

光学调频激光雷达的非线性响应特性

李 苙¹ 林志立¹ 马静谨²

(¹北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)
²北京市信息技术研究所, 北京 100094)

摘要 在光学线性调频连续波(LFMCW)激光雷达中,受半导体激光器本身性能限制,使用线性电信号调制并不能得到理想的线性调频激光输出,导致激光雷达拍频信号(BFS)频谱的畸变,因此需要对调频非线性响应特性进行研究。分析了半导体激光器调频特性,并且推导出激光雷达调频非线性响应公式。采用离散多项式相位变换(DPT)算法对调频非线性系数进行非线性参数估计和补偿,并搭建实验平台进行验证。实验结果表明采用 DPT 算法能有效估计激光雷达调频非线性系数,提高了激光雷达测距测速精度。

关键词 激光光学;激光雷达;线性调频信号;非线性;离散多项式相位变换算法

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s214002

Nonlinear Response Characteristics of the Optical Frequency Modulated Lidar

Li Jiang¹ Lin Zhili¹ Ma Jingjin²

(¹School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)
²Beijing Institute of Information and Technology, Beijing 100094, China)

Abstract In optical linear frequency modulated continuous wave (LFMCW) lidar system, due to the limit of semiconductor laser performance, the ideal linear frequency modulation (LFM) signal cannot be obtained under a LFM electrical signal modulation in application, which makes beat frequency signal (BFS) distorted. Thus it is necessary to study the frequency modulated (FM) nonlinear response characteristics. The FM characteristic of semiconductor laser is analyzed and the FM nonlinear response formulas of lidar are derived. Discrete polynomial phase transform (DPT) algorithm is applied to estimate and compensate on the FM nonlinear parameters. And experimental platform is set up for validation. The experimental results show that the DPT algorithm can effectively estimate and compensate lidar FM nonlinear parameters and improve the accuracy of velocity and range.

Key words laser optics; lidar; linear frequency modulated signal; nonlinearity; discrete polynomial phase transform algorithm

OCIS codes 140.5960; 140.3295; 200.4560

1 引 言

随着空间技术的发展,越来越多的飞行任务如空间交会对接、小卫星临近作业以及飞行器自主着陆等,对速度和距离测量精度提出了更高的要求。窄线宽激光器技术的发展以及线性调频技术的应用使得高精度测速测距光学调频激光雷达迅速发

展^[1~3]。对于调频非线性特性的研究对提高雷达系统的性能非常重要,国内外学者在这方面的研究大多数是关于线性调频连续波(LFMCW)体制的雷达中调频非线性对系统测速测距精度的影响^[4~6]。文献[7]提出了 LFMCW 传感测量中半导体激光器的调频特性,文献[8]研究了扫频线性度对 LFMCW

收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(61101007)资助课题。

作者简介: 李 苙(1987—),女,硕士研究生,主要从事雷达信号处理以及非线性校正等方面的研究。

E-mail: jiangleebuaa@163.com

导师简介: 林志立(1980—),男,副教授,硕士生导师,主要从事计算电磁学、激光和微波测速测距技术等方面的研究。

E-mail: zllin@buaa.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员号: S040111614)

雷达距离分辨率的影响,提到了应用不同频率的正弦波调制下激光器的响应来进行电流补偿,但是该方法操作复杂而且实时性差。为了实现实时调频非线性补偿,需要对调频信号进行参数估计。1960年,Kelly等^[9,10]对参数的最大似然(ML)估计进行了推导,与此同时还分析了该参数估计问题的一般形式,并得到了估计方差的克拉美罗下界(CRLB)。非线性函数的最优估计器,存在计算量巨大、局部最小以及对信噪比(SNR)要求较高的问题,从而限制了其在实际中的应用。因此,基于次优估计技术的啁啾信号估计方法应运而生。Knowles等^[11]将基于线性最小方差分析理论应用到啁啾信号参数估计之中,即将频率的相位数据作为一线性回归过程而推得。Djuric等^[12]对啁啾信号指数进行了联合估计,这种方法首先采用了相位展开技术,然后应用线性回归技术对参数进行估计。2010年,曾朝阳等^[13]提出了采用对中频信号均匀分成两段并进行傅里叶变换的方法进行参数估计,但此种方法仅适用于调频线性度很好的情况。近年来,又有许多研究者提出了一些新的算法,分别从精度、计算量和信噪比阈值等方面进行了算法的优化,但它们也都在不同方面存在各自的不足^[14,15]。Peleg等^[16,17]提出并完善了基于离散多项式相位变换(DPT)算法进行啁啾信号参数估计的方法,该算法效率高,对信号稳健性好。本文将应用DPT算法对调频非线性信号的系数估计和补偿,并结合仿真结果和实验结果对算法性能以及非线性补偿效果进行对比。

2 激光雷达调频非线性分析

2.1 半导体激光器调频原理

半导体激光器可以直接对其注入电流进行调制,激光束出的光频率就会发生大范围的移动,在LFMCW激光雷达系统中可以直接对其输入电流进行调制,不必增加其他移频装置。半导体激光器的频率移动是由两个效应引起的:一是注入载流子密度的变化引起激光器有源区参数(如光子数)的变化,它主要导致半导体激光器在高频范围内的频率移动;二是注入电流的变化使激光器法布里-珀罗腔的温度发生变化引起的腔长和折射率变化,从而改变了腔体光程导致频率移动。当电流调制频率低于几千赫兹时,激光器输出频率偏移量基本是常数,即频率偏移不随调制电流频率的变化而变化,只随注入调制电流大小成线性变化,在LFMCW激光雷达中是利用半导体激光器这种电流与频率的线性关系

实现频率调制的,但实际上激光器输出频率与注入电流之间并不是理想线性关系,因此需要对激光器的调制电流进行补偿,使其输出线性调频的光信号。

2.2 调频非线性信号分析

LFMCW激光雷达的工作原理如图1所示。通过锯齿波或三角波电流对半导体激光器进行周期性调制,激光器产生线性的调频光信号通过天线发射出去,经过一定距离之后被固定或者移动的目标物所反射或散射,由接收天线接收到的回波与本振光进行拍频,再通过解调拍频信号的频率,可推算出目标物的距离和速度等信息。当采用对称三角波电流调制时,可以解除拍频信号中目标距离和速度的耦合问题。

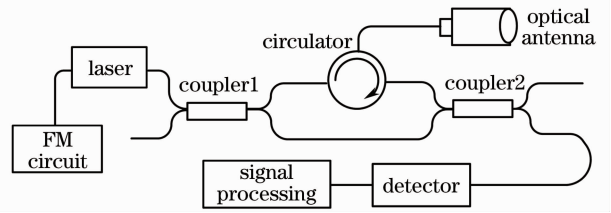


图1 LFMCW激光雷达原理框图

Fig.1 Schematic of LFMCW lidar

设线性调频激光雷达发射信号中存在高阶非线性项,初相位为0,幅值为1,则发射信号和接收信号的表达式分别为

$$s(t) = \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}at^2 + \frac{1}{3}\beta t^3 + \frac{1}{4}\gamma t^4\right)\right], \quad (1)$$

$$s(t-\tau) = \exp\left\{j2\pi\left[f_c(t-\tau) + \frac{1}{2}\alpha(t-\tau)^2 + \frac{1}{3}\beta(t-\tau)^3 + \frac{1}{4}\gamma(t-\tau)^4\right]\right\}, \quad (2)$$

式中 f_c 为激光器的载波频率, α 为调频斜率, β 、 γ 分别为调频非线性的二阶、三阶系数, $\tau = 2R/c$ 表示目标物产生的时间延迟。

发射信号和接收信号混频后产生的拍频信号为

$$s_{if}(t) = s(t)s^*(t-\tau) = \exp\left\{j2\pi\left[\gamma\tau t^3 + \left(\beta\tau - \frac{3\gamma\tau^2}{2}\right)t^2 + \left(\alpha\tau - \beta\tau^2 + \gamma\tau^3\right)t + f_c\tau - \frac{\alpha\tau^2}{2} + \frac{\beta\tau^3}{3} - \frac{\gamma\tau^4}{4}\right]\right\}, \quad (3)$$

式中上标星号*表示共轭。此时拍频信号频率为

$$f_{if} = 3\gamma\tau t^2 + (2\beta\tau - 3\gamma\tau^2)t + \alpha\tau - \beta\tau^2 + \gamma\tau^3. \quad (4)$$

考虑调制信号存在 M 阶非线性系数的影响时,拍频信号的频率可表示为

$$f_{it} = \alpha t + \sum_{i=1}^M (i+1)(\xi_{i+1} \tau)^i, \quad (5)$$

式中 ξ_i 为调制信号的第 i 阶非线性系数, 且有 $\xi_1 = \alpha, \xi_2 = \beta, \xi_3 = \gamma, \dots$, (5) 式是信号调制的高阶非线性对拍频信号影响的数学表达式。由 (4) 式和 (5) 式可知, 发射光信号的调制非线性将直接影响到拍频信号的频谱估计, 从而造成雷达系统的测量误差。

3 仿真以及实验分析

设线性调频激光雷达的拍频信号三阶多项式相位信号参数分别为: $b_0 = 1, a_0 = 1.66, a_1 =$

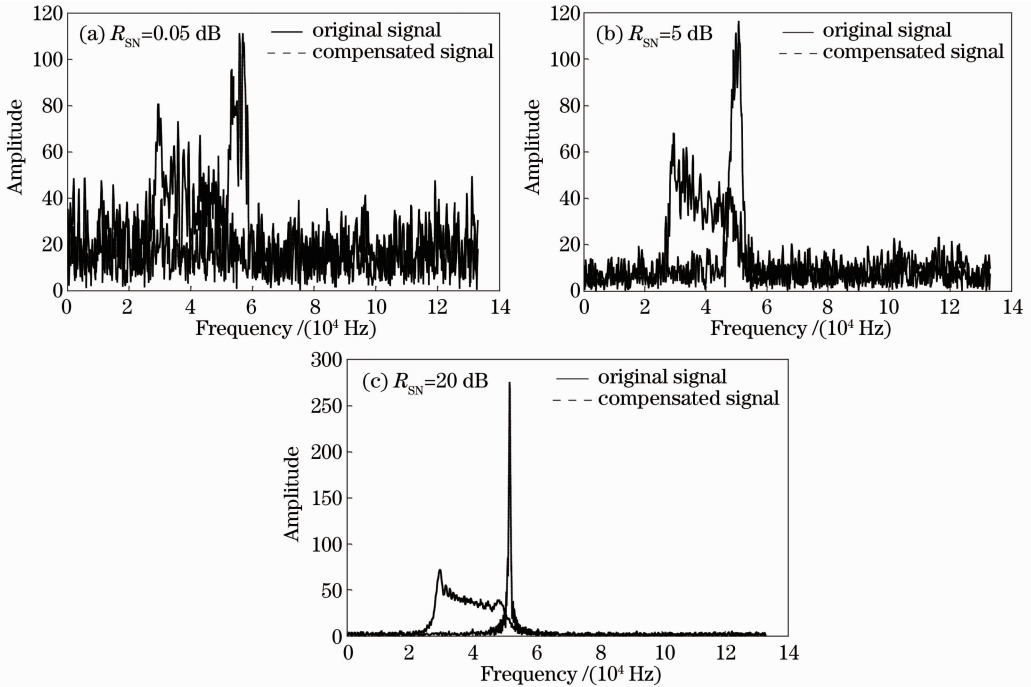


图 2 不同信噪比下原信号频谱和信号经过三阶、二阶非线性参数补偿后频谱图

Fig. 2 Spectrum of original signal and signal after third and second order parameter compensations with different signal noise ratios

下面对不同信噪比下采用 DPT 算法对二阶、三阶非线性参数估计的误差进行分析。图 3 为不同信噪比时二阶、三阶非线性参数估计的相对误差仿真结果。从图 3 可以看出, 随着信噪比的增加, 二阶、三阶参数估计的误差都会减小。当信噪比低于 0.5 dB 时, 参数估计的相对误差大于等于 0.1; 当信噪比高于 3.5 dB 时, 参数估计的相对误差小于 0.05。

从仿真的结果可以看出利用 DPT 算法在信噪比高于 0.5 dB 时可以对非线性调频进行参数估计, 而且参数估计的相对误差小于 0.1。因此可将此方法应用到线性调频激光雷达, 图 1 是 LFM CW 激光雷达测速测距的原理框图, 表 1 是激光雷达系统中关键器件的重要参数。

$3.25 \times 10^5, a_2 = 6 \times 10^7, a_3 = 8 \times 10^9$, 采样点数 300, 采样频率 133 kHz, 同时在信号中加入均值为零的高斯白噪声。图 2 仿真了在不同信噪比 (SNR, R_{SN}) 下原信号的频谱图以及经过三阶和二阶参数估计和补偿后的信号频谱图。从图 2 可以看出当信噪比为 0.05 dB 时原信号和补偿后信号频谱展宽都很严重, 而且信号中噪声较大, 谱峰不明显; 信噪比为 5 dB 时信号噪声有所降低, 补偿后的信号较原信号频谱变窄; 信噪比为 20 dB 时信号中噪声小, 信号频谱较为平滑, 补偿后的信号较原信号频谱明显变窄, 谱峰凸显。

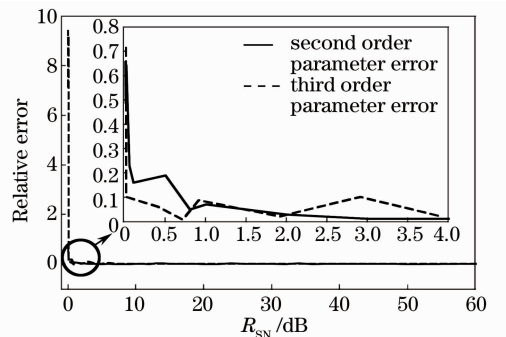


图 3 不同信噪比下二阶、三阶非线性参数估计的相对误差

Fig. 3 Relative errors of second and third order parameter estimations with different SNR

表 1 激光雷达系统中关键器件参数

Table 1 Parameters of the key components of the lidar system

Key component	Parameter	Value
Laser	Wavelength /nm	1550
	Directivity /dB	60
Circulator	Isolation /dB	55
	Lens diameter /mm	100
Optical antenna	Sensitivity /dBm	< -45
	Bandwidth /MHz	40
Detector	Coupling ratio	95:5
	Coupling ratio	99:1
Coupler1	FM rate /kHz	1
	FM bandwidth /MHz	300
Coupler2	FM rate /kHz	1
	FM bandwidth /MHz	300
Frequency modulated (FM) circuit	FM rate /kHz	1
	FM bandwidth /MHz	300

根据表 1 中的关键器件参数和图 1 中的原理搭建 FMCW 激光雷达样机,通过探测器探测拍频信号,通过 NI PXI-5412 数据探测处理器对拍频信号进行数据采集和处理,采用 Labview 界面嵌入 Matlab 处理程序完成数据的实时处理以及显示,设定采样频率为 1 MHz。图 4(a)是所测得的拍频信号时域图以及通过 DPT 算法对其进行三阶参数估计和补偿后的时域图,图 4(b)是三者所对应的频谱图。从实验结果可看出通过 DPT 算法对非线性调频信号进行参数估计和补偿后频谱明显变窄,谱峰凸显,这与理论分析以及仿真结果一致。

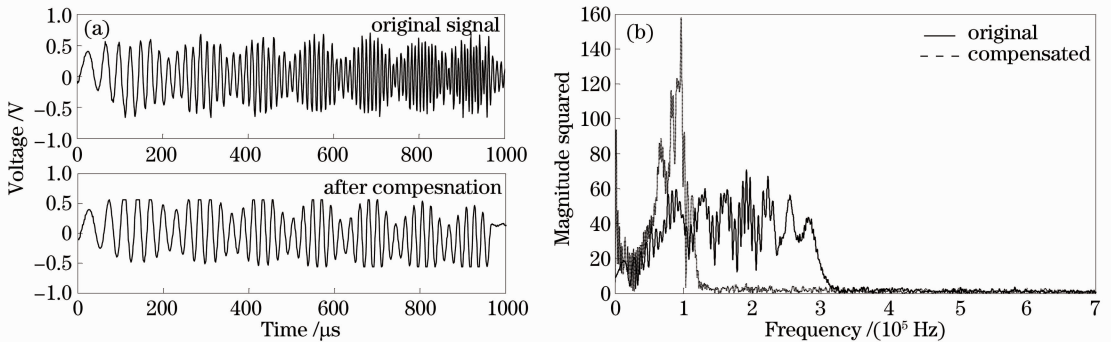


图 4 拍频信号原图和补偿后的图。(a)时域图;(b)频域图

Fig. 4 Frequency spectrum of the original and compensated beating signal.

(a) Temporal waveform; (b) frequency spectrum

4 结 论

从半导体激光器调频非线性特性出发,应用 DPT 算法对 LFM CW 激光雷达中非线性调频信号进行二阶、三阶多项式相位参数的估计和补偿,从仿真和实验结果可以看出经过补偿后的信号频谱较补偿前频谱变窄,易于频率提取。搭建了激光雷达样机对 DPT 算法技术进行验证,实验结果表明该算法能有效估计激光雷达调频非线性系数,经补偿后有效提高了激光雷达测距测速精度。实际中的调频非线性响应还可能存在更高阶的非线性参数项,因此有必要从更高阶参数对拍频信号进行补偿。从实验中可以看出拍频信号的非线性参数与发射信号非线性参数有关,由此可以估算出发射信号的调频非线性参数,这将有利于在半导体激光器驱动电流处直接进行非线性补偿,使其输出光信号的调频趋近线性。

参 考 文 献

1 M. Mokuno, I. Kawano, T. Suzuki. In-orbit demonstration of

rendezvous laser radar for unmanned autonomous rendezvous docking[J]. *IEEE Trans. Aerospace & Electron. Syst.*, 2004, **40**(2): 617~625

2 D. F. Pierrottet, F. Amzajerdian, L. Petway *et al.*. Flight test performance of a high precision navigation Doppler lidar[C]. *SPIE*, 2009, **7323**: 732311

3 R. Agishev, B. Gross, F. Moshary *et al.*. Range-resolved pulsed and CWFM lidars: potential capabilities comparison[J]. *Appl. Phys. B-Lasers, Opt.*, 2006, **85**(1): 149~162

4 Song Jingwei. Linearity effects on the range resolution of LFM radar[J]. *J. University of Electronic Science & Technology of China*, 1992, **21**(2): 121~126

宋景唯. 线性度对线性调频雷达距离分辨力的影响[J]. *电子科技大学学报*, 1992, **21**(2): 121~126

5 S. O. Piper. Homodyne FMCW radar range resolution effects with sinusoidal nonlinearities in the frequency sweep [C]. Atlanta: IEEE International Conference on Radar, 1993. 563~567

6 Hu Xiang, Ruan Wenjie, Wang Dongjin. Analysis of the influence on the range resolution of the nonlinearity in LFM CW radar[J]. *Modern Radar*, 1999, **21**(5): 26~30

胡翔, 阮文杰, 王东进. LFM CW 雷达的调频非线性对距离分辨力的影响[J]. *现代雷达*, 1999, **21**(5): 26~30

7 Huang Rui, Lü Haibao, Chu Xingchun *et al.*. The characteristic analyzing of frequency-modulated semiconductor laser diode used in FMCW measuring system[J]. *Laser Journal*, 1998, **19**(1): 22~26

黄锐, 吕海宝, 楚兴春等. FMCW 传感测量中半导体激光器

- 调频特性分析[J]. 激光杂志, 1998, **19**(1): 22~26
- 8 J. K. Christer, A. A. O. Fredrik. Linearization of the frequency sweep of a frequency modulated continuous-wave semiconductor laser radar and the resulting ranging performance [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(15): 3376~3386
- 9 E. J. Kelly, I. S. Reed, W. L. Root. The detection of radar echoes in noise[J]. *J. Soc. Industr. Appl. Math.*, 1960, **8**(2): 309~341
- 10 E. J. Kelly. The radar measurement of range, velocity and acceleration [J]. *IEEE Trans. Military Electron.*, 1961, **MIL_5**(2): 51~57
- 11 S. H. Knowles, W. B. Waltman. Linear least squares determination of Doppler time derivative for NAVSPASUR-like signals[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1985, **34**(1): 64~69
- 12 P. M. Djuric, S. M. Kay. Parameter estimation of chirp signals [J]. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, 1990, **38**(12): 2118~2126
- 13 Zeng Zhaoyang, Zhang Xiaoyong, Jia Xin. Measurement of linear frequency-modulated continuous wave laser radar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 022802
- 曾朝阳, 张晓永, 贾 鑫. 线性调频连续波激光雷达测量方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(2): 022802
- 14 A. Renaux, P. Forster, E. Chaumette *et al.*. On the high-SNR conditional maximum-likelihood estimator full statistical characterization [J]. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2006, **54**(12): 1260~1272
- 15 Yan Li, Hua Fu, Pooi Yuen Kam. Improved, approximate, time-domain ML estimators of chirp signal parameters and their performance analysis[J]. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2009, **57**(4): 1260~1272
- 16 S. Peley, B. Friedlander. The discrete polynomial-phase transform[J]. *IEEE Trans. Signal Process.*, 1995, **43**(8): 1901~1914
- 17 S. Peley, B. Porat. Linear FM signal parameter estimation from discrete-time observations [J]. *IEEE Trans. Aerospace & Electron. Syst.*, 1991, **27**(4): 607~616

栏目编辑: 宋梅梅