

文章编号:1001-5078(2022)01-0010-05

· 激光应用技术 ·

脉冲压缩激光雷达多普勒补偿方法

张涛,潘璠

(中国电子科技集团公司第二十七研究所,河南 郑州 450047)

摘要:激光雷达动目标引起的多普勒频移较大,无法有效进行脉冲压缩且距离与速度耦合严重,严重影响激光雷达动目标检测性能及测距精度,针对上述问题,本文提出一种多普勒补偿方法,该方法采用双频共轭处理求解速度模糊,然后对目标进行多普勒补偿,同时解决激光雷达动目标距离速度耦合及脉压性能问题,提高目标检测性能和测距精度。采用目标回波仿真数据进行实验,实验结果表明了本文方法的有效性。

关键词:脉冲压缩;多普勒频率;激光雷达

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.01.002

A Doppler compensation method for pulse compression laser radar

ZHANG Tao, PAN Fan

(The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: The Doppler frequency produced by moving target is very large in laser radar. The pulse compression performance is reduced and the range-velocity coupling problem is severe by the Doppler frequency, which seriously affects detection performance and ranging precision. In order to solve this problem, a Doppler compensation method is proposed in this paper. The method adopts double carrier frequency conjugated processing to solve the velocity ambiguity. Then by using the unambiguous velocity to compensate the raw data, the range-velocity coupling and pulse compression problems are simultaneously solved. The target detection performance and ranging precision are improved. The target echo signal is simulated and experimented. The experimental results indicate that the method is effective.

Keywords: pulse compression; Doppler frequency; laser radar

1 引言

随着激光雷达技术的发展,相干激光雷达由于其灵敏度高、可同时测距测速等独特的技术特点逐渐受到人们的重视。脉冲压缩技术通过采用脉冲压缩信号,有效解决了雷达作用距离与距离分辨率之间的矛盾,在现代雷达上得到了广泛的应用,脉冲压缩技术同样可以应用于激光雷达中^[1]。目前常用的脉冲压缩信号为线性调频信号,将线性调频脉冲压缩信号应用于相干激光雷达时^[2-3],由于激光雷

达的波长比微波雷达小几个数量级,因此动目标引起的多普勒频移很大,严重影响激光雷达的脉冲压缩性能,且造成严重的距离速度耦合现象,无法有效的进行动目标检测及精确测距。

针对相干激光雷达动目标探测引起的脉压及距离速度耦合问题,采用双频共轭处理求解速度模糊^[4],利用动目标的非模糊速度对目标回波数据进行多普勒补偿,然后对补偿后的数据进行脉冲压缩,脉压性能得以有效改善,且目标的距离速度耦合现

象显著减小,目标测距精度得以有效提高,仿真实验验证了该方法的有效性。

2 线性调频回波信号模型

采用线性调频脉冲压缩信号,脉冲宽度为 T_p , 信号带宽为 B ,则激光雷达发射的基带信号可以表示为:

$$u(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j\pi \frac{B}{T_p} t^2) \quad (1)$$

其中, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形脉冲信号。

假设在距离激光雷达一定距离处有一匀速运动的目标,则目标回波信号为:

$$S_r(\hat{t}, n) = Av(\hat{t} - \tau_n) \exp(-j2\pi f_0 \tau_n) \quad (2)$$

其中, A 表示目标回波幅度; f_0 为激光频率; $\hat{t} = t - nT$ 为快时间; T_r 表示脉冲重复周期; $\tau_n = 2(R_0 + vnT_r)/c$ 为目标的回波时延; R_0 为目标与激光雷达的相对距离; v 为目标的径向速度。

目标回波信号经匹配滤波脉压后的时域信号为:

$$S_o(\hat{t}, n) = A \times \text{psf}(\hat{t} - \tau_n + f_d \times T_p/B) \exp(-j2\pi f_0 \tau_n) \quad (3)$$

式中, $\text{psf}(\hat{t})$ 为点散布函数; $f_d = -2vf_0/c$ 为多普勒频率。

根据公式(3)可知,多普勒频移使得脉压信号的峰值发生移动,偏移量为:

$$\Delta t = f_d \times T_p/B \quad (4)$$

由式(4)可见,脉压后的目标位置与动目标的多普勒频率有关,多普勒频率越大,目标距离与速度的耦合越严重,引起的测距误差越大^[5]。此外,脉冲压缩的匹配函数为发射基带信号的共轭倒置,只有落在基带信号带宽 B 频率以内的回波信号能够有效压缩,因此,动目标的多普勒频率越大,匹配压缩段越窄,脉压信噪比越低,主瓣展宽越大,严重影响激光雷达动目标的检测性能。

3 基于双频共轭处理的多普勒频率补偿方法

激光雷达采用线性调频脉冲压缩信号后,可兼顾雷达的作用距离和距离分辨率,但是,在探测动目标时,由于激光的波长较小,会引起较大的多普勒频移,从而影响激光雷达的脉冲压缩性能和距离测量精度,进而影响激光雷达的目标检测和测距能力。

若要改善线性调频脉冲压缩激光雷达的性能,则需要进行多普勒补偿,如果能够估计出目标的径向速度,则可以直接进行多普勒补偿,实际上目标的径向速度是不可预知的,而且通常要求激光雷达能够测量出目标的径向速度。

由于激光雷达的波长较短,即使较慢速度的运动目标也会产生较大的多普勒频率,从而造成多普勒速度模糊,本文采用双频共轭处理可以求解速度模糊。假设雷达同时发射两个载频分别为 f_{01} 和 f_{02} 的线性调频信号,首先对两个载频的回波信号进行脉冲压缩,得:

$$S_{r1}(\hat{t}, n) = A \times \text{psf}(\hat{t} - \tau_n + f_{d1} \times T_p/B) \cdot \exp(-j2\pi f_{01} \tau_n) \quad (5)$$

$$S_{r2}(\hat{t}, n) = A \times \text{psf}(\hat{t} - \tau_n + f_{d2} \times T_p/B) \cdot \exp(-j2\pi f_{02} \tau_n) \quad (6)$$

由于载频 f_{01} 和 f_{02} 比较接近,因此 f_{d1} 与 f_{d2} 所引入的目标位置的偏移差在一个距离单元内,式(5)和式(6)共轭相乘处理得:

$$\begin{aligned} S_r(\hat{t}, n) &= S_{r2}(\hat{t}, n) \times S_{r1}^*(\hat{t}, n) \\ &\approx |A \times \text{psf}(\hat{t} - \tau_n + f_{d1} \times T_p/B)|^2 \exp(-j2\pi(f_{02} - f_{01})\tau_n) \end{aligned} \quad (7)$$

对式(7)的幅值开方,则上式转化为:

$$S_r(\hat{t}, n) \approx |A \times \text{psf}(\hat{t} - \tau_n + f_{d1} \times T_p/B)| \cdot \exp(-j2\pi(f_{02} - f_{01})\tau_n) \quad (8)$$

信号 $S_r(\hat{t}, n)$ 的等效中心频率为 $\Delta f(f_{02} - f_{01})$, 远小于激光雷达信号频率,该等效中心频率引起的多普勒频率较低,不会产生多普勒模糊,利用该多普勒频率解算动目标速度,然后利用动目标解算速度求解激光雷达信号频率的无模糊多普勒频率,最后,使用无模糊多普勒频率对激光雷达目标回波数据进行多普勒补偿后再进行脉冲压缩。

基于双频共轭处理的多普勒频率补偿方法信号处理流程如下:

1) 对发射载频分别为 f_{01} 和 f_{02} 的目标回波信号分别进行脉冲压缩;

2) 对上述脉压后的两个信号进行共轭相乘处理,得到等效中心频率脉压信号;

3) 将等效中心频率脉压信号进行 MTD 处理,根据检测门限目标所在的多普勒单元位置,求解过

门限目标的速度;

4) 根据上述求解目标速度和脉冲重复频率, 解出激光雷达载频 f_{01} 对应的速度模糊数 F ;

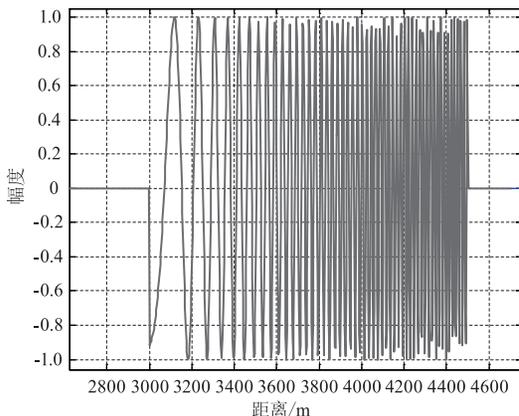
5) 应用速度模糊数 F , 对发射载频为 f_{01} 的激光雷达目标回波信号进行多普勒补偿;

6) 对多普勒补偿后的数据进行脉冲压缩处理。

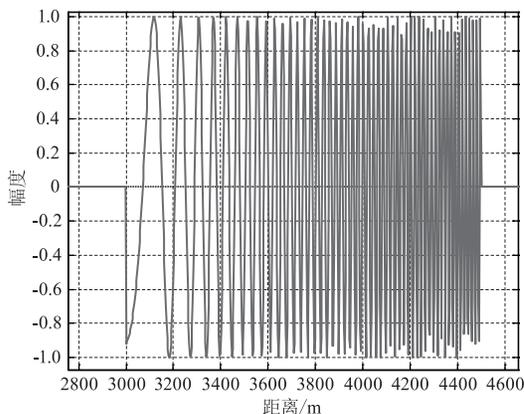
4 仿真实验

采用目标回波仿真数据开展实验, 仿真参数设置如下: 激光雷达波长 1550 nm, 线性调频基带信号的中心频率分别为 100 MHz 和 700 MHz, 基带信号对激光雷达脉内调制后, 激光雷达发射的载波频率 f_{01} 和 f_{02} 之间相差 600 MHz, 基带信号时宽 10 μ s, 带宽 10 MHz, 脉冲重复周期 250 μ s, 目标的径向速度 $V_t = -4$ m/s, 目标起始距离 $R_0 = 3000$ m, 脉冲累积个数为 512。

载频 f_{01} 和 f_{02} 的模拟目标回波信号如图 1 所示。



(a) 载频 f_{01} 目标模拟回波信号



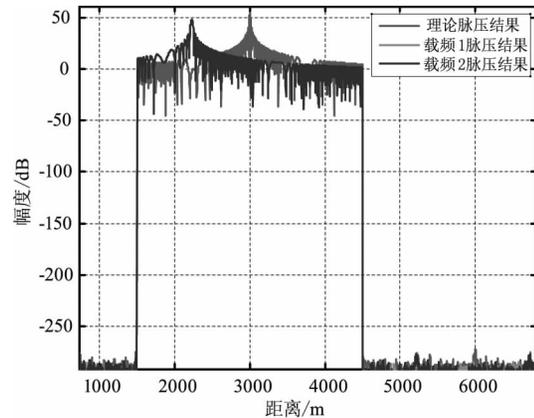
(b) 载频 f_{02} 目标模拟回波信号

图 1 模拟目标回波信号 (实部)

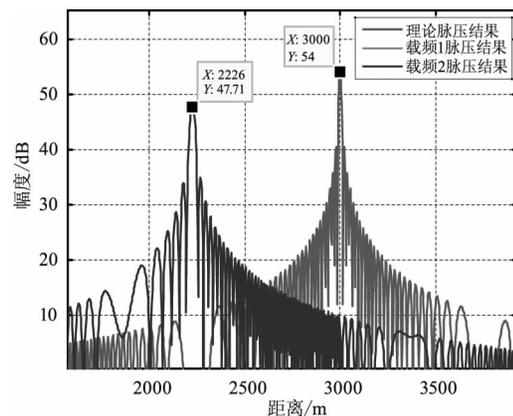
Fig. 1 Simulated target echo signal (real part)

对载频 f_{01} 和 f_{02} 的模拟目标回波信号分别进行脉冲压缩, 脉压结果与理论理想脉压结果 (完全补

偿多普勒频移) 如图 2 所示。由图 2 可见, 由于激光波长短, 动目标产生的多普勒频率大, 与理论理想脉压结果相比, 载频 f_{01} 和 f_{02} 的回波信号的脉压信噪比低 (下降约 6.3 dB), 主瓣展宽, 且由于距离与多普勒耦合严重, 脉压峰值位于 3774 m 处, 严重偏离目标的真实位置 3000 m 处。



(a) 距离脉压处理结果 (整体)



(b) 距离脉压处理结果 (局部放大)

图 2 目标回波信号距离脉压处理结果

Fig. 2 Processing result of range pulse compression of target echo signal

载频 f_{01} 和 f_{02} 的模拟目标回波信号分别进行脉冲压缩后, 按照公式 (7)、(8) 进行双频共轭处理, 共轭处理后的等效中心频率脉压信号如图 3 所示。

对双频共轭处理后的等效中心频率脉压信号进行 MTD 处理, MTD 处理结果如图 4 所示。

根据 MTD 处理结果, 过门限目标所在的多普勒位置为第二个多普勒单元, 因此动目标的多普勒频率为:

$$f_d = 2 \times \frac{\text{PRF}}{512} = 2 \times \frac{4000}{512} = 15.625 \text{ Hz}$$

动目标相应的速度估计为:

$$v_{\text{estimate}} = -\frac{c}{2 \times \Delta f} \times f_d = -\frac{0.5}{2} \times 15.625$$

$$= -3.90625 \text{ m/s}$$

根据动目标速度估计值 v_{estimate} 和脉冲重复频率 PRF, 可以求解出激光雷达载频 f_{01} 对应的速度模糊数 F :

$$F = \text{int}\left(\frac{2 \times v_{\text{estimate}}}{c \times \text{PRF}}\right) = -1260$$

根据解算的速度模糊数 F 对激光雷达载频 f_{01} 的目标回波数据进行多普勒补偿, 补偿公式为:

$$S_{\text{r1dopcomp}}(\hat{t}, n) = S_{\text{r1}}(\hat{t}, n) \times \exp(j2\pi \times F \times \text{PRF} \times t)$$

对补偿后的激光雷达载频 f_{01} 的目标回波数据进行脉冲压缩处理, 脉压后的结果如图 5 所示。

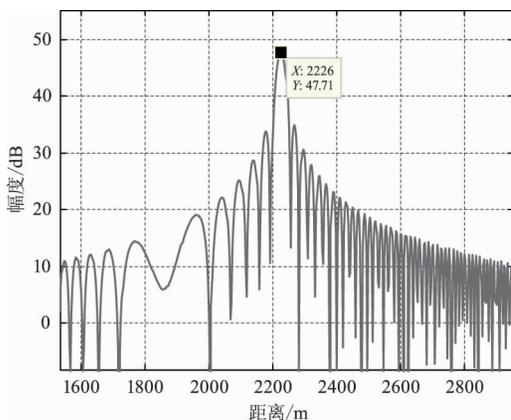


图3 双频共轭处理结果

Fig. 3 Processing result of dual-frequency conjugation

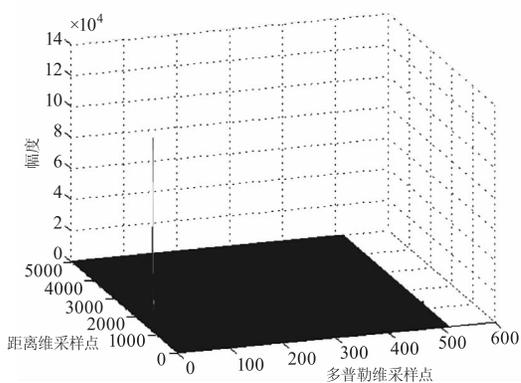
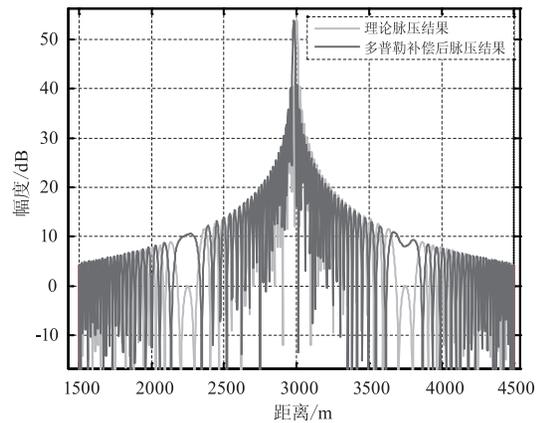


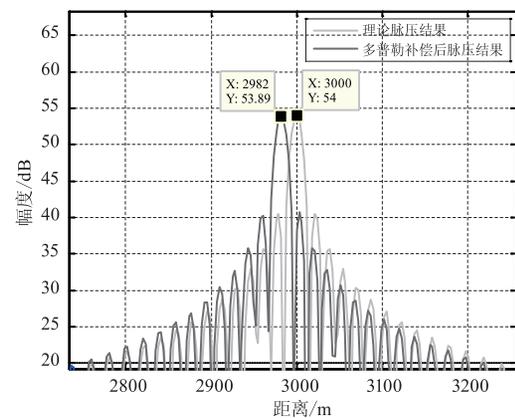
图4 双频共轭处理 MTD 结果

Fig. 4 Results of dual-frequency conjugate processing MTD

由图 5 可以看出, 采用本文方法, 目标回波信号经多普勒补偿后进行距离脉压, 距离脉压结果与理论理想脉压结果基本吻合, 与理论理想脉压结果相比, 多普勒补偿后回波信号的脉压信噪比下降约 0.1 dB, 脉压峰值位于 2982 m 处, 偏离目标真实位置不大, 验证了本文方法的有效性。



(a) 多普勒补偿后距离脉压结果 (整体)



(b) 多普勒补偿后距离脉压结果 (局部放大)

图5 回波信号多普勒补偿后距离脉压结果

Fig. 5 Range pulse pressure results after Doppler compensation of echo signal

为了比较未多普勒补偿脉压、本文多普勒补偿后脉压及理论理想(完全补偿多普勒频移)脉压结果, 将脉压结果列表表示, 具体数值如表 1 所示。

表 1 模拟目标脉压结果比较

Tab. 1 Comparison of simulated pulse pressure results

脉压方法	脉压结果 幅度值/dB	脉压峰值 位置/m	真实目标 位置/m
理论理想脉压(完全补偿多普勒频移)	54	3000	3000
未多普勒补偿脉压	47.71	2226	3000
本文多普勒补偿后脉压	53.89	2982	3000

由表 1 可见, 与未经多普勒补偿脉压结果相比, 采用本文多普勒补偿方法后的脉压结果幅度值提高 6.18 dB, 目标位置从偏离目标真实位置 774 m 缩小到偏离目标真实位置 18 m, 明显减轻了距离多普勒耦合现象, 提升了激光雷达的目标检测和测距性能。

与理论理想脉压结果相比,多普勒补偿后脉压结果性能略有下降(信噪比下降约 0.1 dB),这是由于目标速度先验信息未知,不能够完全补偿动目标引起的多普勒频率所致,实际上相干激光雷达动目标的速度是通过目标回波信号进行 MTD 处理来估计,所以事先不可预知,也就无法进行精确补偿。本文方法由于未能完全补偿目标多普勒频率所引起的脉压性能略微下降问题在微波脉冲多普勒雷达中也很常见,因此对实际应用的影响微乎其微。

5 结 论

本文探讨了激光雷达动目标的脉冲压缩及距离速度耦合问题,针对线性调频信号,提出了相应的解决方法,仿真结果验证了本文方法的有效性。本文方法不需要知道目标的先验速度信息,对于改善激光雷达对运动目标的检测及测距性能具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] CAO Chang-dong, QIN Peng, SUI Xiao-lin, et al. Application of pulse compression technology in coherent laser radar[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(6): 659 - 662. (in Chinese)
曹昌东,秦鹏,眭晓林等. 脉冲压缩技术在相干激光雷达中的应用研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(6): 659 - 662.
- [2] Zhou Yanzong, Wang Chong, Liu Yanping, et al. Research progress and application of coherent wind lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 02001 - 1. (in Chinese)
周艳宗,王冲,刘燕平,夏海云. 相干测风激光雷达研究进展和应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 02001 - 1.
- [3] QIU Yuan, HUANG Lei, WANG Wei. Application of pulse compression in laser range-finding[J]. *Modern Electronics Technique*, 2016, (11): 59 - 62. (in Chinese)
裘园,黄磊,王巍. 脉冲压缩在激光测距中的应用[J]. *现代电子技术*, 2016, (11): 59 - 62.
- [4] YIN Jian-feng, LI Dao-jing, TANG Li-bo, et al. Spaceborne SAR detecting and imaging of airborne moving targets[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1032 - 1036. (in Chinese)
尹建凤,李道京. 星载 SAR 的空中运动目标检测与成像[J]. *电子学报*, 2007, 35(6): 1032 - 1036.
- [5] LIU Yan-yan, XU Shi-wei. Research on target detection technology based on laser echo signal[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(4): 42 - 45. (in Chinese)
刘严严,徐世伟. 基于激光回波信号的目标检测技术研究[J]. *光电技术应用*, 2017, 32(4): 42 - 45.