

光电探测器非线性响应对相干激光多普勒测速仪的影响

范 哲, 张春熹, 牛燕雄, 孙绪印, 罗 娜, 潘建业

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 光电探测器是相干激光多普勒测速仪的重要组成部分, 其对光信号强度的响应特性直接影响着系统的信噪比。为了提高系统探测性能, 从光电探测器非线性响应对相干激光多普勒测速仪的影响的角度进行研究。通过对响应函数进行多项式分析, 研究输入拍频信号为带偏置的余弦信号时的输出电压波形, 对比分析存在二阶非线性响应与在线性响应下的信号, 从理论上说明探测器非线性响应对系统信噪比的影响。并对测速仪进行了对比实验, 在对非线性响应进行抑制之后, 系统信噪比由 16 dB 提高到 35 dB, 从实验角度验证了分析的正确性。

关键词: 激光多普勒测速; 光电探测器; 非线性响应; 信噪比

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2103-05

Impact of photodetector's nonlinear response on coherent laser Doppler speedometer

Fan Zhe, Zhang Chunxi, Niu Yanxiong, Sun Xuyin, Luo Na, Pan Jianye

(School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Photodetector is an important part of coherent laser Doppler speedometer, and the optical intensity response of which has a great impact on the system's signal-to-noise ratio (SNR). In order to improve the detection performance, the impact of photodetector's nonlinear response on the laser Doppler speedometer was studied. The response function was deduced by using polynomial analysis. The output voltage waveform under nonlinear response was compared with that under linear response, theoretically demonstrating the impact of photodetector's nonlinear response on the SNR of the system. Comparison experiments indicate that through the suppression of the nonlinear response, the SNR raises from 16 dB to 35 dB, which results in the correction of the analysis.

Key words: laser Doppler speedometer; photodetector; nonlinear response; SNR

收稿日期: 2013-11-10; 修订日期: 2013-12-22

作者简介: 范哲(1985-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达技术方面的研究。Email: rison424@163.com

导师简介: 张春熹(1965-), 男, 博士生导师, 主要从事惯性技术、光学传感与导航等研究。

0 引言

相干激光多普勒测速仪是基于多普勒效应的高精度速度测量仪器,具有探测精度高、被截获概率低、系统结构简单、实时性强等优点,是特殊复杂战场下运动平台组合导航系统的重要部件^[1-2]。人们对它在目标跟踪探测、振动测量以及测风等领域的应用具有浓厚的研究兴趣^[3-4]。

随着工程应用对测速精度要求的不断提高,对相干激光多普勒测速系统信噪比提出了更高的要求,这就要求对系统光学器件的工作性能进行深入研究,为优化系统探测性能提供研究基础。Marting D. and Baudouin D. C.^[5]通过分析探测器物理工作机理建立了强光照射下非线性响应的数学模型;Zhuang J. Y.^[6]采用局部算法补偿光电探测器非线性响应来提高压缩传感中图像重建的质量;Frehlich R. G.^[7]通过引入曲线拟合系数对探测非线性进行了分析;马宗峰等^[8]利用该模型对连续波激光雷达的本振光功率进行了优化。不过该模型只进行了静态分析,即利用平均功率计算信噪比最大值,没有将拍频波信号波包看成是余弦波,实际上忽略了探测器非线性对于余弦波的影响。

文中分析了光电探测器对相干激光多普勒测速仪信号信噪比的影响:第 1 部分描述了相干激光多普勒测速仪的工作原理;第 2 部分建立探测器响应模型;第 3 部分通过数值仿真分析了光电探测器非线性响应对信噪比的影响;第 4 部分通过实验对分析进行了验证。

1 系统工作原理

相干激光多普勒测速系统结构如图 1 所示。窄线宽激光器产生单频单偏振激光,该输入光经耦合器 1 分为信号光和本振光,与耦合器 2 共同组成马赫-曾德干涉仪。信号光经环形器和准直器输出,打到移动目标后产生多普勒频移并返回,准直器接收返回信号光;本振光经过偏振控制器后由耦合器 2 输出。光电探测器探测返回信号光和本振光产生的拍频信号,利用数据采集卡对输出电压信号进行采集,通过频率提取算法提取出多普勒频移值,经过运算即可求出目标的移动速度。

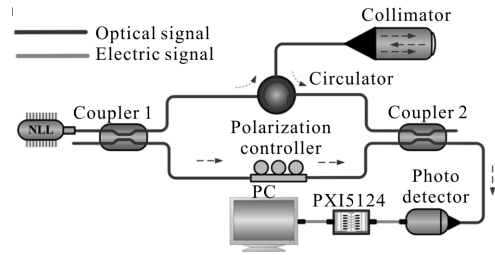


图 1 相干激光多普勒测速系统

Fig.1 System diagram of the coherent laser Doppler speedometer

系统中使用的是线偏振窄线宽激光,通过调节偏振控制器,使拍频信号光功率达到最大,即本振光与信号光偏振方向保持一致,此时本振光场强 $E_1(t)$ 与信号光场强 $E_2(t)$ 的表达式分别可以写为:

$$E_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \quad (1)$$

$$E_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \quad (2)$$

$$\omega_2 = \omega_1 + \omega_d \quad (3)$$

式中: A_1 和 A_2 , ω_1 和 ω_2 , ϕ_1 和 ϕ_2 分别为本振光和信号光的振幅、角频率和初相位; ω_d 为多普勒效应引起的信号光角频率的变化量。信号光和本振光在耦合器 2 处产生拍频,其光强可以表示为:

$$I(t) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[\omega_d t + (\phi_2 - \phi_1)] \quad (4)$$

其中, $\phi_2 - \phi_1$ 较于 $\omega_d t$ 变化相对缓慢,忽略其影响,光强可以表示成为带偏置的余弦波,该光强信号与探测器输出信号电压值成函数关系。对采集到的电压信号进行快速傅里叶变换(FFT),可以求得多普勒角频率值 ω_d ,从而求得

$$v = \frac{\omega_d \lambda}{4\pi \cos\theta} \quad (5)$$

式中: v 为目标在激光束径向的相对运动速度; λ 为激光波长; θ 为激光束与目标运动方向之间的夹角。

2 光电探测器响应

光电探测器的作用是实现光电变换,把接收到的光强信号转换成电压信号,其具有噪声低、响应速度快等优点。当拍频信号照射到探测器表面,输出电压可以表示为入射光功率或入射光强度的函数:

$$V = G(P) = G(A_{re} I) \quad (6)$$

式中: P 为入射光功率; I 为入射光强; A_{re} 为探测器接收表面积; $G(x)$ 表示探测器的响应函数。通常情况下

探测器的响应并非完全线性的,对响应函数进行泰勒多项式展开有:

$$G(P)=\sum_{n=0}^{\infty} S_n \cdot (A_{re} I)^n \quad (7)$$

式中: S_n 是 n 阶多项式系数。因为在实际测量中的目标多为粗糙表面,返回信号光强会远远低于本振光光强,公式(4)中第二项可以忽略,则拍频信号光强可表示为:

$$I(t)=A_1^2+2A_1 A_2 \cos(\omega_d t) \quad (8)$$

将公式(8)代入公式(7),考虑 N 阶非线性响应可以得到

$$\begin{aligned} G_N(P)= & \sum_{n=0}^N S_n A_{re}^n (A_1^2)^n + \\ & \sum_{n=1}^N C_n^1 S_n A_{re}^n (A_1^2)^{n-1} (2A_1 A_2) \cos(\omega_d t) + \\ & \sum_{n=2}^N C_n^2 S_n A_{re}^n (A_1^2)^{n-2} (2A_1 A_2)^2 \cos^2(\omega_d t) + \\ & \sum_{n=3}^N C_n^3 S_n A_{re}^n (A_1^2)^{n-3} (2A_1 A_2)^3 \cos^3(\omega_d t) + \\ & \sum_{n=4}^N C_n^4 S_n A_{re}^n (A_1^2)^{n-4} (2A_1 A_2)^4 \cos^4(\omega_d t) + \dots \quad (9) \end{aligned}$$

式中: C_n^1 、 C_n^2 、 C_n^3 、 C_n^4 ...分别是在总体 n 中选取 1、2、3、4...个样本的组合。

当 $N=1$ 时,有

$$G_1(P)=S_0+S_1 A_{re} (A_1^2+2A_1 A_2 \cos(\omega_d t)) \quad (10)$$

即探测器不存在非线性响应时,输入为带偏置的余弦信号,输出为波形相同的电压信号,没有信号失真。

3 非线性响应的影响

为了研究探测器非线性响应激光测速仪信号的影响,可以将公式(9)展开为:

$$\begin{aligned} G_N(P)= & \sum_{n=0}^N S_n A_{re}^n (A_1^2)^n + \\ & \sum_{n=1}^N C_n^1 S_n A_{re}^n (A_1^2)^{n-1} (2A_1 A_2) \cos(\omega_d t) + \\ & \frac{1}{2} \sum_{n=2}^N C_n^2 S_n A_{re}^n (A_1^2)^{n-2} (2A_1 A_2)^2 (1+\cos(2\omega_d t)) + \\ & \frac{1}{4} \sum_{n=3}^N C_n^3 S_n A_{re}^n (A_1^2)^{n-3} (2A_1 A_2)^3 (3\cos(\omega_d t)+\cos(3\omega_d t)) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{8} \sum_{n=4}^N C_n^4 S_n A_{re}^n (A_1^2)^{n-4} (2A_1 A_2)^4 (3+4\cos(2\omega_d t)+ \\ & \cos(4\omega_d t)) \quad (11) \end{aligned}$$

在式中出现了 $\cos(\omega_d t)$ 的倍频项,如 $\cos(2\omega_d t)$ 、 $\cos(3\omega_d t)$ 等。

如果只考虑五阶非线性影响,即对探测器响应进行五次多项式拟合,则公式(11)应该写为:

$$\begin{aligned} G_2(P)= & S_0+S_1 A_{re} A_1^2+S_2 A_{re}^2 A_1^4+2S_2 A_{re}^2 A_1^2 A_2^2+ \\ & 2S_1 A_{re} A_1 A_2 \cos(\omega_d t)+4S_2 A_{re}^2 A_1^3 A_2 \cos(\omega_d t)+ \\ & 2S_2 A_{re}^2 A_1^2 A_2^2 \cos(2\omega_d t) \quad (12) \end{aligned}$$

从式中可以看出,前四项为直流项,第五项和第六项的和为拍频信号项,最后一项为倍频项。与只存在线性响应的公式(10)进行对比,不仅仅出现了倍频分量,而且拍频信号也变为多项式和的形式。因为实际当中探测器响应函数在其功率响应范围内单调递增,并且因为饱和效应其响应是非发散的,所以 $S_1>0$,并且二阶非线性系数 S_2 与 S_1 的符号相反,则有 $S_2<0$ 。对探测器非线性响应进行仿真分析,仿真参数如表 1 所示。表中, S_{10} 、 S_{11} 、 S_{20} 、 S_{21} 和 S_{22} 的取值以型号为 PFTM901-001 的光电探测器通过实验检测响应曲线分别经一次和二次多项式拟合得到的,拟合结果如图 2 所示。

表 1 用于数值模拟的系统参数

Tab.1 System parameters used for numerical simulations

System parameter	Value
Doppler frequency/MHz	1
Sample rate/MHz	10
LO power/ μ W	70
Signal power/ μ W	1
FFT point	16 384
Coefficient of linear fitting S_{10}/V	-1.092 94
Coefficient of linear fitting $S_{11}/(V/\mu W)$	0.023 37
Coefficient of 2nd order polynomial fitting S_{20}/V	-1.701 9
Coefficient of 2nd order polynomial fitting $S_{21}/(V/\mu W)$	0.054 34
Coefficient of 2nd order polynomial fitting $S_{22}/(V/\mu W^2)$	-3.096 63e-4

当光电探测器输入如图 3 所示拍频光信号时,其输出电压在线性和 2 次拟合响应曲线下的输出信号波形和频谱分别如图 4 和图 5 所示。对比图中频

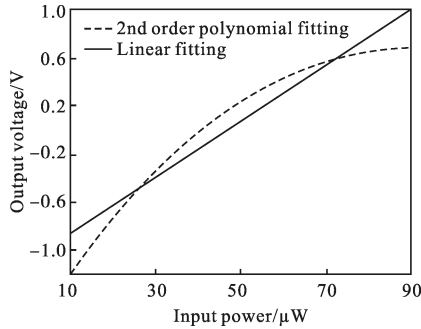


图 2 探测器响应曲线

Fig.2 Response curve of the photodetector

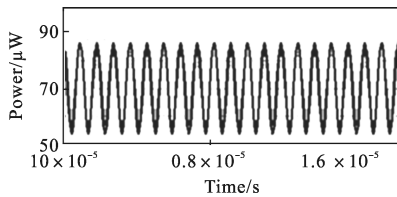


图 3 拍频信号输入波形

Fig.3 Input beat signal

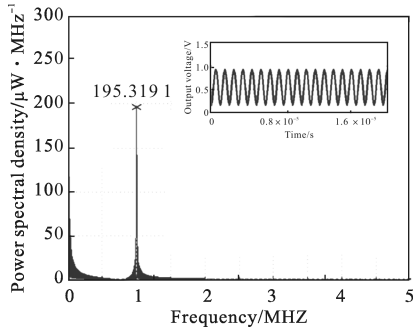


图 4 线性拟合曲线下输出信号波形和频谱

Fig.4 Output waveform and spectral under the linear fitted response curve

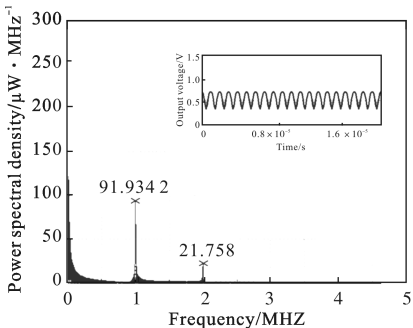


图 5 2 次多项式拟合曲线下输出信号波形和频谱

Fig.5 Output waveform and spectral under the 2nd order polynomial fitted response curve

谱,存在探测器 2 阶非线性响应时,其输出频谱在信号倍频处出现了 2 次谐振峰,该谐振峰值为 21.758 $\mu\text{W}/\text{MHz}$,并且信号的频谱峰值出现较大衰减,由 195.3191 $\mu\text{W}/\text{MHz}$ 降为 91.9342 $\mu\text{W}/\text{MHz}$ 。

光电探测器响应的主要噪声为散粒噪声^[9],将散粒噪声电压与 2 次谐振峰进行对比,以判断 2 次谐振峰的影响。散粒噪声电流的均方值可以表示为:

$$\langle i_s^2 \rangle = 2e \langle i \rangle B \quad (13)$$

式中: e 为电荷量; $\langle i \rangle$ 为探测器上的平均光电流; B 为检测带宽。因为 $2S_2 A_{re}^2 A_1^2 A_2^2 \gg 2e \langle i \rangle B R_e$, R_e 为探测器跨阻,且散粒噪声为白噪声,其功率谱密度平均分布在整個检测带宽范围内,所以 2 次谐振成为探测器的主要噪声,决定测速系统的信噪比。

非线性响应引起谐振峰可以通过改变系统参数,优化本振光功率的方法进行抑制^[8]。

4 实验验证

为了分析光电探测器对激光多普勒测速仪的影响,在实验室条件下对系统进行了测试,系统关键参数如表 2 所示。

表 2 系统关键参数

Tab.2 Key component of the system

Key component	Parameter	Value
Laser source	Wavelength/nm	1 550
	Power/mW	15
	Linewidth/kHz	1
PD	Bandwidth/MHz	35
	Resistance/k Ω	40
	Noise level/mV	0.26
Circulator	Directivity/dB	60
Optical antenna	Lens diameter/mm	2.3

利用 Agilent 4396B 频谱分析仪对光电探测器输出信号进行检测,观察其输出频谱,测试的实验结果如图 6 所示。

对测速仪系统参数进行优化,使本振光工作于探测器线性度较好区段后,测试结果如图 7 所示。

对比图 6 和图 7,在对探测器非线性响应进行抑制之后,信噪比由 16 dB 提高到 35 dB,表明系统探

测性能明显提高。

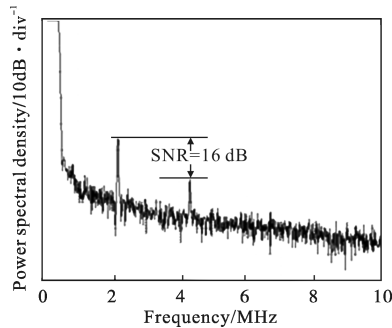


图6 存在非线性响应的测速仪输出信号频谱

Fig.6 Output spectral when nonlinear response exists

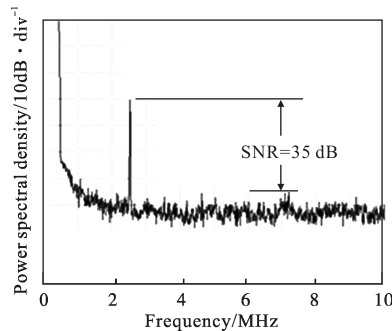


图7 非线性抑制之后测速仪输出信号频谱

Fig.7 Output spectral after nonlinear response is suppressed

5 结论

光电探测器非线性响应对相干激光多普勒测速仪系统信噪比起着重要影响。文中对光电探测器响应进行多项式分析,通过比较存在二阶非线性响应及线性响应下的电压信号输出,发现存在非线性响应时输出信号会产生谐波,而且频谱峰值会产生较大衰减,从而降低系统信噪比。分析了非线性响应是探测器的主要噪声。通过实验验证了在对探测器非线性响应进行抑制之后,系统探

测性能明显提高。

参考文献:

- [1] Sui Xiaolin, Zhou Shouhuan, Chen Nianjiang, et al. All fiber coherent Doppler lidar for space craft safe landing [C]// International Coherence on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM), 2012, 978-1-4673-2639-1: 198-202.
- [2] Philippov Valery, Codemard Christophe, Jeong Yoonchan, et al. High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications [J]. *Optics Letters*, 2004, 29 (22): 2590-2592.
- [3] Yang Fei, Ye Qing, Pan Zhengqing, et al. 100-mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application [J]. *Optics Communications*, 2012, 285: 149-152.
- [4] Zhu Xiaopeng, Liu Jiqiao, Bi Decang, et al. Development of an all-solid coherent Doppler wind lidar [J]. *Chinese Optics Letter*, 2012, 012801(3): 1-3.
- [5] Dentan Martin, Cremoux Baudouin D. Numerical simulation of the nonlinear response of a p-i-n photodiode under high illumination [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8 (8): 1137-1144.
- [6] Zhuang Jiayan, Chen Qian, Miao Zhuang, et al. The algorithm of regionally compensating nonlinear response of photo detector to improve the quality of image reconstruction for compressed sensing [C]//SPIE, 2013, 89080N: 8908-1-13.
- [7] Frehlich Rod G. Estimation of the nonlinearity of a photodetector [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(28): 5926-5929.
- [8] Ma Zongfeng, Wang Jiqiang, Luo Guangming, et al. Optimum optical local-oscillator power for all-fiber coherent lidar [J]. *Simiconductor Optoelectronics*, 2009, 30 (2): 286-290. (in Chinese)
- [9] Jelalian Albert V. *Laser Radar Systems* [M]. London: Artech House, 1992.