艺的进步,光电探测器的饱和光电流越来越大<sup>[11-14]</sup>,上述确定最佳本振光功率的方法难以操作。针对该问题,提出了一种直接测量方法来确定最佳本振光功率,且可以满足相干探测系统实现最大信噪比的要求。

## 1 理论分析

### 1.1 最佳本振光功率理论

相干探测系统本振光与信号光混频后的光信号功率为

$$P_{in} = P_L + P_s + 2\sqrt{\eta P_L P_s} \cos(2\pi v_d t) \quad (1)$$

式中,  $P_{in}$  为入射探测器的外差光功率,  $P_L$  为本振光功率,  $P_s$  为信号光功率,  $\eta$  为空间角和偏振匹配等因素决定的混频效率, 对于光纤系统, 由于空间角准直和偏振匹配较好,  $\eta \approx 1$ ,  $v_d$  为外差信号频率。

混频后的光电流可表示为

$$i_d = \Re P_{in} = \Re P_L + \Re P_s + 2\Re \sqrt{P_L P_s} \cos(2\pi v_d t) \quad (2)$$

式中,  $\Re$  为探测器的响应度, 可将光电流区分为直流成分和交流成分, 交流成分为实际信号, 直流成分决定系统噪声。

$$i_{DC} = \Re P_L + \Re P_s \approx \Re P_L \quad (3)$$

$$i_{AC} = 2\Re \sqrt{P_L P_s} \cos(2\pi v_d t) \quad (4)$$

式(3)中的约等于是由于  $P_L \gg P_s$ 。

系统噪声主要包含热噪声  $\langle i_{th}^2 \rangle = \frac{4KT}{R_L} B$ 、散粒噪声  $\langle i_{sh}^2 \rangle = 2ei_{DC} B$ 、相对强度噪声  $\langle i_{RIN}^2 \rangle = i_{DC}^2 B \cdot 10^{0.1C_{RIN}}$ 。

其中,  $K$  为玻尔兹曼常数、 $e$  为电子电量、 $T$  为热力学温度、 $R_L$  为探测器负载阻抗、 $B$  为检测带宽、 $C_{RIN}$  为光源相对强度噪声系数。因此信噪比可表示为

$$SNR = \frac{\langle i_{AC} \rangle^2}{\langle i_{th}^2 \rangle + \langle i_{sh}^2 \rangle + \langle i_{RIN}^2 \rangle} = \frac{2\Re^2 P_L P_s}{\left( \frac{4KT}{R_L} + 2ei_{DC} + i_{DC}^2 \cdot 10^{0.1C_{RIN}} \right) B} \quad (5)$$

相干探测引入本振激光, 提高了探测灵敏度, 但同时增大了系统相对强度噪声水平。为解决该问题, 系统多采用平衡探测器, 可显著消除相对强度噪声、背景光噪声、暗电流等的影响。图1为平衡探测器的原理图, 两个性能一致的光电二极管并联, 分别探测等分的两路混频信号。由于两路光信号间引入  $180^\circ$  相移, 探测后的两路光电流相减可以将光电流直流分量消除, 同时由于两路相对强度噪声具有很强的相关性, 其功率、频率均相同, 而相位相反, 因此相对强度噪声经相减后消除, 而散粒噪声和热噪声为零均值白噪声且不相干, 因此相减后总的噪声为两路噪声之和。

因此, 采用平衡探测器探测后, 系统的信噪比可表示为

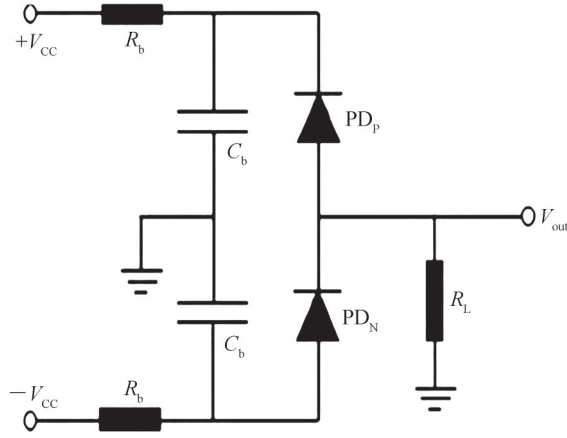


图1 平衡探测器内部原理

Fig.1 The schematic of balance detector

$$\text{SNR} = \frac{\langle i_{AC} \rangle^2}{\langle i_{th}^2 \rangle + \langle i_{sh}^2 \rangle} = \frac{2\Re^2 P_L P_s}{\left( \frac{4KT}{R_L} + 2e\Re P_L \right) B} \quad (6)$$

当本振光功率足够大,使得  $P_L \gg \frac{2KT}{e\Re R_L}$  时,信噪比为散粒噪声极限下的信噪比,表示为

$$\text{SNR} \approx \frac{\Re P_s}{eB} \quad (7)$$

由此可见,系统信噪比随本振光功率的增大而增大,并最终达到散粒噪声极限下的信噪比。由于光电探测器在高入射光功率情况下的空间电荷效应,引起其响应度的非线性特性,使得系统无法达到散粒噪声极限下信噪比,信噪比存在随本振光功率的增大而减小的趋势。HOLMES J F 给出了一个较为合理的描述光电流与入射光功率关系的模型<sup>[9]</sup>,表示为

$$i_d(P_m) = \Re P_m - \Re \alpha P_m^2 \quad (0 \leq P_m \leq 1/2\alpha) \quad (8)$$

式中, $\alpha$ 表示探测器响应的二次非线性系数,将式(1)代入式(8),并在  $P_L$  处做泰勒级数展开,可得

$$i_d = i_d(P_L) + \frac{\partial i_d}{\partial P_L} \cdot (P_m - P_L) = i_{DC} + i_{AC} \quad (9)$$

式中,  $i_{DC} = \Re P_L - \Re \alpha P_L^2$ ,  $i_{AC} = 2\Re(1 - 2\alpha P_L) \sqrt{P_L P_s} \cos(2\pi\nu_d t)$ 。

因此,根据上述求解信噪比的过程,可得考虑探测器非线性效应后的信噪比为(推导过程中功率单位为 mW)

$$\text{SNR} = \frac{\Re P_s}{eB} \frac{(1 - 2\alpha P_L)^2 P_L}{P_L(1 - \alpha P_L) + \frac{2000KT}{\Re e R_L}} \quad (10)$$

根据式(10)可得本振光功率及非线性系数对信噪比的影响,如图2所示。为清晰描述,图中仅画出部分  $\alpha$  对应的曲线,也可根据需要画出其他  $\alpha$  对应的曲线,数据使用散粒噪声极限下的信噪比(7)进行了归一化。

由图2可知,对于特定  $\alpha$ ,系统存在最佳本振光功率使得信噪比最大,不同  $\alpha$  对应的最佳本振光功率不同,若已知  $\alpha$ ,便可由图2确定最佳本振光功率。

HOLMES J F 和马宗峰都提出了通过搭建测试装置获得探测器的  $i_d - P_m$  曲线,通过最小二乘法拟合曲线的方式确定  $\alpha$ <sup>[8-9]</sup>。但该方法在含放大电路的光电探测器的系统中难以应用,原因是文献方法测量针对单光电二极管,而实际中用于相干探测的光电探测器大多与放大电路集成封装于一体,且放大电路的增益通常较高,运用文献方法测试时放大电路会先于光电二极管出现饱和,无法准确测出光电探测器的非线性系数。此外,该方法是一种间接的测量方法,其精度取决于信噪比模型及数据拟合处理的误差。

根据图2的变化规律,任意探测器对应的信噪比均存在极大值,有可能通过直接测量外差信号并计算信噪比极大值的方法确定最佳本振光功率。

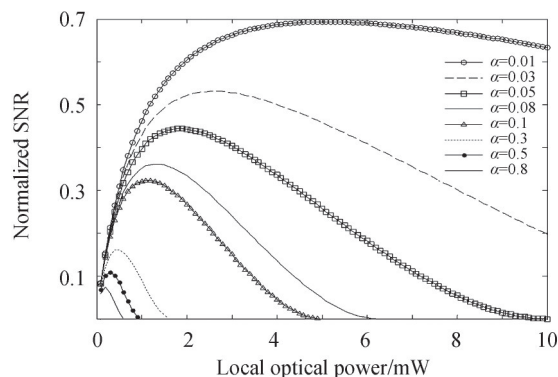


图2 信噪比随本振功率及非线性系数变化曲线

Fig.2 The curve of SNR with local oscillator optical power and nonlinear coefficient of photodetector

## 1.2 最佳本振光功率确定方法

针对平衡探测器等含高增益放大电路的光电探测器的系统最佳本振光功率难以确定的问题,提出一种确定最佳本振光功率的直接测量方法,表述为:1)合理设计相干探测实验系统,产生固定频率的外差信号;2)本振光路中增加光衰减器,从小到大调节光衰减器的插损以改变本振光功率值;3)每调节一次光衰减器,通过采集平衡光电探测器输出的外差信号,并通过互相关法和频谱法计算信号的信噪比;4)比较得到的一系列信噪比值,最大值对应的本振光功率即为最佳本振光功率。

张军华<sup>[15]</sup>在针对地震资料信噪比定量计算及比较研究中,采用互相关法和频谱法计算了地震资料的信噪比,取得了较好的效果。结合实际应用,互相关法可表述为取连续采集的 $N$ 等份数据作为信号,根据维纳-欣钦定理,功率有限信号的功率谱函数与自相关函数是一对傅立叶变换,在频域内对功率谱函数积分等于自相关函数零点值,即自相关函数零点值等于采集信号的总功率。同时,由于信号具有相关性,而噪声不具有相关性,求相邻信号的互相关函数并取其最大值可视为信号功率,因此可根据(11)计算系统的信噪比。

$$\text{SNR} = \frac{N \sum_{i=1}^{N-1} R_{i,i+1}}{(N-1) \sum_{i=1}^N R_{i,i}(0) - N \sum_{i=1}^{N-1} R_{i,i+1}} \quad (11)$$

式中, $R_{i,i+1}$ 为相邻两份数据的互相关运算最大值, $R_{i,i}(0)$ 为各等份数据自相关运算零点值。

频谱法假定信号是在频域有一定的频带范围的窄带信号,在信号频带以外的均为噪声。因此,如果能确定信号频带范围,就可以计算出信号和噪声的能量,从而算出近似的信噪比。具体的方法是:取 $M(M \geq 1)$ 等份采集数据,利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法分别计算各份数据的频谱,对频谱取模值后求平方得到功率谱,将 $M$ 个功率谱相累加得到最终的功率谱。如图3所示,信号在频域中会出现一个峰值, $f_L$ 为信号的最低截至频率, $f_H$ 为信号的最高截至频率, $f_c$ 为测量带宽, $|X(f)|^2$ 表示功率谱密度(Power Spectral Density, PSD),若不考虑信号频带内的噪声,将 $f_L \sim f_H$ 间的功率谱密度值相累加视为信号功

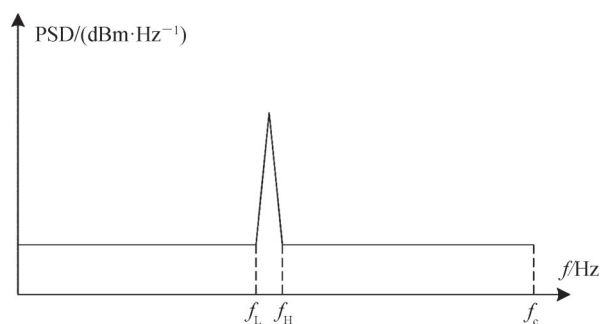


图3 信号功率谱示意图

Fig.3 Schematic of power spectrum of a narrowband signal

率,将整个功率谱密度相加并减去信号功率视为噪声功率,可利用式(12)计算信噪比。

$$\text{SNR} = \frac{\sum_{f_i}^{f_H} |X(f)|^2}{\sum_0^{f_c} |X(f)|^2 - \sum_{f_i}^{f_H} |X(f)|^2} \quad (12)$$

## 2 仿真及实验分析

### 2.1 互相关法和频谱法误差分析

MATLAB中awgn函数可以对一指定函数序列加噪,生成特定信噪比的随机函数序列,利用awgn函数产生不同信噪比的随机序列,并使用互相关法、频谱法分别求随机序列的信噪比,结果如图4所示,表明互相关法和频谱法可以准确地计算出随机序列的信噪比,最大误差不大于0.4 dB。

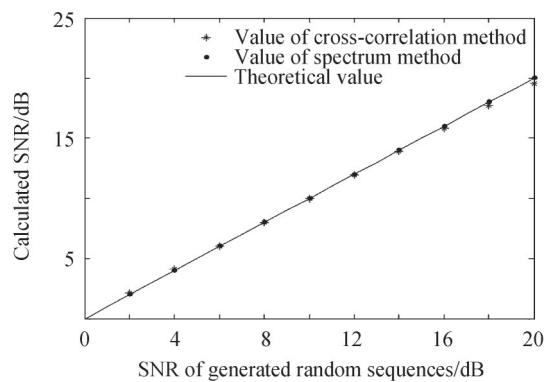


图4 互相关法和频谱法计算信噪比与理论值对比

Fig.4 Comparison of SNR calculated by cross-correlation method and spectrum method with theoretical SNR

### 2.2 最佳本振光功率测量实验

搭建的相干探测实验装置如图5,其工作原理是:分束器将激光器发出的激光分成两部分,一部分作为信号光进入声光调制器,另一部分作为本振光用于外差干涉,光衰减器2用于调节本振光功率大小,信号光与本振光进入50/50耦合器混频后分成功率相等的两部分,分别进入平衡探测器的两输入端,信号采集卡采集平衡探测器输出的外差信号,将采集数据传输至上位机,使用互相关法和频谱法计算其信噪比。

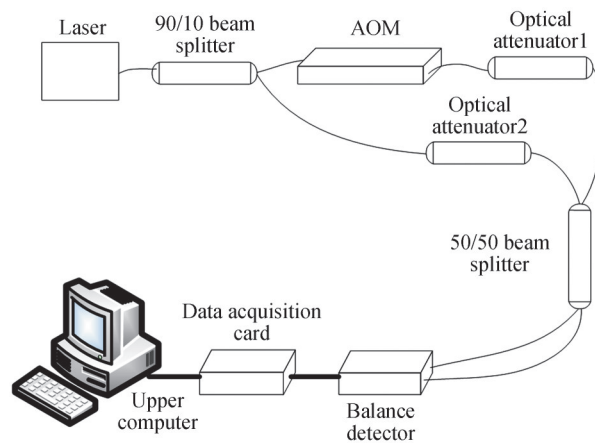


图5 实验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of experimental setup

实验分别测试了THORLAB公司PDB435C、PDB480C型以及中电44所GD45226Q型三种平衡光电探测器,表1中列出了各探测器的部分参数。声光调制器将信号光移频80 MHz,因此探测的外差信号是频率

为 80 MHz 左右的窄带信号,光衰减器 1 将信号光衰减至 50 nW 以模拟实际系统的回波信号(由于归一化信噪比与回波信号光强度无关,在回波信号可探测范围内,试验具有同样结论,信号光功率理论上最小可达噪声等效功率(Noise Equivalent Power, NEP)值),信号采集卡数据采样率为 1 GSa/s,通过改变光衰减器 2 得到不同本振光功率,采集外差信号并计算相应的信噪比。如图 6 所示,图中各探测器对应的测量信噪比均采用(7)进行了归一化处理。由图可知,三种型号探测器对应的最佳本振光功率分别为 3.08 mW、0.46 mW、2.9 mW。

表 1 实验用平衡探测器参数  
Table 1 Partial parameters of three types of balance detectors

Model	Responsivity $\mathfrak{R}$	3 dB bandwidth	Trans-impedance gain	NEP
PDB435C	1.0 A/W	DC~350 MHz	10 KV/A	15.28 pW/Hz <sup>1/2</sup>
PDB480C	0.94 A/W	30 K~1.6 G	16 KV/A	13.45 pW/Hz <sup>1/2</sup>
GD45226Q	0.95 A/W	DC~200 MHz	30 KV/A	10 pW/Hz <sup>1/2</sup>

信噪比变化理论曲线如图 2,对比具有相同最佳本振光功率的理论曲线,实际测量信噪比小于理论信噪比,假定信噪比的劣化是由于探测器内部放大电路和信号采集卡引入的噪声导致,则计算理论和实际测量信噪比最大值的差值可以计算出三次测量时信号放大及采集电路等电子系统的噪声系数,分别约为 1.6 dB、2.8 dB 和 2.3 dB。利用该噪声系数对理论曲线进行修正,如图 6 中虚线所示,为便于对比,图 6 中归一化信噪比已统一为无量纲小数,可以看出,各平衡探测器对应的系统信噪比随本振光功率变化的曲线与理论曲线基本吻合。此外,结合图 2 可以看出,PDB480C 探测器非线性系数较大,PDB435C 和 GD45226Q 非线性系数较小且数值相当。

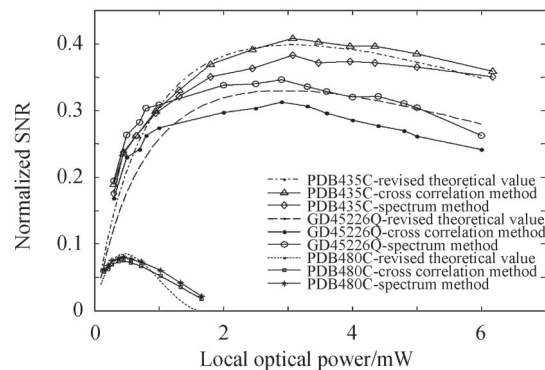


图 6 三种探测器实验结果  
Fig.6 Experimental results of three types of balance detectors

### 3 结论

针对相干探测系统本振光功率确定过程复杂难以确定的问题,通过理论分析,提出基于互相关法和频谱法确定最佳本振光功率的直接测量方法。首先对互相关法和频谱法的计算误差进行了分析,随后搭建实验完成了针对三种不同型号光电探测器的系统测试,得到了最佳本振光功率测量结果。同时,对比了测量信噪比随本振光功率的变化曲线和具有相同最佳本振光功率的理论曲线,通过噪声系数修正,表明测量曲线与理论曲线基本吻合。所提出的直接测量方法可以准确测量出不同探测器对应的最佳本振光功率。

#### 参考文献

- [1] LIU Zhengliang, BARLOW J, CHAN P, et al. A review of progress and applications of pulsed Doppler wind lidars [J]. Remote Sensing, 2019, 11(21):12522.
  - [2] KAMEYAMA S, ANDO T, ASAKA K, et al. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing [J]. Applied Optics, 2007, 46(11):1953-1962.
  - [3] JIN Xiaomei, ZHU Wenyue, LIU Qing. Application research of laser coherent wind technology [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2020, 15(3):161-173.
- 金效梅, 朱文越, 刘庆. 激光相干测风技术应用研究 [J]. 大气与环境光学报, 2020, 15(3):161-173.

- [4] YANG Wuhao, ZHANG Pu, YANG Xinfeng, et al. Performance optimization and experimental research of continuous wave coherent wind lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4):0401004.  
杨昊昊, 张普, 杨新锋, 等. 连续模式相干测风激光雷达性能优化分析及实验研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(4): 0401004.
- [5] FAN Zhe, ZHANG Chunxi, NIU Yanxiong, et al. Impact of photodetector's nonlinear response on coherent laser Doppler speedometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7):2103-2107.  
范哲, 张春熹, 牛燕雄, 等. 光电探测器非线性响应对相干激光多普勒测速仪的影响[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7):2103-2107.
- [6] WEI Tianwen, WANG Chong, SHANGGUAN Mingjia, et al. Effect of detector nonlinear response on visibility lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55:110402.  
魏天问, 王冲, 上官明佳, 等. 探测器非线性响应对能见度激光雷达的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55:110402.
- [7] BU Zhichao. Study on the system design and data processing algorithm for coherent Doppler wind lidar[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.  
步志超. 相干测风激光雷达系统设计及数据处理算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [8] FREHLICH R G. Estimation of the nonlinearity of a photodetector[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(28):5926-5929.
- [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] MA Zongfeng, WANG Jiqiang, LUO Guangming, et al. Optimum optical local oscillator power for all fiber coherent lidar [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(2): 286-290.  
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.
- [11] WANG Jiaojiao, ZHAO Zeping, LIU Jianguo. Research progress and development trend of balanced photodetectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55:100001.  
王姣姣, 赵泽平, 刘建国. 光平衡探测器研究进展和发展趋势分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55:100001.
- [12] GAO Long, WANG Chunhui, LI Yanchao, et al. Investigation of balanced detection and receiver for 1.55 $\mu\text{m}$  coherent wind lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 30(6):1064-1069.  
高龙, 王春晖, 李彦超, 等. 1.55 $\mu\text{m}$ 相干激光测风雷达平衡式探测接收实验[J]. *光子学报*, 2010, 30(6):1064-1069.
- [13] LI Yu, ZHOU Jian, NIE Xiaoming, et al. Research of laser velocimeter balanced detection system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53:020401.  
李玉, 周健, 聂晓明, 等. 激光测速仪平衡探测系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53:020401.
- [14] DAI Yonghong, LIANG Hexi, WANG Qiang, et al. Structure optimization of high speed space coherent optical balance detectors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10):2736-2743.  
代永红, 梁赫西, 武强, 等. 高速空间相干光平衡探测器结构优化[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10):2736-2743.
- [15] ZHANG Junhua, ZANG Shengtao, ZHOU Zhenxiao, et al. Quantitative computation and comparison of S/N ratio in seismic data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, 44(4):481-486.  
张军华, 藏胜涛, 周振晓, 等. 地震资料信噪比定量计算及方法比较[J]. *石油地球物理勘探*, 2009, 44(4):481-486.