

激光多普勒测速中连续波调频非线性的分析与校正

颜子恒, 睦晓林, 刘 波, 张 颖, 曹昌东, 熊文龙, 张大勇, 赵 鸿

(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 基于多普勒效应的线性调频激光测速系统的原理是: 激光照射到运动目标, 引起光束频率发生改变, 返回的光束与本振光进行相干混频后得到多普勒频移, 进而可以推算出目标的相对运动速度值, 但调频的非线性严重影响了测量结果的准确性。仿真分析了调频非线性对测量的影响, 调频非线性会使混频后频移产生误差, 造成速度测量不准, 并且影响速度极性的判断, 验证了激光调频线性度对测速有很大影响的结论, 并对校正调频非线性提出了可行的方法, 完成了调频线性化的校正, 降低了系统测量误差。

关键词: 多普勒效应非线性校正; 线性调频连续波; 非线性误差

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2413-06

Analysis and rectification of nonlinearity in frequency sweep of laser Doppler velocity measurement

Yan Ziheng, Sui Xiaolin, Liu Bo, Zhang Ying, Cao Changdong,
Xiong Wenlong, Zhang Dayong, Zhao Hong

(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: In laser Doppler velocity measurement system based on linear frequency sweep mode, laser irradiates the moving target, which causes the change in laser frequency, the change is called Doppler frequency offset. Doppler frequency offset can be obtained from the mixture of the local vibration of laser and the returned laser from the target, and then the velocity can be calculated based on the offset. However, the nonlinearity in frequency sweep deeply impacts the accuracy of velocity measurement. First, the effects of the nonlinearity in frequency sweep was simulated, the nonlinearity in frequency sweep could deeply affect the accuracy of the velocity measurement and caused the error of polarity, the effect was verified. And a method was proposed to correct the nonlinearity and it was verified through the experiment. This will improve the accuracy and reduce the error in laser Doppler velocity measurement.

Key words: correction of nonlinearity in Doppler influence; linear frequency sweep; error of nonlinearity

收稿日期: 2013-12-10; 修订日期: 2014-01-25

基金项目: 固体激光技术重点实验室基金(9140C040204110C0404; 9140C040201130C04002); 中国电子科技集团公司创新基金

作者简介: 颜子恒(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光电技术探测方面的研究。Email: yanziheng@tju.edu.cn

0 引言

激光照射运动目标会发生多普勒效应,引起频率改变,利用频率改变量可以推算出运动目标的速度,基于多普勒效应的测量精度要大于通过激光脉冲高度计测量的精度^[1],因此,成为研究热点。在多普勒效应中,激光中产生的频率偏移大于在微波中产生的频移,能得到较高的频率分辨率,测速精度较高。线性调频连续波激光测速非常依赖于调制频率的线性度,调频的非线性会造成频谱展宽,产生频率的积累误差,影响测量的精度,并造成速度极性的判决发生错误。文中对调频非线性的影响进行了分析,并进行了仿真和实验,通过对数据的分析,提出了校正调频非线性的方法。

1 激光多普勒测速原理

1.1 原理方案

设发射激光的频率为 f_t ,并作为本振光与经目标反射频率为 f_r 的激光一起到达光电探测器阴极表面,表达式为:

$$U_1(p) = A_1 e^{i(2\pi f_t t + \phi_1)} \quad (1)$$

$$U_2(p) = A_2 e^{i(2\pi f_r t + \phi_2)} \quad (2)$$

式中: A_1, A_2 分别为两束光在光阴极表面处的振幅; ϕ_1, ϕ_2 分别为两束光的初始相位。两束光在光阴极表面混频,其合成振幅度为:

$$U(p) = A_1 e^{i(2\pi f_t t + \phi_1)} + A_2 e^{i(2\pi f_r t + \phi_2)} \quad (3)$$

光电转换后得到:

$$I = U(p) \cdot U^*(p) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cdot \cos[2\pi(f_r - f_t)t + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (4)$$

式中:最后一项称为多普勒频移 f_d 信号。

$$f_d = f_r - f_t \quad (5)$$

由相对论得出多普勒频移 f_d 与物体运动速度 v 关系为:

$$v = \frac{\lambda}{2} f_d \quad (6)$$

式中: λ 为激光波长。这就是多普勒测速的基本原理。

为了得到速度值和速度极性,方案采用连续的三角波调制激光频率,如图 1 所示。

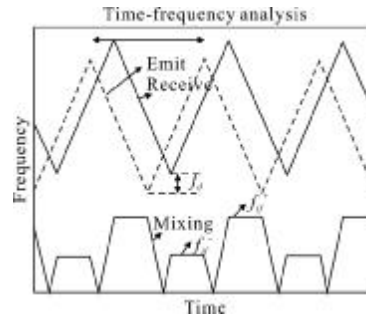


图 1 多普勒时频图

Fig.1 Time-frequency analysis of Doppler

图 1 是连续三角波调频信号的时频分析,模拟了目标靠近时的情况。图中混频信号,利用公式(7)可以求出 f_d ,进而根据公式(6)得出速度。

$$f_d = \frac{1}{2} \cdot |f_{if}^+ - f_{if}^-| \quad (7)$$

f_{if}^- 与 f_{if}^+ 为啁啾三角波上升、下降阶段混频后的频差,同时根据 f_{if}^- 与 f_{if}^+ 的大小可判断出速度的极性:靠近时 $f_{if}^- < f_{if}^+$,远离时 $f_{if}^- > f_{if}^+$ ^[2-4]。

从图 1 中和公式(7)中可以看出, f_d 的得到直接受 f_{if}^- 与 f_{if}^+ 的影响,如果三角波调频发生非线性, f_{if}^- 与 f_{if}^+ 的值会不准确,推算出的 f_d 和速度值也就不准确。

1.2 载体运动对系统性能影响

载体旋转运动示意图如图 2 所示。

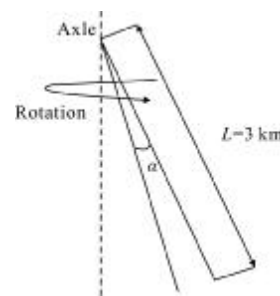


图 2 载体旋转运动示意图

Fig.2 Rotation of carrier

设载体旋转角度为 $\omega = 7$ (°)/s。如果探测距离为 $L = 3$ km,则按照 $T = 2L/C$ 得到往返时间 T 为 $20 \mu s$,则此时旋转角度为:

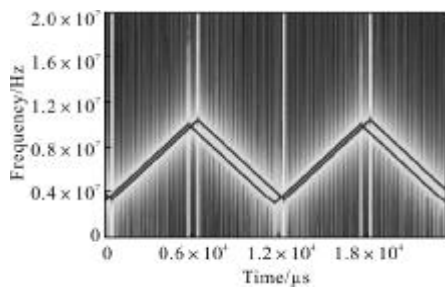
$$\alpha = \omega T = 2.443 \mu rad$$

如果激光的发散角为 1 m,接收效率仅减低 2.5% ,基本对探测无影响。

2 仿真分析

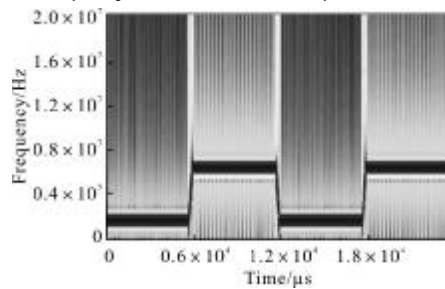
从图 1 和公式 7 可以看到，如果激光调频是非线性的，计算后得到的 f_d 也会不准确，将直接影响到测量的精度与极性的判决，因此线性调频多普勒测速非常依赖于调频的线性度^[5-6]。下面通过 Matlab 软件模拟调频非线性对测速的影响。

首先模拟理想的线性三角波调频信号。运动目标使激光频率发生改变，得到的混频前后的时频分析如图 3(a)、3(b)所示。



(a) 混频前的发射、接收的时频

(a) Time-frequency of emission and reception before mixing



(b) 混频后的时频

(b) Time-frequency after mixing

图 3 理想线性调频时频分析图

Fig.3 Tme-frequency analysis of ideal linear FM

在线性三角波调频中加入非线性扰动，使调频变得非线性，得出混频后时频分析如图 4 所示。

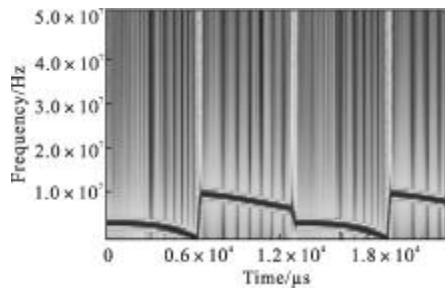


图 4 加入非线性后的时频分析图

Fig.4 Time-frequency analysis of nonlinear FM

从图 4 可以看出：加入非线性扫频后，收发信号混频相干之后差频信号 f_{if}^- 与 f_{if}^+ 不再平坦，会得到多个值，会对 f_{if}^- 与 f_{if}^+ 造成干扰，进而影响公式(6)、(7)对速度大小的求解，也会影响速度极性判决。

3 调频非线性校正

由于晶体材料的特性，激光器种子源频率随施加的偏执电流变化并非线性的，这对基于线性调频的激光测速系统有很大的影响，通过测量值和高精度的 GPS 速度测量值比对，有明显的误差，同时速度极性判断错误，因此，需要对激光调频的非线性进行校正，以达到系统的优化。

3.1 实验调频非线性验证与数据提取

为了校正调频的非线性，需要得到激光频率改变量 Δf 随频率调制电压变化的曲线，然后根据得到的函数曲线来校正调制电压。

实验采用连续的三角波电压调制激光频率，电压 V 随时间 t 的函数为 $V=V(t+V \cdot T)$ ， V 为 T 的周期函数， $T=200 \mu s$ 。

$$\text{当 } V \cdot T \leq t \leq V \cdot T + T/2 \text{ 时: } V_{up} = 0.04(t - V \cdot T) - 2;$$

$$\text{当 } V \cdot T + T/2 < t \leq (N+1)T \text{ 时: } V_{down} = -0.04(t - N \cdot T) + 6.$$

实验中，将激光照射到一定距离处静止目标，激光照射目标返回后与本振光相干混频，经示波器采集，实验现场如图 5 所示。

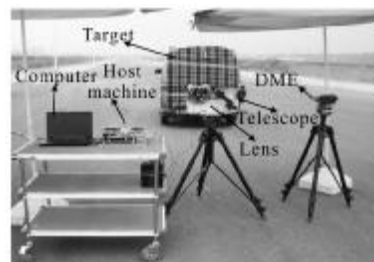


图 5 场地实验图

Fig.5 Field experiment

图 6 是模拟理想线性三角波调频混频后的时频图。

在外场实验中，将目标靶移动到一定距离处静止，激光照射靶标返回后混频由示波器采集，数据由 Matlab 进行时频分析，如图 7 所示，可以看出相较图 6，混频结果是不平坦的。

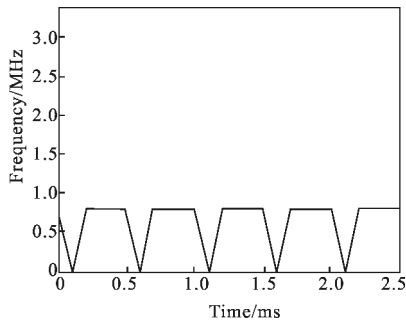


图 6 理想的混频后时频分析

Fig.6 Time-frequency analysis of ideal frequency offset

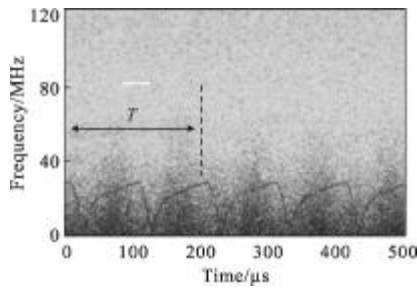


图 7 实测混频后的时频分析

Fig.7 Time-frequency analysis of real frequency offset

对图 7 实验数据采用超定方程来拟合一个调制周期的激光频率改变量 Δf 随时间变化的曲线。设发射波频率改变量 $\Delta f=f$ ，其随时间变化的表达式为 $f=f(t-NT)$, $N=\dots-1,0,1,\dots$, f 为 T 的周期函数, $T=200 \mu s$ 。

采用三次或以上插值函数拟合结果与二次插值拟合结果基本相同，故采用了二次插值拟合即满足要求。同频率调制电压函数, f 也用分段函数表示，表达式如下：

当 $N \cdot T \leq t \leq N \cdot T + T/2$ 时 $f_{up} = a_1 + b_1 (t - N \cdot T) + c_1 (t - N \cdot T)^2$;

当 $N \cdot T + T/2 < t \leq (N+1)T$ 时 $f_{down} = a_2 + b_2 (t - N \cdot T) + c_2 (t - N \cdot T)^2$ 时：

接收频率 f_{back} 为发射频率 f 的 t_d 延时, $f_{back} = f(t - N \cdot T - t_d)$ 。

图 8 为理想的发射与接收激光在一个周期 T 内的时频图，根据分段函数的拐点以及发射接收激光频率的相交点，将数据分为 6 段，分别写出 6 段函数混频前后的数学关系表达式。

(1) $f_{down} = [t - (T - t_d)] - f_{up}(t) = freq$

(2) $f_{up}(t) - f_{down}[t - (T - t_d)] = freq$

(3) $f_{up}(t) - f_{up}(t - t_d) = freq$

(4) $f_{down}(t) - f_{up}(t - t_d) = freq$

(5) $f_{up}(t - t_d) - f_{down}(t) = freq$

(6) $f_{down}(t - t_d) - f_{down}(t) = freq$

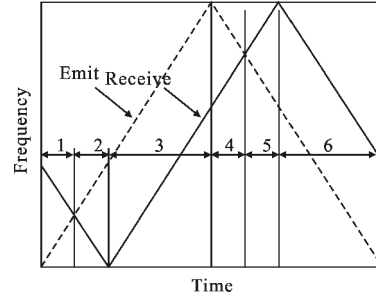


图 8 混频前的时频分析

Fig.8 Time-frequency analysis of emission and reception

通过图 7 的实验结果可以得到表达式(1)…(6)各阶段的实验数据如表 1。

表 1 实验数据

Tab.1 Data of experiment

Expression	Time/ μs	Frequency/ Hz	Expression	Time/ μs	Frequency/ Hz
(1)	0.048	2.905e7	(2)	26.72	2.441e5
	10.24	2.969e7		32.77	1.221e7
	16.38	2.393e7		40.96	1.611e7
	20.48	1.807e7		43.01	1.807e7
	26.67	2.867e5		51.20	2.148e7
	61.44	2.368e7		110.6	2.954e7
(3)	71.68	2.515e7	(4)	116.7	2.197e7
	81.92	2.637e7		120.8	1.807e7
	90.11	2.783e7		122.9	1.001e7
	102.4	2.930e7		129.0	2.441e5
	131.1	9.033e6		161.8	2.368e7
	135.2	1.367e7		170.0	2.466e7
(5)	139.3	1.538e7	(6)	182.3	2.686e7
	143.4	1.758e7		190.5	2.759e7
	149.5	2.075e7		200.0	2.905e7

将数据带入上面各阶段表达式，求解超定方程，推导出频率变化量 f 随时间 t 变化的表达式，各参数如表 2 所示。

频率 f 变化的曲线如图 9 所示。图 9(b)为三角波频率调制电压变化曲线，电压引起频率的改变量 Δf

表2 函数参数

Tabl.2 Parameter of function

Parameter	Value
a1	0.199 417 555 992 342e+07
b1	4.579 480 937 278 224e+05
c1	1.359 441 540 606 032e+03
a2	1.095 636 079 620 935e+08
b2	-4.296 056 507 334 443e+05
c2	-5.219 642 549 983 074e+02

见图 9(a)。从图 9(a)可以看出：电压三角波上升和下降阶段引起的频率变化曲线是非线性的，且是不对称的。图 10 为按照函数 $f=f(t-NT)$ 进行非线性调频，得出混频前、后的时频分析。

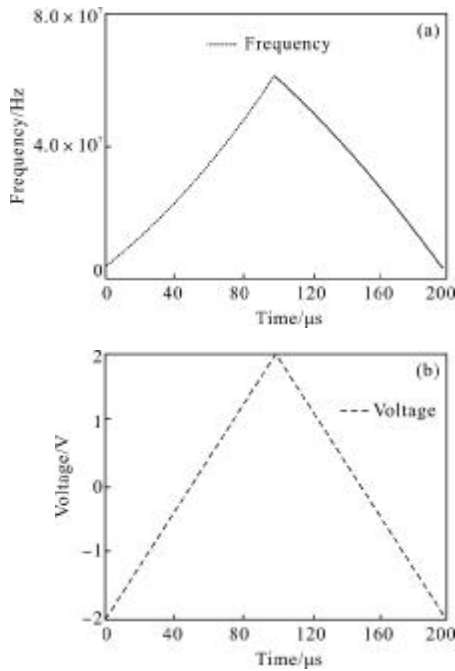


图 9 一个电压调制周期内频率变化曲线

Fig.9 Frequency sweep of one modulating voltage circle

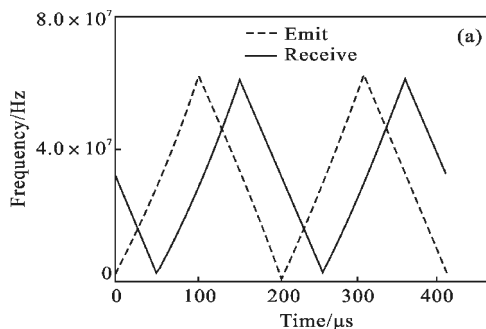


图 10 混频前、后时频分析图

Fig.10 Time-frequency analysis before and after mixing

3.2 调频非线性校正

下面进行非线性校正，研究第一个调制周期 T 的信号，求出电压函数 $V=V(t)$ 的反函数 $t=V^{-1}(V)$ ，带入 $f(t)$ ，即可得到调制频率 f 随电压 V 变化函数，根据这个函数进行线性校正。首先求出此函数 $f(V)$ 的反函数 $V=f^{-1}(f)$ (此函数为分段函数，分别求出电压上升和下降两段函数)。 f 随 V 变化的函数是非线性的，要使得频率线性变化，故需要电压非线性取值。线性地取频率值，然后一一对应得到两组调制电压数据，此即线性调频电压曲线，如图 11 所示。

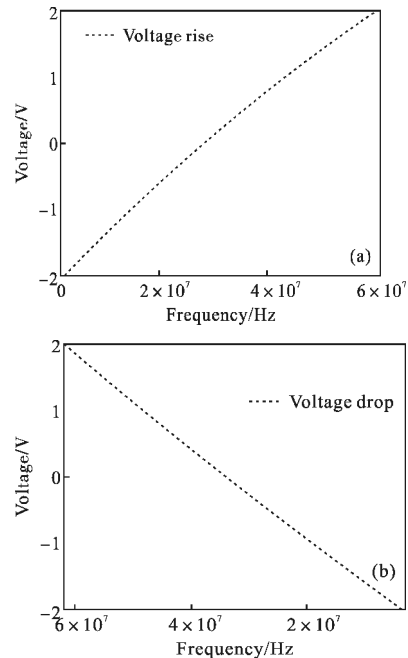


图 11 校正后的电压调制曲线

Fig.11 Corrected line of modulating voltage

图 11 为实现调频线性化的电压调制曲线，按照上面选取的电压值进行调频，然后进行 Matlab 仿真，调频结果如图 12 所示。从图中可以看出，相较图 10

校正前,混频前线性度和混频后平坦度得到了明显提升。

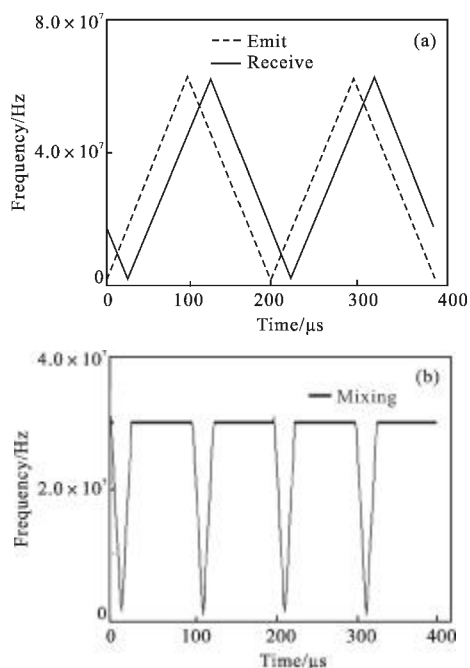


图 12 校正过后的时频分析

Fig.12 Time-frequency analysis after correction

4 结论

在基于线性调频原理的激光测速系统中,三角波调频信号的频率线性度对测速的影响非常大,文中对此影响进行了分析和仿真,并进行外场实验,提取了实验数据,验证了前面提出的问题。为了解决激光调频非线性对测量的影响,搭建了试验场地,进行了调频线性化的校正,先得到了频率改变量随电压变化的曲线,然后通过数学推导得出调制电压曲线,

实现了调频线性化,验证了这种方法的可行性和有效性,此方法可以运用于类似的需要线性调频的激光雷达系统中。

参考文献:

- [1] Jelalian A V. Laser Radar Systems[M]. Massachusetts: Artech House, 1992.
- [2] Pierrottet D F, Amzajerdian F, Petway L, et al. Flight test performance of a high precision navigation Doppler lidar[C]// SPIE, 2009, 7323: 732311.
- [3] Christer J K, Fredrik A A O. 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.
- [4] Sui Xiaolin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, et al. All fiber coherent detection system far target velocity measurement [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(3): 256-257. (in Chinese) 眭晓林, 周寿桓, 赵鸿, 等. 全光纤激光相干探测实现远距离目标测速[J]. 激光与红外, 2013, 43(3): 256-257.
- [5] Li Jiang, Lin Zhili, Ma Jingjin. Nonlinear response characteristics of the optical frequency modulated lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(S2): s214002. (in Chinese) 李荃, 林志立, 马静谨. 光学调频激光雷达的非线性响应特性[J]. 中国激光, 2012, 39(S2): s214002.
- [6] Liu Changwen, Han Jingna, Liu Jie, et al. Investigation on frequency correction methods and its application in digital spectrum LDA processor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(7): 642-646. (in Chinese) 刘昌文, 韩静娜, 刘杰, 等. 激光多普勒测速中的频谱校正及其应用[J]. 中国激光, 2003, 30(7): 642-646.