

啁啾调幅激光雷达对距离和速度的零差探测

于 啸 洪光烈* 凌 元 舒 嵘

(中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电系统技术实验室, 上海 200083)

摘要 构建了一种用线性调频信号去调制激光振幅的激光相干雷达实验系统。系统使用窄线宽激光器、马赫-曾德尔(M-Z)幅度调制器以及光纤零差光路,利用直接数字合成(DDS)技术所生成的啁啾信号对激光振幅进行调制,完成了对目标靶运动速度与距离的同时测量,对速度距离分辨率和误差进行了测试和分析,对信噪比(SNR)与系统探测能力的关系进行了研究。实验结果表明该系统可以达到毫米每秒的测速精度和厘米级的测距精度,探测灵敏度优于 0.1 nW。

关键词 光纤光学;激光雷达;距离-多普勒;啁啾调幅;零差

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0606002

Homodyne Detection of Distance and Velocity by Chirped-Amplitude Modulated Lidar

Yu Xiao Hong Guanglie Ling Yuan Shu Rong

(Space Active Electronic-Optical Systems Laboratory, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract A system of coherent lidar which is based on chirp amplitude modulation is built. The system is made up of narrow-line-width laser, Mach-Zehnder intensity modulator, and fiber homodyne detection optics. The measurement of velocity and distance of the target is completed based on chirp signal generated by direct digital synthesis(DDS), both the resolution and error of velocity and range are measured and analyzed, and research on relation between signal-to-noise ratio (SNR) and system detection power is also completed. Experimental data indicates that velocity accuracy reaches mm/s, range accuracy reaches cm and sensitivity is better than 0.1 nW.

Key words fiber optics; lidar; range-Doppler; chirped-amplitude modulation; homodyne

OCIS codes 060.2310; 060.2330; 060.2920; 060.3510; 060.4080

1 引 言

激光雷达的测距测速精度主要取决于发射信号带宽和接收系统的信噪比(SNR),为了得到合适的测距精度和探测灵敏度^[1~3],连续波啁啾激光雷达得到了广泛发展。运用啁啾信号(线性调频信号)对激光的幅度进行调制后发射,然后通过解啁啾把回波信号中的时间延迟信息转化成频率^[4,5]。这样,系统的测量精度将主要取决于射频啁啾信号的带宽。

为了实现较远距离的高精度探测,研究了基于啁啾调幅零差探测激光雷达系统^[4,6],该激光雷达的发射信号需啁啾信号进行幅度调制,回波信号与本振信号在光路中进行混频即解啁啾。这样,与发射信号相比,进入探测器的混频信号具有较小的带宽,降低了探测器的带宽要求,因此射频接收的硬件系统变得相对简单,更为重要的是,该激光雷达系统能完成对目标靶距离和速度的同时测量。

收稿日期: 2010-11-15; **收到修改稿日期**: 2011-01-19

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724004)资助课题。

作者简介: 于 啸(1986—),男,博士研究生,主要从事激光相干探测与信号处理等方面的研究。

E-mail: 1986.yu.xiao@gmail.com

导师简介: 舒 嵘(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光遥感技术方面的研究。

E-mail: shurong@mail.sitp.ac.cn

* **通信联系人**。E-mail: guanglieh@yahoo.com.cn

2 啁啾调幅相干探测激光雷达系统原理

啁啾调幅利用啁啾信号去调制激光雷达发射激光的振幅。对于调幅体制,载波的能量占很大部分,例如调制深度为 1 时,可以用来测距的已调信号只占发射信号总能量的 1/3,未调制的载波信号却可用于多普勒测速,因此,系统可以同时实现对目标距离和速度的测量。

2.1 啁啾调幅测速原理

当系统接收到回波激光信号时,回波信号中引入了由目标运动所产生的多普勒频移 f_d ,通过本振和回波在探测器上的相干,得到本振和回波的差频,也即多普勒频移 f_d ,由下式可得目标在激光视线方向的速度:

$$v = \frac{\lambda f_d}{2}, \quad (1)$$

式中 λ 为激光的波长。

2.2 啁啾调幅测距原理

回波振幅上被调制的啁啾信号与原始无延迟啁啾信号之间存在一个回波延时,由于啁啾信号为线性调频信号,频率变化与时间变化成线性关系,因此延时大小将转变为频差大小,通过检测频差,就可以得到回波延时,进而得到目标距离。啁啾信号的频率表达式为

$$f(t) = f_c + \frac{B}{T}t, \quad \left(-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}\right), \quad (2)$$

式中 f_c 为啁啾信号的中心频率, B 为啁啾信号的带宽, T 为啁啾信号频率变化的周期。则原始的啁啾信号可表示为

$$c(t) = \cos\left\{2\pi\left[\int f(t) dt\right]\right\} = \cos\left[2\pi\left(f_c t + B \frac{t^2}{2T}\right) + \phi\right]. \quad (3)$$

延时 τ 后的回波啁啾信号为

$$c(t - \tau) = \cos\left\{2\pi\left[f_c(t - \tau) + B \frac{(t - \tau)^2}{2T}\right] + \phi\right\}. \quad (4)$$

延时的啁啾信号与原始啁啾信号混频后,通过低通滤波可得到两信号的差频信号为

$$c_x(t) = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi B\tau t}{T} + 2\pi f_c \tau - \frac{\pi B\tau^2}{T}\right). \quad (5)$$

由上式可见, $c_x(t)$ 是一个余弦函数,它的频率为 $f_x = \tau B/T$, f_x 同延迟时间 τ 成正比。所以,由 f_x 可以间接得到目标靶与激光源之间的距离,原理示

意图如图 1 所示。

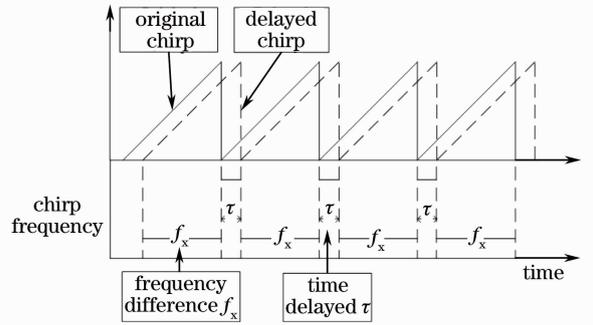


图 1 啁啾信号测距原理

Fig. 1 Principle of range finding based on chirped signal

3 啁啾调幅零差相干激光雷达实验系统

根据雷达系统中不同的收发光路和信号处理方式,目前主要分为以下 3 种雷达结构:直接探测结构、相干外差探测结构和零差探测结构。

直接探测具有较简单的系统结构,但是它的接收灵敏度低,受系统噪声影响较大,更重要的是,它不能完成对目标速度与距离的同时测量;而相干外差探测为了获得比基带频率高得多的中频频率,中频频率往往需要几百兆赫兹,这也就需要高速的光探测和射频处理电路,在这个过程中必然会带来射频噪声,降低整个系统的信噪比^[4]。考虑到直接探测与外差探测的缺点,实验采用了一种改进型的相干零差探测雷达系统。

3.1 系统介绍

该实验方案具体结构框图如图 2 所示。激光经过幅度调制器被啁啾信号调幅后,通过分束器分为两部分,一部分直接作为相干探测的本振光,另一部分作为发射光通过望远镜打向目标靶,然后通过望远镜接收回波信号,经过光纤延时线后使其与本振光在平衡相干光路中混合,再经过平衡探测器得到对应的电信号,再进行低通滤波,快速傅里叶变换(FFT)等频谱分析,即可得到对应光纤延时线长度与自由空间光程距离之和的频率 f_x ,和多普勒频移 f_d 。与常规零差探测相比,本实验方案最主要的不同在于系统的发射光信号和本振光信号都是经过相同的啁啾信号进行调制的,由于光相干和射频解啁啾在平衡探测器中同时完成^[4,5],就不再需要额外的射频信号解啁啾过程,这样也就大大简化了系统结构。

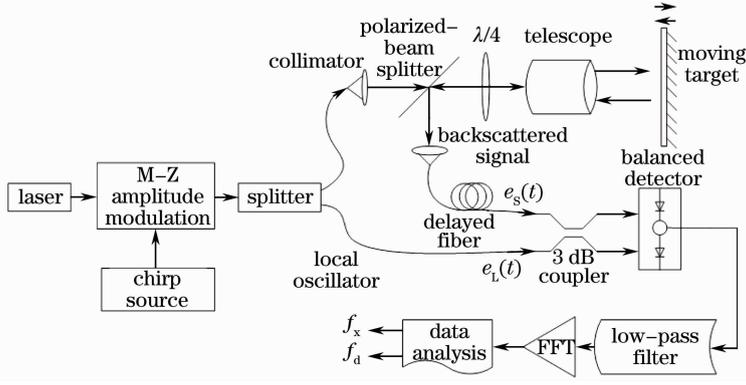


图 2 实验系统结构框图

Fig. 2 Block diagram for homodyne self-chirped detection

3.2 平衡探测过程与理论分析

本振光电场为

$$e_L(t) = A_L \left\{ 1 + m \cos \left[2\pi \left(f_c t + \frac{Bt^2}{2T} \right) \right] \right\} \cos(2\pi f_0 t). \quad (6)$$

回波激光电场为

$$e_S(t) = A_S \left\{ 1 + m \cos \left[2\pi \left[f_c(t - \tau) + \frac{B(t - \tau)^2}{2T} \right] \right] \right\} \times \cos[2\pi(f_0 + f_d)(t - \tau)], \quad (7)$$

式中 A_L 为本振光的幅度, A_S 为回波的幅度, m 为调制深度, f_c 为啁啾信号的中频, τ 为激光在光纤延时线以及自由空间光程中的时间, f_d 为激光光频的多普勒频移, f_0 为激光的频率, 由于啁啾中心频率远低于光频, 因此啁啾信号的多普勒频移可以忽略。两者在平衡探测器上混频, 假设实验中 3 dB 耦合器为理想的 50/50 耦合器, 相干效率为 1, M 为平衡探测器响应率, 根据平衡探测原理, 则平衡探测器输出电平为^[7,8]

$$V(t) = MA_L A_S \left\{ 1 + m \cos \left[2\pi \left(f_c t + \frac{Bt^2}{2T} \right) \right] \right\} \left\{ 1 + m \cos \left[2\pi \left[f_c(t - \tau) + \frac{B(t - \tau)^2}{2T} \right] \right] \right\} \cos(2\pi f_d t + \theta) = MA_L A_S \left\{ 1 + m \cos \left[2\pi \left(f_c t + \frac{Bt^2}{2T} \right) \right] + m \cos \left[2\pi \left[f_c(t - \tau) + \frac{B(t - \tau)^2}{2T} \right] \right] + m^2 \cos \left[2\pi \left(f_c t + \frac{Bt^2}{2T} \right) \right] \cos \left[2\pi \left[f_c(t - \tau) + \frac{B(t - \tau)^2}{2T} \right] \right] \right\} \cos(2\pi f_d t + \theta). \quad (8)$$

滤除高频与直流分量可得

$$m(t) = \frac{1}{2} MA_L A_S m^2 \cos \left(2\pi \frac{B\tau}{T} t + \varphi \right) \cos(2\pi f_d t + \theta) + A_L A_S \cos(2\pi f_d t + \theta) = \frac{1}{4} MA_L A_S m^2 \left\{ \cos 2\pi \left[\left(\frac{B\tau}{T} - f_d \right) t + \varphi - \theta \right] + \cos 2\pi \left[\left(\frac{B\tau}{T} + f_d \right) t + \varphi + \theta \right] \right\} + A_L A_S \cos(2\pi f_d t + \theta). \quad (9)$$

在系统中, 调制深度 $m = 1$, 由 $m(t)$ 的表达式可知, 其频谱共有 3 个峰值, 分别对应频率 f_d ,

$$\frac{B\tau}{T} - f_d \text{ 和 } \frac{B\tau}{T} + f_d.$$

4 系统实验距离速度测试

系统实验中使用的啁啾信号频率是从 80 ~ 280 MHz 线性变化的, 该啁啾信号的周期是 200 μ s。激光器的输出功率为 40 mW, 接收到的回波信号功率为 60 nW, 由于实验室光程较短, 在接收回波环节增加了光纤延时线来模拟目标靶与激光源之间的距

离, 为了实验数据的完整性, 对目标靶设置不同的速度, 并且对应不同长度的光纤延时线做了 3 组对比实验, 如表 1 所示。

表 1 目标靶速度和光纤延时线模拟的光传播距离
Table 1 Velocity of the target and the length of the fiber which is used for range simulation

	Velocity of target / (m/s)	Length of delayed fiber / m
1	0.05	about 550
2	0.1	about 1100
3	0.2	about 1100

由第 2 节的理论可以知道, 该频谱图共有 3 个

峰值,分别为 f_d , $f_x - f_d$ 和 $f_x + f_d$,其中 $f_x = \frac{B\tau}{T}$ 。

实验的频谱图如图 3 所示,可以清楚地看到 3 个频率所对应的峰值。

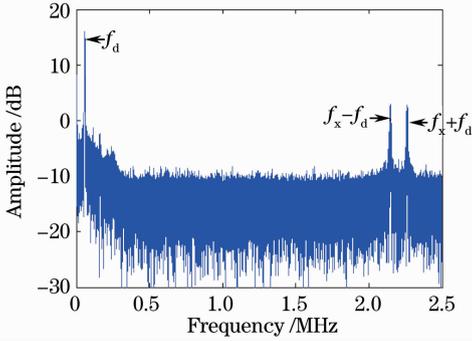


图 3 速度距离的频谱图

Fig. 3 Spectrum produced by the velocity and range

4.1 速度分辨率与误差分析

4.1.1 速度分辨率计算与分析

速度分辨率与发射激光的波长以及发射信号的周期 T 相关,其计算公式为

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2T} \quad (10)$$

表 2 速度误差数据分析

Table 2 Analysis of velocity errors

$V /(\text{m/s})$	Theoretic Doppler frequency shift f_d/kHz	Mean value of Doppler frequency peak \bar{f}_d/kHz	Frequency error $\Delta f / \text{kHz}$	Velocity error $\Delta v /(\text{m/s})$	$\overline{\text{SNR}}/\text{dB}$
0.05	63.6	65.1	1.5	0.0012	26
0.1	127.2	129.8	2.6	0.0020	25
0.2	254.5	258.6	4.1	0.0032	25

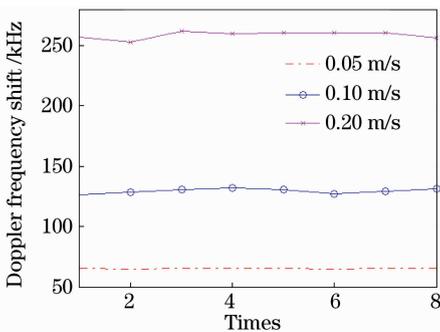


图 5 实测多普勒频移量

Fig. 5 Doppler frequency shift of three different velocities

在实验中,通过对 8 组多普勒频谱 3 dB 带宽取中间值,再取平均值的方法得到速度对应的多普勒频移量。在对目标靶速度测量过程中,误差来源主要为激光器本身的线宽,以及导轨在目标运动过程中所产生的振动叠加到目标靶上的速度分量。实验系统中的激光器是窄线宽的,线宽为 1 kHz,本身就

系统中 T 即啁啾信号的周期 $200 \mu\text{s}$,计算得到该系统的理论速度分辨率为 0.0039 m/s 。

实验中,速度分辨率由多普勒频移 3 dB 带宽的一半计算得出。如图 4 所示,3 dB 频谱宽度为 14 kHz,经过计算可得速度分辨率为 0.0055 m/s ,这与(10)式^[9]中计算得到的理论分辨率基本相符。

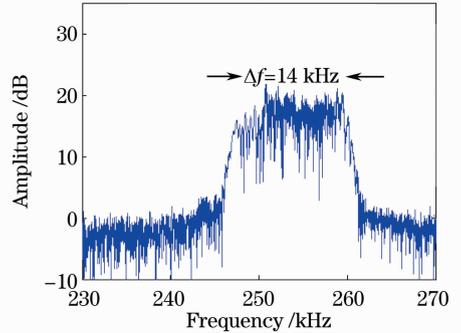


图 4 多普勒频移 3 dB 频谱宽度

Fig. 4 3 dB spectrum width of Doppler frequency shift

4.1.2 速度误差计算与分析

为了降低系统误差的影响,对不同的目标靶速度测得了 8 组多普勒频移实验数据,如图 5 所示。速度误差的分析结果如表 2 所示。

会带来 0.0008 m/s 的系统误差,在目标靶的速度变大的过程中,导轨相应的振动也会变大,因此引起的系统误差也会相应增大,由表 2 可知,理论误差分析与实验结果吻合。可见,该雷达系统的测速精度可达到毫米每秒量级。

4.2 距离分辨率与误差分析

从图 3 的速度距离频谱图可以知道,该系统能完成对目标距离和速度的同时测量,但是由于在目标靶运动过程中,目标与激光器之间的距离一直是在变化的,无法对距离分辨率和距离误差进行定量分析,所以以下距离分辨率与误差的测试与分析均是目标靶处于静止状态下的。

距离分辨率的大小是跟频谱分辨率紧密相关的,也就是说该系统的最小可分辨频率所对应的距离大小,即为该系统的距离分辨率;而距离误差的大小是统计上的一个标准差,在对目标测距过程中,对同一段距离测量也会有频谱略微的偏差,以及读数

上的偏差,因此通过对目标靶距离测多组数据来计算平均值,认为是真实距离,而对频谱的细小偏差以及读数上的误差做一个标准差,即为距离误差。

在以下测试过程中,由于目标靶速度为零,所以双边带频谱合为一个峰值,信噪比也相应上升约 6 dB,频谱图如图 6 所示。

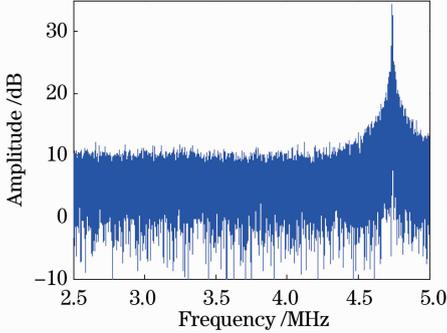


图 6 距离频谱

Fig. 6 Spectrum produced by the range

4.2.1 距离分辨率测试

观察信号的频谱,发现如图 7 所示的现象,频谱最高峰间隔 5 kHz 的频率处都出现了峰值,图中标出了最高的 3 个峰值。

这样现象的原因在于进行 FFT 频谱分析时,为了提高距离分辨率,分析了 10 ms 的信号,其中包含 50 个啁啾信号周期,50 个周期波形基本相同,可以近似等效为 200 μ s 周期的冲击函数序列与单个周期信号的卷积。10 ms 的 V_x 信号频谱就为两信号的频谱的乘积。200 μ s 周期冲击函数序列的频谱为间隔 5 kHz 的冲击函数序列,两者的乘积相当于冲击函数序列对单个周期的 V_x 信号频谱的采样^[8]。因此 10 ms 信号 FFT 的结果为对 V_x 信号频谱以 5 kHz 间隔采样的结果,即图 7 所示的现象。

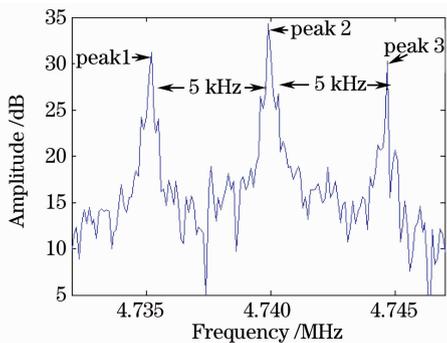


图 7 V_x 频谱细节

Fig. 7 Detail of V_x spectrum

解决上述问题的方法主要有以下两种:

1) 将采样时间设定为啁啾信号的一个周期。采用该方法就避免了图 7 中多频谱峰值的现象,图 8

即为缩短采样时间后的频谱图,但是由(11)式可知,该方法以牺牲信噪比约 8.5 dB 为代价^[10]。比较图 7,8,可知实际信噪比下降了约 7 dB,基本吻合于理论计算。所以实验中采用的为方法 2)。

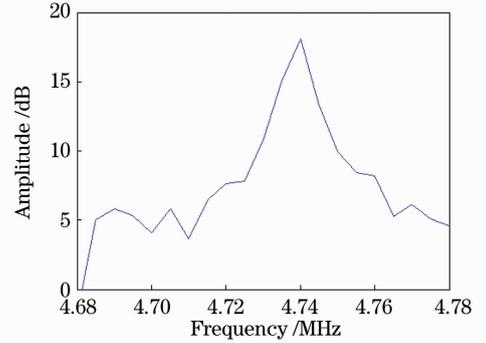


图 8 采样时间为 1 个啁啾周期时的频谱

Fig. 8 V_x spectrum when the sampling time is a chirp period

2) 采样点数较多时的信噪比

$$R_{SN-L} = \sqrt{n}R_{SN-S}, \quad (11)$$

式中 R_{SN-S} 为采样点数较少时的信噪比, n 为前者与后者采样点数的比值。

改进频谱峰值的计算办法,选取频谱最高 3 点^[8],由这 3 点的位置按频谱能量加权平均估计真实的频谱峰值位置。实验系统中,由于光斑的尺寸较小,无法对多目标实现无遮挡,不能运用传统的多目标来测试该系统的距离分辨率,因此根据上述方法 2) 采取多次移动目标靶位置的方法来模拟该雷达系统多目标距离分辨能力。具体方法是,每次将靶移动 20 cm^[11],采下时域波形,再将不同距离下对应的时域波形叠加,对该时域波形进行傅里叶变换,观察其频谱图,分析其距离分辨率。实验结果表明,当目标靶移动到 80 cm 时,频谱最高的 3 个峰值向右明显偏移,如图 9 所示。可见该雷达系统可以达到 0.8 m 的距离分辨率。根据(12)式:

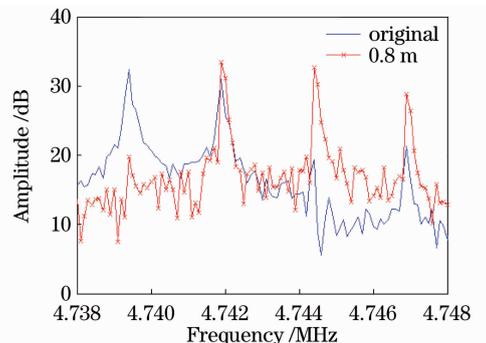


图 9 距离分辨率测试

Fig. 9 Measurement of range resolution

$$\Delta R = \frac{c}{2B}, \quad (12)$$

可得理论距离分辨率约为 0.75 m, 实验结果与理论值基本吻合。

4.2.2 距离误差测试

分别将目标靶移动 80 cm 和 1.20 m 的距离, 对这两段距离的频谱图分别测 8 组数据, 再与基准距离的频谱图进行比对, 根据频谱峰值的移动可以得到相应的距离变化量^[11], 实验中测量的距离变化量如图 10 所示。该雷达系统的测距精度用均方差表示为

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_1)^2} = 1.81 \text{ cm}, \quad (13)$$

$$\Delta_2 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_2)^2} = 2.17 \text{ cm}, \quad (14)$$

式中 \bar{X}_1, \bar{X}_2 为多次测量后的平均值。可见该雷达系统测距误差可以达到厘米级, 与公式 $\Delta = \frac{c}{2\pi B \sqrt{2R_{SN}}}$ 所得到的理论值^[12~14] 基本相符。

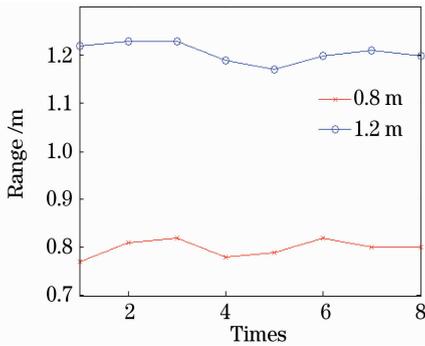


图 10 距离误差测试

Fig. 10 Measurement of range error

4.3 最小可探测功率测试

实验中还对系统的最小可探测功率进行了测试。将回波功率调节到 0.1 nW 时, 此时采集信号的频谱如图 11 所示, 可见该信号的信噪比依然可以达到约 8 dB。因此, 该系统的探测灵敏度优于 0.1 nW。

5 结 论

采用了一种零差探测激光雷达方案, 完成了对目标靶速度和距离的同时测量, 其本振和发射光信号幅度被同一啁啾信号调制, 本振与回波平衡相干探测的过程中完成去啁啾混频。该系统主要优点是

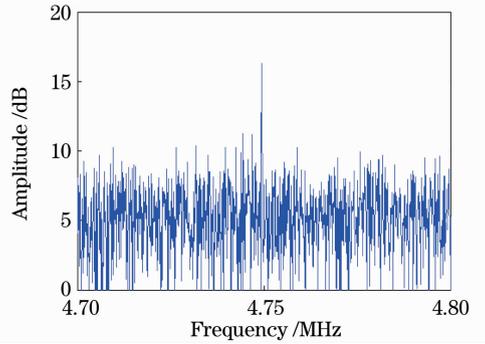


图 11 回波为 0.1 nW 时的信号频谱

Fig. 11 Signal spectrum when $P_s = 0.1 \text{ nW}$

探测灵敏度高, 系统结构简单, 易于工程化应用。但系统仍然存在一些问题, 如啁啾调制非线性导致探测精度受到限制; 本振功率的变化带来了更多的噪声以及杂散信号, 大的杂散信号可能干扰真实的探测信号等等, 因此还需要对系统进行进一步的测试与优化。

参 考 文 献

- Tian Zhaoshuo, Wang Qi, Wang Chunhui *et al.*. Study on ranging signal of pulse coherent laser radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1081~1083
田兆硕, 王 骥, 王春晖等. 脉冲相干激光雷达测距信号研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1081~1083
- Wang Chunhui, Wang Qi, Zhao Shumin. Polarization matching on pulsed laser heterodyne signal[J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(2): 80~82
王春晖, 王 骥, 赵树民. CO₂ 激光脉冲外差信号偏振匹配研究[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(2): 80~82
- B. L. Stann, W. C. Ruff, Z. G. Sztankay. Intensity-modulated diode laser radar using frequency-modulation/continuous-wave ranging techniques[J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(11): 3271~3272
- Peter Adany, Christopher Allen, Rongqing Hui. Chirped lidar using simplified homodyne detection[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(16): 3351~3353
- Dai Yongjiang. *The Principle of Lidar*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 233~239
戴永江. *激光雷达原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 238~239
- Christopher Allen, Yanki Cobanoglu, Skeen Kenny Chong *et al.*. Development of a 1310-nm, coherent laser radar with rf pulse compression[C]. Proc. 2000 Internat. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'00), Honolulu, Hawaii: 1784~1786
- Li Lei, Zhao Changming, Gao Lan *et al.*. Laser detection by electronic instead of optical using two-frequency laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 249~252
李 磊, 赵长明, 高 岚等. 变光外差为电外差的双频激光探测[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 249~252
- Meng Zhaohua, Hong Guanglie, Hu Yihua *et al.*. Research on chirped amplitude modulation coherent lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2446~2450
孟昭华, 洪光烈, 胡以华等. 啁啾调幅相干探测激光雷达关键技术研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2446~2450
- Zhang Rongquan, Huang Yulin, Yang Jianyu. Ambiguity

- function and resolution characteristic of bistatic linear FMCW radar signal [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, **29**(4): 838~839
- 张容权, 黄钰林, 杨建宇. 双基地线性 FMCW 雷达信号模糊函数及分辨特性[J]. *电子与信息学报*, 2007, **29**(4): 838~839
- 10 M. I. Skolnik. Theoretical accuracy of radar measurements[J]. *IRE Transactions on Aeronautical and Navigational Electronics*, 1960, **93**: 123~129
- 11 Zhao Jiguang, Zhang Zhiqian, Deng Chen. Research on design and experiment of FM/cw lidar system [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2009, **20**(3): 61~64
- 赵继广, 张智铨, 邓 陈. FM/cw 激光雷达系统设计与实验研究[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2009, **20**(3): 61~64
- 12 Wang Chunhui, Cheng Xiangyang, Liu Liping *et al.*. Distance measurement of a target with CO₂ coherence imaging lidar of short pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6): 555~558
- 王春晖, 成向阳, 刘丽萍 等. 窄脉冲 CO₂ 相干激光成像雷达目标距离测量研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 555~558
- 13 A. V. Jelalian. *Laser Radar Systems* [M]. London: Aetrch House Boston, 1992. 45
- 14 J. S. Accetta, D. L. Shumaker. *Active Electro-Optical Systems* [M]. Bellingham: Infrared Information Analsis Center and SPIE Optical Engineering Press, 1993. 62~65