

文章编号: 1001-3806(2007)02-0117-03

## 激光雷达微多普勒效应的仿真研究

王学勤,董艳群,原 帅,盛美菊,张 骏\*  
(烟台大学 光电信息学院,烟台 264005)

**摘要:** 为了研究激光雷达中微多普勒效应的探测及其雷达回波信号中反应目标特征的微多普勒信息的提取问题,建立了激光雷达微多普勒效应的物理模型,对应用激光雷达探测由目标振动引起的微多普勒效应进行了仿真,并对仿真信号进行了分析,由于信号的时变性,引入了时-频域联合分析的方法。采用了短时傅里叶变换方法对仿真信号进行了时频分析,得到了能够较好地反映目标特征的微多普勒图像。结果表明,激光雷达适合于低振幅微多普勒效应的探测,应用时频分析方法能够有效地从雷达回波信号中提取出目标的微多普勒特征。

**关键词:** 信息光学;微多普勒;时频分析;振动特征;激光雷达;短时傅里叶变换(STFT)

**中图分类号:** TN958.98;O438 **文献标识码:** A

### Study on simulation of micro-Doppler effect in lidar

WANG Xue-qin, DONG Yan-qun, YUAN Shuai, SHENG Meijiu, ZHANG Jun

(Institute of Opto-Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

**Abstract:** In order to study the questions of micro-Doppler effect detection in a laser radar and the extraction of micro-Doppler features indicating target characteristics from radar returned signal, a physical model for micro-Doppler effect in laser radar was built up, then the simulation of the micro-Doppler effect in the laser radar induced by vibration of the target was conducted. Because of the signal is time-varying, joint time-frequency analysis method was introduced. Short time Fourier transform was used to analyze the simulated signal in the time-frequency domain, a micro-Doppler image that can demonstrate the target characteristics was generated. Results show that a laser radar is fit for the detection of low amplitude micro-Doppler effect, and micro-Doppler features can be extracted from radar returned signal effectively by means of time-frequency analysis method.

**Key words:** information optics; micro-Doppler; time-frequency analysis; vibrating signature; laser radar; short time Fourier transform (STFT)

## 引 言

当雷达与被测目标间存在相对运动时会产生多普勒频移,如果目标本身还存在振动或转动,则会对回波信号产生附加的频率调制,导致在目标的多普勒频率两侧产生边带,这种调制称为微多普勒现象<sup>[1]</sup>。例如:公路上行驶的汽车表面由发动机引起的机械振动<sup>[2]</sup>,直升飞机螺旋桨的转动,轮船上旋转的雷达天线,甚至人走路时双腿和双臂的摆动<sup>[3]</sup>,都可以看作是一种微多普勒信号。微多普勒现象能帮助确定目标的许多特性,它在目标的探测、分类、识别领域都具有很大的应用潜力<sup>[4]</sup>。美国、加拿大等一些发达国家在微多普勒现象的研究方面已经做了很多工作,有的成

果已经应用到了实践中<sup>[2]</sup>,但是这些研究和应用大部分都基于微波雷达系统,而基于激光雷达的微多普勒效应还有待于进一步的研究和开发。因为激光雷达具有分辨率高、抗干扰能力强、体积和重量都比微波雷达小等优点,所以在高精度、实时探测高频、低振幅微多普勒效应的研究中存在着巨大的发展空间<sup>[5,6]</sup>。

由于激光的相干性,激光雷达中目标回波信号的相位对目标表面的振动非常敏感,在雷达径向距离上半个波长的变化就会引起回波信号 360° 的相位改变,由于多普勒频移可以反映相位函数随时间的变化情况,因此,可以通过回波信号的多普勒频移来探测和识别目标表面的振动状态。作者首先建立目标回波的物理模型,在此基础上对微多普勒效应进行仿真,并对仿真的结果进行了分析。

## 1 目标回波的物理模型

根据微波雷达的分析<sup>[7]</sup>,结合激光雷达特点,图 1 中给出了激光雷达探测具有自身振动的运动目标的几

基金项目:国防预先研究基金资助项目(GF20F3)

作者简介:王学勤(1982-),男,硕士研究生,主要从事光电信息获取与处理技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: jzhang@ytu.edu.cn

收稿日期:2006-03-13;收到修改稿日期:2006-05-15

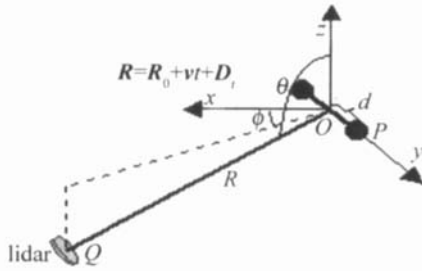


Fig 1 Geometry of vibrating target detection in lidar

何关系图。振动质点目标  $P$  位于坐标系  $(x, y, z)$  中, 并以  $O$  点为中心沿  $y$  轴作简谐振动, 振动状态可表示为:

$$y(t) = D_t = d \sin(\omega_m t) \quad (1)$$

式中,  $d$  是振动的振幅,  $\omega_m$  是振动角频率。振动目标及其所在的坐标系以速度  $v$  运动。初始时刻,  $O$  点与雷达间距为  $R_0$ , 雷达在坐标系  $(x, y, z)$  中的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 在球坐标系中表示为:

$$Q = (R_0 \sin\theta \cos\phi, R_0 \sin\theta \sin\phi, R_0 \cos\theta) \quad (2)$$

则雷达与振动目标的距离为:

$$R_t = \vec{R}_t = \{ (R_0 \sin\theta \cos\phi)^2 + [R_0 \sin\theta \sin\phi - y(t)]^2 + (R_0 \cos\theta)^2 \}^{1/2} = [R_0^2 + y^2(t) - 2y(t)R_0 \sin\theta \sin\phi]^{1/2} = R_0 \left[ 1 + \frac{y^2(t)}{R_0^2} - 2 \frac{y(t)}{R_0} \sin\theta \sin\phi \right]^{1/2} \quad (3)$$

在实际应用中, 目标振动振幅  $d \ll R_0$ , 即  $y(t) \ll R_0$ , 则  $\left[ \frac{y(t)}{R_0} \right]^2$  为二阶小量, 可忽略不计, 所以 (3) 式可表示为:

$$R_t = R_0 \left[ 1 - 2 \frac{y(t)}{R_0} \sin\theta \sin\phi \right]^{1/2} \quad (4)$$

对 (4) 式作泰勒展开得:

$$R_t = R_0 \left[ 1 - 2 \frac{y(t)}{R_0} \sin\theta \sin\phi \right]^{1/2} = R_0 \left[ 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{2y(t)}{R_0} \sin\theta \sin\phi + \dots \right] \approx R_0 - y(t) \sin\theta \sin\phi \quad (5)$$

(5) 式最后一步略去了展开得到的高阶小量。将 (1) 式代入 (5) 式, 并考虑到振动目标的平动, 可得任意时刻雷达与目标间距:

$$R(t) = R_0 + vt - d \sin\theta \sin\phi \sin(\omega_m t) \quad (6)$$

则雷达接收到的信号为:

$$S(t) = \rho \exp \left\{ \left[ 2\pi f_c t + 4\pi \frac{R(t)}{\lambda_c} \right] \right\} = \rho \exp \{ j[2\pi f_c t + \phi(t)] \} \quad (7)$$

式中,  $\rho$  是散射点  $P$  的反射率函数,  $\phi(t) = 4\pi R(t) / \lambda_c$  是相位函数。

对相位做时间的微分, 可得由目标运动造成的多普勒频移:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{2v}{\lambda_c} - \frac{2d\omega_m \sin\theta \sin\phi \cos(\omega_m t)}{\lambda_c} \quad (8)$$

式中, 右边第 1 项是由于目标物体  $P$  作平动引起的多普勒频移, 第 2 项是由质点  $P$  振动引起的微多普勒频移。由于这两项分别代表着随时间变化的多普勒项和微振动引起的微多普勒项, 这为研究目标的运动速度、振动状态等目标特征提供了依据。

## 2 微多普勒效应的仿真

利用上述激光雷达目标回波的物理模型, 微多普勒效应做如下仿真: 激光雷达工作波长为  $2.06 \mu\text{m}$  (Ho YAG 激光器), 目标运动速度  $5 \text{ m/s}$ , 目标作微小振动, 振幅设为与波长量级匹配的  $3 \mu\text{m}$ , 振动频率为  $0.1 \text{ MHz}$ 。由于该模型没有考虑激光在大气传输中的衰减效应, 所以获取的信号强度与雷达和目标的间距无关, 本次仿真将雷达与目标的初始间距设定为  $10 \text{ m}$ 。为简单起见, 进一步作如下假设: 设定激光雷达在目标坐标系中的方位角和高低角均为  $90^\circ$ 。信号采样率为  $20 \text{ MHz}$ , 每组数据采集  $512$  个点, 耗时  $25.6 \mu\text{s}$ , 由于采集一组数据时间很短, 进一步设定在此过程中方位角和高低角不随时间变化。根据物理模型及上述参数设置, 利用 VC 语言编写了仿真程序, 该程序能够根据 (7) 式计算出在每个采样点雷达接收到的信号强度, 所有  $512$  个采样点信号强度的变化如图 2 所示, 即为模型仿真激光雷达探测振动目标回波信号图。

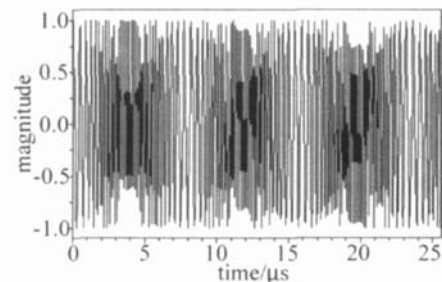


Fig 2 Returned signal of vibrating target detection in lidar by simulation

如何从回波信号中提取出微多普勒信息是该项研究工作的核心问题。因为从信号的频域中可以观察到多普勒频移和微多普勒频移, 所以首先考虑对信号作傅里叶变换 (FFT)<sup>[8]</sup>, 为了能够对微多普勒信号的频域特征有一个更形象的了解, 同时采用一个不具有振动特征的运动目标的散射回波信号进行比较分析, 该目标除振动特征之外的所有其它参数设置均与振动目标完全相同。图 3 是两种目标回波信号的频域特征对比图。非振动目标散射信号的频谱仅仅在  $4.85 \text{ MHz}$  处具有一个大的尖峰, 这是由于目标以  $5 \text{ m/s}$  的速度运动造成的多普勒频移。而振动目标的频谱则由于其自身振动而产生频率展宽, 频带中心仍处于  $4.85 \text{ MHz}$  处, 因此可以通过确定频带的中心位置来计算出目标的运动速度; 从图中还可以看到, 由于目标振动所产生

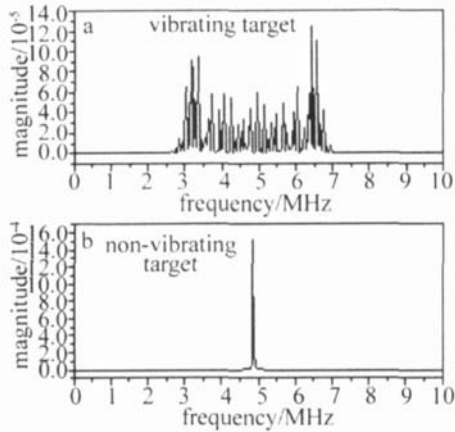


Fig 3 Spectrum comparison of vibrating target and non-vibrating target 的频率边带;然而,如何从这些变化的频率信息中反演出目标振动的特征就成为关注的焦点。因为频带带宽是由激光波长、振动振幅以及振动频率共同决定的,所以在振动振幅未知的情况下也不能确定目标振动频率。总之,能够从频域中得到信号的多普勒及微多普勒频移,但却得不到它们随时间的变化情况。为了解决这个问题,引入了时间域-频率域联合描述的方法:时频分析方法<sup>[9]</sup>。

### 3 信号时频特征分析

采用短时傅里叶变换 (STFT) 对信号进行了时频分析。短时傅里叶变换的基本思想:用窗函数来截取信号,假定信号在窗内是平稳的,采用傅里叶变换来分析窗内信号,以便确定在那个时间存在的频率,然后沿着信号移动窗函数,得到信号频率随时间的变化关系,这就得到了所需要的时频分布。短时傅里叶变换的定义为<sup>[10]</sup>:

$$\text{STFT}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(u) g^*(u-t) e^{-j2\pi fu} du \quad (9)$$

其功率谱为:  $\text{SPEC}(t, f) = |\text{STFT}(t, f)|^2$  (10) 这种变换是线性时频变换,它概念直接,算法简单,并且不存在交叉项干扰,适合于微多普勒信号的分析。

图 4 中给出了短时傅里叶变换对回波信号做时频分析得到的时频特征<sup>[10]</sup>,因为信号为高频信号,为了能够获得较好的时间分辨率,分析过程中短时傅里叶变换的滑动窗口采用了 31 点汉明窗。从图中可以清晰地看到信号频率随时间的变化情况,频率与时间呈余弦关系;因为频率变化的周期对应于目标振动的周期,所以可以直接从图中读出目标振动周期为  $10\mu\text{s}$ ,则目标振动频率为  $0.1\text{MHz}$ ;图中白色横线表示余弦关系的平衡位置,即由于目标运动而产生的多普勒频移,约为  $4.85\text{MHz}$ ,从而计算得到目标的运动速度约为  $5\text{m/s}$ ;从图中还可以读出信号的频带宽度,因为它

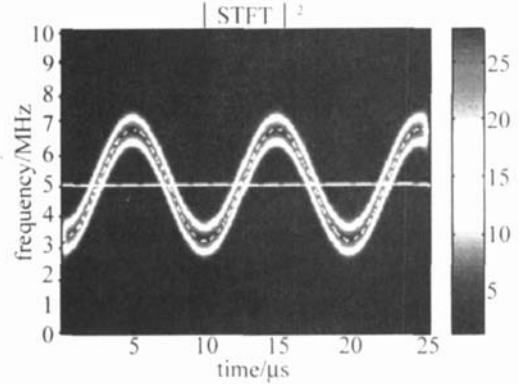


Fig 4 Time-frequency signal distribution returned from vibrating

由激光波长、振动振幅以及振动频率共同决定,而激光波长已知、振动频率也已经得出,所以还可以据此推断出目标振动的振幅。总之,通过信号的时频图像,可以很好地得到目标的运动速度、振动频率及振幅等一系列特征。图中白色虚线是根据 (8) 式计算得到的信号频率随时间的变化曲线,可见,通过对信号做时频分析得到的结果与理论计算得到的结果具有很好的一致性,这一点也证明了采用该方法分析信号微多普勒特征的正确性和有效性。

### 4 结论

在建立激光雷达探测振动目标的物理模型的基础上对微多普勒效应进行了仿真。采用传统的 FFT 和基于 STFT 的时频表示方法对仿真信号进行了分析,得到了能很好地反映目标运动、振动特征的微多普勒时频图像,且所得结果与理论结果一致。初步证实了应用时频分析方法分析微多普勒信号的可行性。提供了一种对目标进行探测、分类、识别的新途径。

### 参考文献

- [1] CHEN V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: a review [J]. SPIE, 2003, 5102: 240~249.
- [2] GRENEKER E F, GEISHMER J L, DAV D A. Extraction of micro-Doppler data from vehicle targets at x-band frequencies [J]. SPIE, 2001, 4374: 1~9.
- [3] LI J, LONG H. Application of adaptive chiplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts [J]. IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150 (4): 284~291.
- [4] STEVENS M R, MAGNUS S, PETROVICH D J. Laser vibrometry for target classification [J]. SPIE, 2002, 4726: 70~81.
- [5] HE Sh Zh, YAO X, JIANG Ch Zh *et al*. Study on demodulation system of laser Doppler [J]. Laser Technology, 2004, 28 (2): 190~192 (in Chinese).
- [6] LU H Sh, LIU B. Latest development of laser Doppler technique in vibration measurement [J]. Laser Technology, 2005, 29 (2): 176~179 (in Chinese).
- [7] SPARR T, KRANE B. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in



左右。实验结果显示,光束指向性漂移对后反镜曲率半径、负透镜焦距以及激光腔腔长等参数的变化不敏感,不同的组合时变化腔长从 190mm~230mm 时,光束指向性漂移的变化范围为发散角的 0.15%~0.25%。比较图 3 和图 4 中的结果发现,当使用曲率半径 250 mm 和焦距 -229mm 组合时的输出功率更高,达到 10.8W。此时的光-电转换效率为 12.7%,而斜率转换效率为 29%。图 5 是在后反镜曲率半径 250mm、负透镜焦距 -229mm 和腔长 213mm 时输出光束的光强分布,接近理想的高斯分布。进一步测量激光束在  $x$  和  $y$  方向的  $M^2$  值均为 1.1 左右。

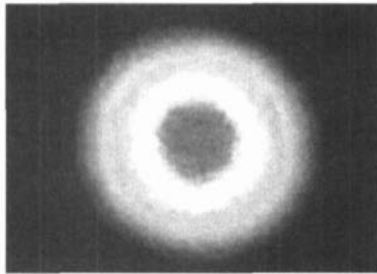


Fig 5 Intensity profile of the output beam

上述实验结果是在重复频率为 10kHz 时得到的。作者也测量了其它重复频率时的输出功率和光斑圆率,图 6 显示了测量结果。可以看出,当重复频率在

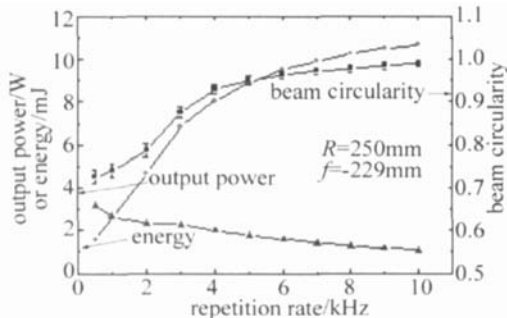


Fig 6 Output power, pulse energy and beam circularity versus the repetition rate for  $R = 250\text{mm}$  and  $f = -229\text{mm}$

5kHz 以上时,光斑圆率仍达到 95% 以上。在 5kHz 时,输出功率为 8.9W。而在 4kHz 时,光束圆率仍有 93%,输出功率 8W。只有在重复频率低于 4kHz 时,激光器输出功率和光斑圆率才随着重复频率的降低而快速降低。从图中的结果也可以看出,激光束的单脉

冲能量随重复频率的降低而增加,在 10kHz 时,为 1.1mJ,4kHz 时,为 2.0mJ,而在 0.5kHz 时,达到了 3.2mJ。需要说明的是,单脉冲能量的增加提高了激光束的峰值功率密度,更容易造成激光腔中光学元件的损伤。因此,本设计不适合激光器工作在 4kHz 之下。

### 3 结论

采用 1mm 直径激光棒抑制高阶横模振荡和单-二极管激光模块侧面抽运的简单结构,通过使用曲面后反镜和负透镜组合补偿热透镜效应,实现了功率高于 10W、光束质量接近衍射极限的  $\text{TEM}_{00}$  模光束输出。在此设计的基础上,对高于 10W 的输出光束进一步放大,实现了高于 30W 的单横模输出,光斑圆率优于 95%, $M^2 < 1.2$ 。同时,对 1064nm 的光束实现了二倍频和三倍频单横模输出,在 532nm 和 355nm 波长的输出功率在无放大级时,分别达到了 5W 和 3.3W,加放大级时,达到了 15W 和 10W,光斑圆率优于 90%。

### 参考文献

- [1] COWER M C. Industrial application of laser micromachining [J]. *Optics Express*, 2000, 7(2): 56~67.
- [2] BOOTH H J. Recent applications of pulsed lasers in advanced materials processing [J]. *Thin Solid Films*, 2004, 453~454: 450~457.
- [3] LIU Y Y, FANG G Zh, LIU B *et al* Laser diode side-pumped CW Nd:YAG lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(7): 577~580 (in Chinese).
- [4] ZHAO Zh M, LI L, TIAN F *et al* High power end-pumped intracavity frequency doubling Watt-level green laser [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4): 331~333 (in Chinese).
- [5] XU D G, YAO J Q, CHEN J *et al* High-stabilization 85W all-solid-state green laser operation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(4): 385~389 (in Chinese).
- [6] LI L, YANG S H, SUN W F *et al* LD-pumped Yb:YAG chip laser with high beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(11): 1285~1288 (in Chinese).
- [7] HU Ch H, BI Y, SUN Zh P *et al* Laser-diode pumped 500W continuous-wave Nd:YAG laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(1): 13~15 (in Chinese).
- [8] GAO Q S, TONGLI X, JIANG J F *et al* The four-pass pumped coupling system of the high power diode lasers stack [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(2): 135~137 (in Chinese).
- [9] KOECHNER W. *Solid-state laser engineering* [M]. Berlin: Springer, 1999. 195~236, 406~441.

(上接第 119 页)

- [7] SAR [J]. *IEE Proceedings on Radar*, 2003, 150(4): 277~283.
- [8] GRENEKER E F, SYLVESTER V B. Use of the envelope detection method to detect micro-Doppler [J]. *SPIE*, 2003, 5077: 167~174.
- [9] CHEN V C, LIPPS R D. Time frequency signatures of micro-Doppler

phenomenon for feature extraction [J]. *SPIE*, 2000, 4056: 220~226.

- [10] ZHANG X D, BAO Zh Non-stationary signal processing and conduction [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 20~26 (in Chinese).