

文章编号: 1001-3806(2015)01-0046-04

相干激光雷达平衡式相干探测技术研究

刘 兵¹, 陶 炜¹, 柯尊贵², 冯力天², 袁 菲², 李晓峰²

(1. 中国人民解放军驻二〇九所军事代表室, 成都 610041; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了分析影响平衡式相干探测信噪比的因素, 采用数学模型推导了平衡式相干探测原理和信噪比公式, 分析了影响平衡式相干探测信噪比的因素, 研制了用于相干激光雷达信号接收的平衡式激光探测器, 并通过相干雷达样机, 完成了气溶胶粒子发生米氏散射回波信号的探测。结果表明, 研制的平衡式激光探测器具有非常低的噪声和高探测灵敏度特性, 能较好地探测出大气中气溶胶粒子发生米氏散射的激光回波信号。

关键词: 激光技术; 探测器; 平衡式相干探测; 相干激光雷达; 多普勒频移

中图分类号: TN958.98; TN247 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.01.009

Balance coherent detection technology of coherent lidar

LIU Bing¹, TAO Wei¹, KE Zungui², FENG Litian², YUAN Fei², LI Xiaofeng²

(1. Military Representative Office of Chinese People's Liberation Army Accredited in No. 209 Institute, Chengdu 610041, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to analyze the influence factors of signal-to-noise ratio (SNR) of balanced coherent detection, balanced coherent detection process was studied and the SNR formula was derived based on the mathematical model. A balanced laser detector for signal receiving was developed, and Mie scattering echo signal of aerosol particles was detected by means of the coherent radar prototype. The results show that balanced laser detector is with very low noise and high sensitivity, and can detect the laser echo signal of Mie scattering of aerosol particles.

Key words: laser technique; detector; balance coherent detection; coherent lidar; Doppler frequency shift

引 言

相干激光雷达^[1]多用于软目标测量, 它主要以高功率激光作发射源, 使其与探测目标相互作用, 所获的信号回波光与雷达本振光进行相干混频, 混频信号经相关处理后, 可得到需要的探测信息^[2-3]。它具有高灵敏度、高信噪比等优势, 尤其是基于光纤激光器件的激光雷达^[4-6]更是国际上发展的主流方向。

由于软目标的信号回波光非常微弱, 因此对相干激光雷达的接收方式^[2]提出了新的要求, 目前熟知的接收手段主要有以下两种: (1) 单器件接收。将单路混频率注入到单只光电探测器上接收, 该探测方式在一定程度上可以满足探测要求, 但是对于有高信噪比要求的系统, 需要较高的本振光功率, 因此造成了本振光功率的低利用率; (2) 平衡式相干

探测^[7]。将接收到的混频信号分为强度相等的两路, 注入到两只光电探测器光敏面上, 经光电转换、差分电路处理, 获得高质量的电信号, 能有效消除探测器本身的随机热噪声和相位噪声, 具有高信噪比、本振光利用率高等优点。

1 平衡探测原理

1.1 原理介绍

平衡式相干探测原理如图 1 所示, 左部分为光信号入射端口, 右部分为射频信号出射端口。具体过程如下: 信号光 s 和本振光 p 经过耦合、分束、相位延迟等光学系统, 将信号光 s 和本振光 p 分成具

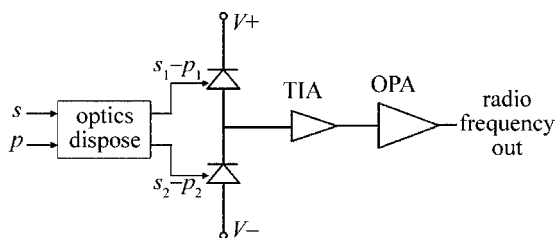


Fig. 1 Principle diagram of balance detector

作者简介: 刘 兵 (1968-), 男, 工程师, 主要研究领域为激光、电视跟踪器研究和质量监督。

E-mail: 229817210@qq.com

收稿日期: 2013-12-11; 收到修改稿日期: 2014-03-24

有 π 相位差的两束光信号(分光比为 ε)。然后,这两束光信号输入平衡探测器经跨阻放大器(transimpedance amplifier, TIA)和运算放大器(operational amplifier, OPA)进行相应转换和处理,最终输出含有所需探测信息的射频电信号。对该射频电信号进行A/D转换、频谱分析等,即获得检测结果。

1.2 平衡式相干探测原理

对于平衡式相干探测来讲,本振光和信号光采用两组相同的探测器^[6-7]进行接收。但是实际应用中,分光器件存在个体差异,容易导致两路光强并不相等;同时,光电探测器光电转换也有异同,即便有完全相同的两路信号光强输入,也会造成输出光电流不尽相同。基于这种现象,推导在此条件下的接收理论。平衡式相干探测接收模型^[7]如图2所示。

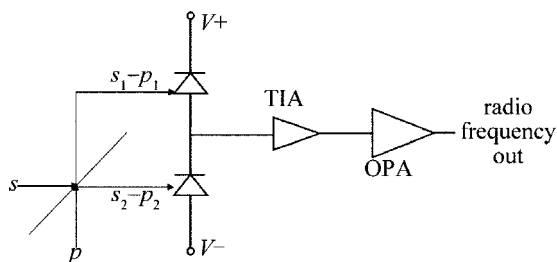


Fig. 2 Model of balance detector

如图2所示:假定信号光 s 为 $E_s \cos(\omega_s t + \varphi_s)$, 本振光 p 为 $E_p \cos(\omega_p t + \varphi_p)$, 分光比为 ε 。这样可以得到每路光的电场表达式为:

$$\begin{cases} e_{s,1} = \sqrt{1 - \varepsilon} E_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \\ e_{s,2} = \varepsilon E_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \\ e_{p,1} = \varepsilon E_p \cos(\omega_p t + \varphi_p) \\ e_{p,2} = \sqrt{1 - \varepsilon} E_p \cos(\omega_p t + \varphi_p) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_s 为信号光频率, φ_s 为信号光相位, ω_p 为本振光频率, φ_p 为本振光相位。在两个探测器上产生的电流大小为:

$$\begin{cases} i_1 = \alpha(e_{s,1} + e_{p,1})^2 = \alpha \{ [\sqrt{1 - \varepsilon} E_s \cos(\omega_s t + \varphi_s)]^2 + [\varepsilon E_p \cos(\omega_p t + \varphi_p)]^2 + \sqrt{(1 - \varepsilon)\varepsilon} E_s E_p \cos[(\omega_s - \omega_p)t + \varphi_s - \varphi_p] + \sqrt{(1 - \varepsilon)\varepsilon} E_s E_p \cos[(\omega_s + \omega_p)t + \varphi_s + \varphi_p] \} \\ i_2 = \alpha(e_{s,2} + e_{p,2})^2 = \alpha \{ [\varepsilon E_s \cos(\omega_s t + \varphi_s)]^2 + [\sqrt{1 - \varepsilon} E_p \cos(\omega_p t + \varphi_p)]^2 + \sqrt{(1 - \varepsilon)\varepsilon} E_s E_p \cos[(\omega_s - \omega_p)t + \varphi_s - \varphi_p] + \sqrt{(1 - \varepsilon)\varepsilon} E_s E_p \cos[(\omega_s + \omega_p)t + \varphi_s + \varphi_p] \} \end{cases} \quad (2)$$

式中, α 为光电转换系数。根据光电探测器响应物理机理,光频分量在光电探测器上只能产生直流分量,而 $(\omega_s + \omega_p)$ 太高,光电探测器不响应。结合光电探测器的响应的物理机理和数学运算,在两个光电探测器上产生的电流分别表示为:

$$\begin{cases} i_1 = \alpha \left[(1 - \varepsilon) \frac{E_s^2}{2} + \varepsilon \frac{E_p^2}{2} + \sqrt{(1 - \varepsilon)\varepsilon} E_s E_p \cos(\omega_{IF} t + \Delta\varphi) \right] \\ i_2 = \alpha \left[\varepsilon \frac{E_s^2}{2} + (1 - \varepsilon) \frac{E_p^2}{2} + \sqrt{(1 - \varepsilon)\varepsilon} E_s E_p \cos(\omega_{IF} t + \Delta\varphi) \right] \end{cases} \quad (3)$$

产生的光电流经过后续电路的隔直、中频放大后,最后剩下的交流中频分量为:

$$i_{IF} = \alpha \sqrt{(1 - \varepsilon)\varepsilon} E_s E_p \cos(\omega_{IF} t + \Delta\varphi) \quad (4)$$

式中,对应光电探测器的中频信号功率为:

$$P_{IF} = i_{IF}^2 R_d = [\alpha^2 \sqrt{(1 - \varepsilon)\varepsilon} E_s E_p \cos(\omega_{IF} t + \Delta\varphi)]^2 R_d = 4\alpha^2 (1 - \varepsilon)\varepsilon P_s P_p \times \cos(\omega_{IF} t + \Delta\varphi) R_d \quad (5)$$

式中, P_p 为本振光功率, P_s 为信号光功率, R_d 为光电探测器负载。在外差探测情况下,光电探测器的噪声功率可以表示为:

$$P_n = 2M^2 e [\alpha(P_p + P_s + P_b) + i_d] \times \Delta f_{IF} R_d + 4k_B T \Delta f_{IF} R_d \quad (6)$$

式中, M 为光电二极管的内部增益, e 为光路的电场, P_b 为背景光功率, i_d 为探测器暗电流, Δf_{IF} 为放大器带宽, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为工作温度;第1项为散粒噪声;第2项 $(4k_B T \Delta f_{IF} R_d)$ 为热噪声^[7-8]。由于本振光远大于信号光,由其引入的散粒噪声远大于其它散粒噪声和热噪声,所以两只光电探测器上的噪声^[9-10]可以表示为:

$$\begin{cases} P_{n,1} = 2M^2 e \alpha \varepsilon P_p \Delta f_{IF} R_d \\ P_{n,2} = 2M^2 e \alpha (1 - \varepsilon) P_p \Delta f_{IF} R_d \end{cases} \quad (7)$$

本项目采用 PIN 光电二极管,所以 $M = 1$ ^[10]。采用平衡式外差探测,将利用本振光与信号光进行混频,使得中频信号在 P_s 的基础上增大 P_p 倍,可以极大地提高探测灵敏度。两只光电探测器上产生的中频信号电流之间存在 π 的相位差,因此器件得到的中频信号功率是两只器件的中频功率之和,且噪声具有随机性,其相位也具有随机性,经过差分处理后,会互相抵消可极大地降低系统噪声^[8]。系统接

收的信号功率 P_{sys} 和系统的噪声功率 $P_{s,n}$ 为:

$$\begin{cases} P_{sys} = 4M^2e\alpha^2\varepsilon(1-\varepsilon)P_pP_sR_d \\ P_{s,n} = 2M^2e\alpha(2\varepsilon-1)P_p\Delta f_{IF}R_d \end{cases} \quad (8)$$

这样可以得到系统的信噪比 R_{SNR} 为:

$$R_{SNR} = \frac{P_{sys}}{P_{s,n}} = \frac{4M^2e\alpha^2\varepsilon(1-\varepsilon)P_pP_sR_d}{2M^2e\alpha(2\varepsilon-1)P_p\Delta f_{IF}R_d} = \frac{2\alpha\varepsilon(1-\varepsilon)P_s}{(2\varepsilon-1)\Delta f_{IF}} \quad (9)$$

通过以上分析可以知道,选用的光电二极管响应度、响应时间特性的一致性是影响信噪比的重要因素,尽可能地选择响应度和响应时间相同的光电二极管可以通过差分尽量地降低系统噪声。同时,平衡式相干探测系统的信号比与光学系统的分光比有较大关系,尽量选择 1:1 的分光比有利于提高信噪比。

而对于单管器件探测^[9]时,本振光信号和回波信号的光全部由一个探测器接收,其随机噪声无法经过差分处理进行消除,因此有:

$$\begin{cases} P_{sys} = 2M^2e\alpha^2P_pP_sR_d \\ P_{s,n} = 2M^2e\alpha P_p\Delta f_{IF}R_d \end{cases} \quad (10)$$

这样可以得到单管器件接收模式的信噪比为:

$$R_{SNR} = \frac{P_{sys}}{P_{s,n}} = \frac{2M^2e\alpha^2P_pP_sR_d}{2M^2e\alpha P_p\Delta f_{IF}R_d} = \frac{\alpha P_s}{\Delta f_{IF}} \quad (11)$$

通过对比(9)式和(11)式可以知道,当分光比 ε 在 0.293 ~ 0.707 之间时,平衡式相干探测方式信噪比高于单管探测模式,且分光比越接近 0.5,其信噪比越高。同时考虑到工程实际中,两只光电二极管的响应度、响应时间特性不可能完全一致,因此,需要通过调节平衡探测器两只光电二极管之间的光耦合效率使得信噪比最佳。

2 平衡式相干探测器设计

在设计平衡式相干探测器组件的时候,尽可能地选用两只响应度、响应时间特性一致的光电二极管,使光电探测器的随机噪声尽量相同,以便通过差分处理降低系统的噪声。同时,对器件结构和耦合方式进行优化,增加监测调整端口 M_1 (平衡探测器光功率监控正端)和 M_2 (平衡探测器光功率监控负端),根据 M_1 和 M_2 的输出电压不同,调整 input 1 与 input 2 光耦合头的光耦合效率,弥补分光系统引起的信噪比降低,使系统达到最佳信噪比要求。器件的原理图如图 3a 所示,实物图如图 3b 所示。

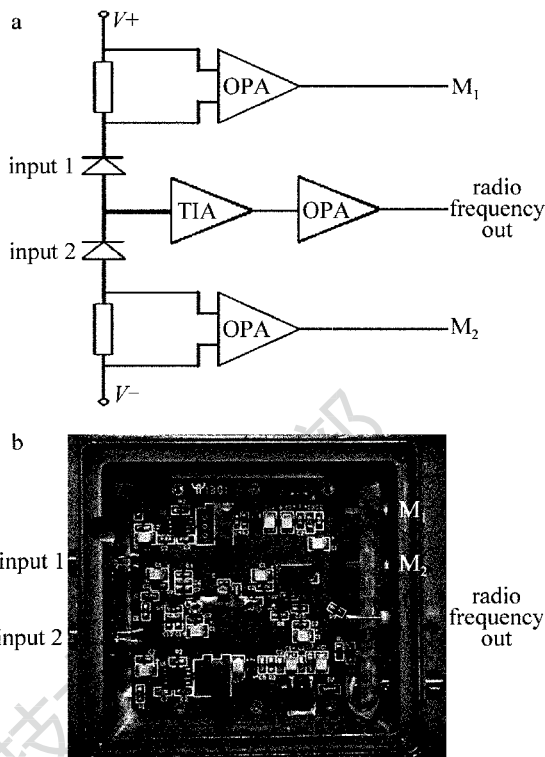


Fig. 3 Diagram and practicality of a balance detector
a—diagram of balance detector b—practicality of balance detector

3 实验验证

通过一台相干激光雷达原理样机进行气溶胶速度多普勒频率探测,验证了制作的平衡相干探测器具有良好的信噪比和弱信号的探测能力。使用平衡相干探测器的相干激光雷达示意框图如图 4 所示。

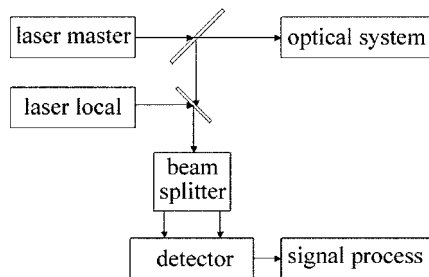


Fig. 4 Detect diagram of radar

该雷达系统以一只波长为 1550nm 的高功率窄线宽激光器做发射光源,同时该激光器分出一路毫瓦级小功率激光作本振光。高功率激光经收发合一天线发射至探测空域,与气溶胶粒子发生米氏散射,其后向散射光经天线接收与本振光相干混频。混频光信号经雷达分光器件分为强度接近的两路,注入至平衡探测器。混频信号进入平衡探测器,经光电

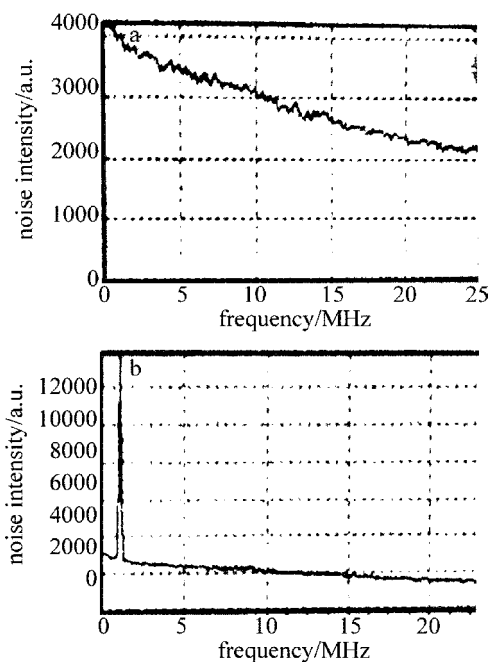


Fig. 5 Background noise and signal detection results of balance detector
a—background noise b—signal detection results

转换、差分放大等手段处理后,输出射频电信号进行激光雷达信息处理系统,获得所需探测信号。如图5所示。

图5为平衡探测器本底噪声(见图5a)与信号探测结果(见图5b),图中横轴坐标表示系统频率值,纵轴坐标为噪声经快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)归一化的结果。在图5b中低频处(约1MHz处)有一个归一化强度为12000左右的尖峰,该尖峰为大气气溶胶多普勒频移信号,该尖峰对应横轴频率值与相关反演算法结合,即可计算出气溶胶运动速率。

4 结论

研究了用于相干激光雷达信号接收的平衡式相

干接收方法,推导了平衡式相干探测过程的数学模型和信噪比公式,分析了影响平衡式相干探测信噪比的因素。研制了用于相干激光雷达信号接收的平衡式激光探测器,并通过相干激光雷达原理样机对探测器进行了实际测试,研制的平衡探测器具有较低的本底噪声以及较高的探测灵敏度,在毫瓦级本振光条件下,较好地探测出大气中气溶胶粒子发生米氏散射的激光回波信号。

参 考 文 献

- [1] DAI Y J. The principle of lidar[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002:256-280 (in Chinese).
- [2] LIU Zh Sh, WANG Zh J, WU S H, et al. Fine measuring technique and application for sea surface wind by mobile Doppler wind lidar[J]. Optical Engineering, 2009, 48(6): 066002.
- [3] CAIOU J P, VALLA M, CANAT G, et al. New effective sources for coherent lidars[J]. Proceedings of the SPIE, 2007, 6750: 675007.
- [4] PEARSON G N, EACOCK J R. A fiber-based coherent Doppler lidar for atmospheric monitoring[J]. Proceedings of the SPIE, 2002, 4484: 51-57.
- [5] LINELOW P. Fiber based coherent lidars for remote wind sensing [D]. Copenhagen, Denmark: Technical University of Denmark, 2007: 31-72.
- [6] KAMEYAMA S, ANDO T, ASAKA K, et al. Compact all-fiber pulse coherent Doppler lidar system for wind sensing[J]. Applied Optics, 2007, 46(11): 1953-1962.
- [7] GAO L, WANG Ch H, LI Y Ch, et al. Balance coherent detect experiment of 1.55 μm wind lidar[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(6): 1064-1069 (in Chinese).
- [8] ASAKA K, TAKAYUKI Y, YOSHIHITO O H. 1.5 μm eye safe coherent lidar system for wind velocity measurement[J]. Proceedings of the SPIE, 2001, 4153: 321-328.
- [9] FINK D. Coherent detection signal-to-noise[J]. Applied Optics, 1975, 14(3): 689-690.
- [10] JOSHI A, BECKER D, DATTA Sh. Low noise InGaAs balanced pin photo-receiver for space based remote sensing applications at 2 micron wave length[J]. Proceedings of the SPIE, 2008, 7095: 1-8.