

调频连续波激光雷达高速目标测量误差的校正方法

张恒康*, 王立**, 郭绍刚, 李林

北京控制工程研究所空间光电测量与感知实验室, 北京 100190

摘要 调频连续波(FMCW)激光雷达具备同步高精度测距测速能力,在空间目标测量等领域中有重要应用前景。然而,目标高速运动导致雷达干涉中频信号发生频谱展宽,对测量精度形成了严重影响。为此,对FMCW激光雷达测量高速目标问题开展理论分析,建立了中频信号频谱的理论表述,利用频谱对称性的特征,提出了一种新型的基于频谱自卷积的中频频率解算算法。通过数值仿真进行验证,证实此算法可有效校正频谱展宽导致的测量误差,实现目标距离和速度的高精度测量,与传统方法相比,可在相同信噪比条件下实现测量精度三个数量级以上的提升。此算法运算量小,抗噪声干扰能力强,且应用前景广阔,对于推进FMCW激光雷达在空间碎片观测预警等空间技术领域的应用具有积极意义。

关键词 测量; 激光雷达; 调频连续波; 频谱展宽; 误差校正

中图分类号 TN958.98 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL221415

1 引言

人类首次开展航天活动至今的60余年时间里,航天技术已实现突飞猛进的发展。但与此同时,空间碎片问题成为一项日益凸显的重大隐患,受到各国政府和科研人员的密切关注^[1-3]。空间碎片对在轨运行的航天器有极高的碰撞风险,对航天器与航天员的安全构成致命威胁。基于空间碎片位置和速度的测量,建立信息编目与碰撞预警机制,引导航天器主动规避,是避免碰撞的有效方法^[4]。调频连续波(FMCW)激光雷达具备实时同步测距测速能力,且测距范围大、测量精度高,在空间碎片观测等技术中具有巨大的应用潜力^[5-8]。

FMCW激光雷达通常采用线性频率调制激光作为信号光进行测量,目标反射的信号光与本振光干涉形成频率与传输延时成正比的中频信号,通过测量中频频率即可获得目标距离。但同时目标运动引起的多普勒效应会使中频频率发生偏移,导致目标距离和速度信息在中频信号中相互耦合。距离与速度的解耦已成为FMCW激光雷达领域的重要研究方向。针对这一问题,通常利用多个不同斜率调频分量的测量结果解算多普勒频移,并形成多种实现方法^[9-15]。其中,双边带FMCW激光雷达^[14-15]利用时域上完全同步的上下两个调频分量对目标同时进行测量,是实现实时精确测距测速的理想方案。然而,对于空间碎片观测中的应用,空间碎片的高速运动仍会带来新的挑战:

(1) 空间碎片运动速度可达10 km/s以上^[16],在激光雷达常用的近红外或可见光波段引入的多普勒频移达到10 GHz量级,远超过常用的探测器带宽;(2) 目标高速运动使中频信号时宽带宽积增大,频谱发生展宽,中频频率难以确定^[17]。对于前者,目前已有一系列研究工作,并形成了两种主要的解决方案:构建双频雷达系统,将射频频段的拍频频率作为基频以降低多普勒频移^[18];或者通过光学锁相环对多普勒频移进行动态补偿,将中频频率控制在探测带宽以内^[19-20]。而对于后者的研究工作则相对较少。赵继广等^[21]提出了均匀分段快速傅里叶变换(FFT)算法,通过对中频信号分段并各自提取信息,可实现高速运动目标距离和速度的测量。然而,该方法的分段处理会导致各段有效信号强度降低,不利于远距离目标弱回波条件下的测量;同时对于分段后信号时宽带宽积仍然较大的情况,该方法的使用也受到限制。对于高速运动目标,仍需研究新的中频频谱分析方法和高精度测距测速技术。

本文提出基于频谱自卷积的中频频率解算算法,将其应用于双边带FMCW激光雷达对高速运动目标的测量。首先,通过建立目标高速运动条件下的双边带FMCW激光雷达测量模型,推导了中频频谱的理论表述,利用中频频谱对称特性,通过频谱自卷积对中频频率和目标的距离、速度进行解算;然后,通过数值仿真验证了理论模型的正确性以及算法在噪声干扰条件下的有效性。本文提出的算法无需对信号进行分

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2023-01-16; 录用日期: 2023-02-06; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(52275083, 51905034)

通信作者: *zhk9321@163.com; **wupeng3992@163.com

段处理、运算量小、应用范围广、抵抗噪声能力强,可实现高速运动目标距离和速度的高精度测量,对于 FMCW 激光雷达在空间碎片观测预警中的应用具有积极意义。

2 高速目标测量模型

2.1 中频信号时域波形

FMCW 激光雷达的测量原理简图如图 1(a)所示。信号激光分束作为相干测量的本振光 E_{LO} , 目标反射的回波信号光 E_s 与 E_{LO} 进行混频, 干涉产生的中频信号由激光雷达接收和探测。目标在雷达视线方向上速度为 v , 且初始时刻到雷达的距离为 D_0 。双边带调频的频率-时间关系如图 1(b)中的绿色曲线所示, 本振光 E_{LO} 包含上下两个线性调频分量, 其调频斜率互为相反数, 初始频率分别为 f_m 和 $-f_m$, 调频带宽为 B , 周期为 T 。回波信号光 E_s 相对于本振光, 除有与距离相关的延时 Δt 之外, 还引入了与运动速度相关的多普勒频移 f_d , 如图 1(b)中的蓝色曲线所示。因此回波信号光和本振光的干涉中频信号中包含着目标距离和运动速度信息。

下面对干涉中频信号进行理论分析。首先, 本振光可表示为^[14]

$$E_{LO} = A_{LO} \exp(i2\pi f_l t + i2\pi f_m t + i\pi k t^2 + i\varphi_{LO}) + A_{LO} \exp(i2\pi f_l t - i2\pi f_m t - i\pi k t^2 + i\varphi_{LO}), \quad (1)$$

式中: A_{LO} 和 φ_{LO} 分别表示本振光的振幅和相位; f_l 为激光频率; k 为调频斜率。

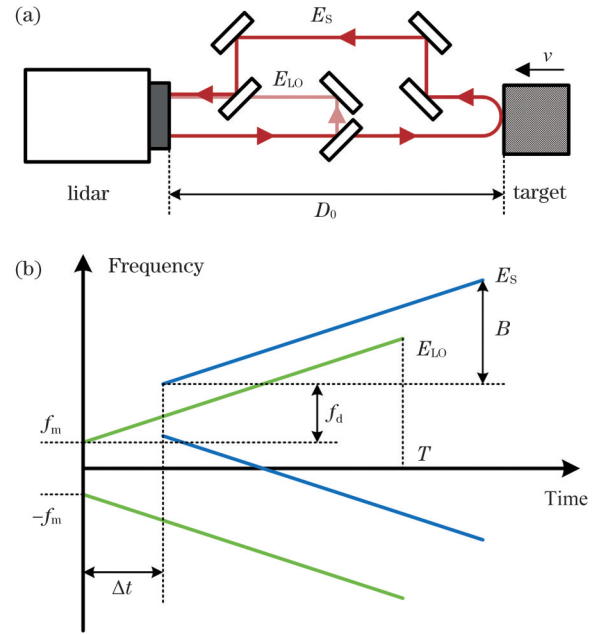


图 1 FMCW 激光雷达测量原理。(a)测量原理简图; (b)本振光与回波信号光的频率-时间关系
Fig. 1 Measurement principle of FMCW lidar. (a) Simplified schematic diagram of measurement principle; (b) time-frequency diagrams of local oscillator signal E_{LO} and received echo signal E_s

本振光和回波信号光在激光雷达中进行光学混频。应用双平衡式外差正交探测技术可以滤除混频信号中的直流强度分量, 输出中频电信号, 进而实现中频频率和相位信息的解调^[22]。中频电信号可表示为

$$I = \eta A_{LO} A_s \exp\left[-i2\pi(f_l + f_m)\frac{2v}{c-v}t + i2\pi k\xi_1\frac{2D_0}{c-v}t - i2\pi k\xi_2\frac{2vt^2}{c-v}\right] + \eta A_{LO} A_s \exp\left[-i2\pi(f_l - f_m)\frac{2v}{c-v}t - i2\pi k\xi_1\frac{2D_0}{c-v}t + i2\pi k\xi_2\frac{2vt^2}{c-v}\right], \quad (2)$$

式中: $\xi_1 = (c+v)/(c-v)$; $\xi_2 = c/(c-v)$; c 为光速。

可见中频信号两个成分的相位各包含三项: 第一项为目标运动速度引入的多普勒频移项; 第二项为与目标距离相关的差频率项; 第三项则为目标运动导致的线性频率调制项, 在目标低速运动条件下该项可以忽略, 但对于空间碎片等高速运动目标, 该项可使中频频谱发生明显的展宽。

下面对中频频谱的理论表述进行分析。

2.2 中频信号频谱

为便于讨论, 仅考虑式(2)中由上调频分量贡献的部分, 并对其进行化简, 写为

$$I(t) = \eta A_{LO} A_s \text{rect}\left(\frac{t-t_c}{T'}\right) \exp(i2\pi f_0 t - i\pi k_v t^2), \quad (3)$$

式中:

$$f_0 = k\xi_1\frac{2D_0}{c-v} - (f_l + f_m)\frac{2v}{c-v}, \quad (4)$$

$$k_v = k\xi_2\frac{4v}{c-v}, \quad (5)$$

T' 和 t_c 分别为信号时域宽度和中心时刻, 可表示为

$$T' = T - \frac{2D_0}{c+v}, \quad (6)$$

$$t_c = \frac{T}{2} + \frac{D_0}{c+v}. \quad (7)$$

对式(3)所示的信号做傅里叶变换, 得到其频谱 F 为

$$F(f) = \frac{\eta A_{LO} A_s}{\sqrt{2|k_v|}} \exp\left[-i\pi k_v \left(\frac{f-f_0+k_v t_c}{k_v}\right)^2\right] \cdot [C(k_1) + C(k_2) + iS(k_1) + iS(k_2)], \quad (8)$$

式中: C 和 S 表示菲涅耳积分; k_1 和 k_2 的定义为

$$k_1 = \sqrt{2|k_v|} \left(\frac{T'}{2} + \frac{f - f_0 + k_v t_c}{k_v} \right), \quad (9)$$

$$k_2 = \sqrt{2|k_v|} \left(\frac{T'}{2} - \frac{f - f_0 + k_v t_c}{k_v} \right). \quad (10)$$

取激光雷达调频带宽 $B = 3 \text{ GHz}$ 、调频周期 $T = 100 \text{ } \mu\text{s}$ 、初始调频频率 $f_m = 200 \text{ MHz}$ 、雷达到目标的初始距离 $D_0 = 1 \text{ km}$ ，在目标运动速度 v 分别为 0.5 、 1.0 、 2.5 、 5.0 、 7.5 、 10.0 km/s 的情况下，由式(8)计算得到中

频信号频谱幅值如图 2(a1)~图 2(f1)所示。可见在目标运动速度较低时，中频频谱呈现为单峰结构；随着运动速度的增加，频谱主瓣发生分裂并展宽。根据中频频谱理论表达式，其形状主要取决于调频带宽、调频周期和目标速度。在调频带宽和周期确定的情况下，中频频谱随目标速度增加而愈发展宽；而对于更大的调频带宽或更长的调频周期，则频谱在更低的目标速度条件下即可发生明显的展宽。

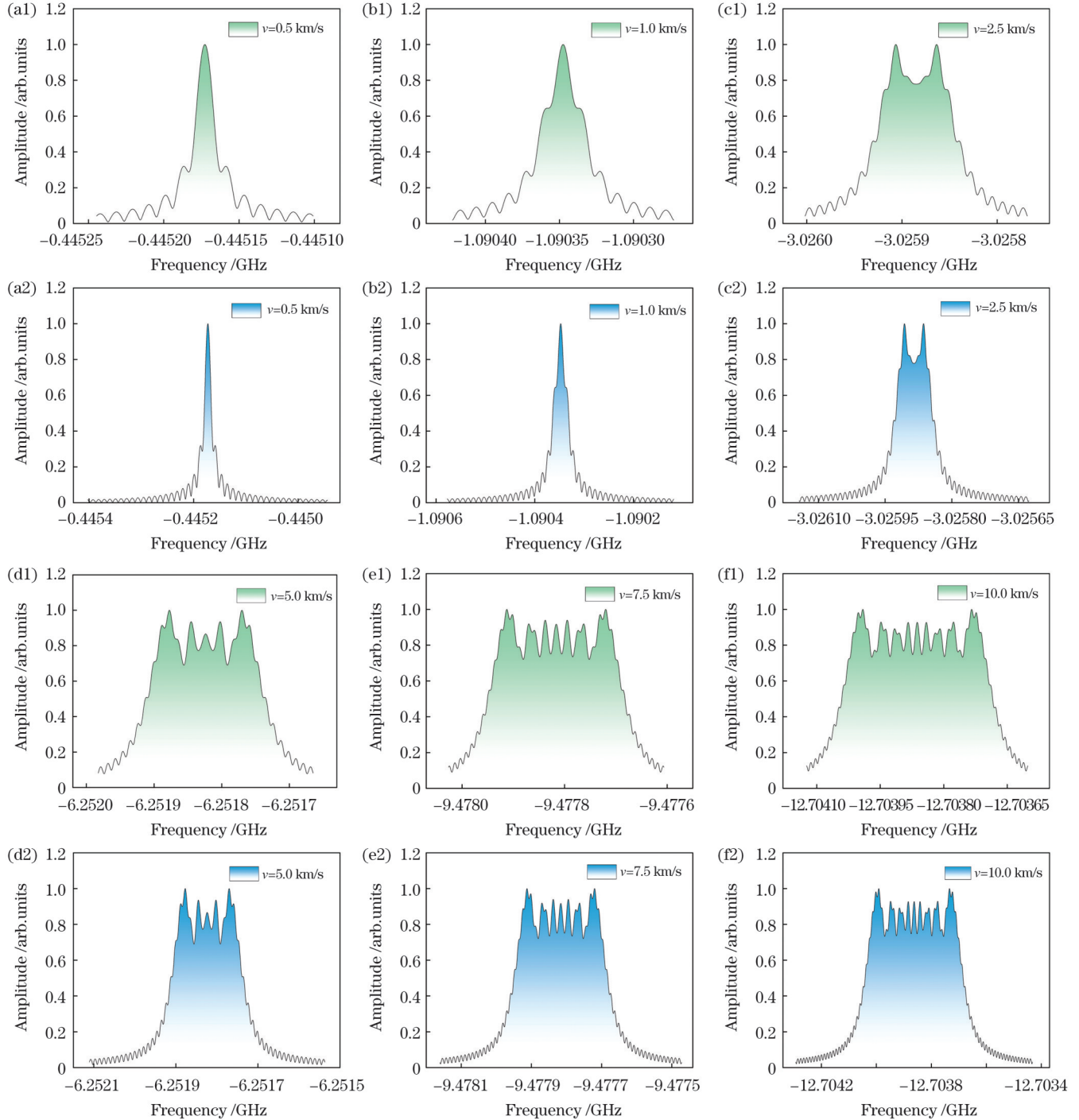


图 2 目标不同运动速度下的中频频谱。(a1)~(f1)理论分析结果；(a2)~(f2)数值仿真结果

Fig. 2 Intermediate frequency spectra at various velocities of target. (a1)–(f1) Theoretical results; (a2)–(f2) simulation results

2.3 目标距离与速度解算算法

在调频周期和带宽确定的情况下,尽管中频频谱随着目标运动速度的变化而变化,但由上述分析可见,频谱的幅值总是具有对称性的,且由式(8)可以得到频谱主瓣的中心频率,将其记为 f_{up} 。 f_{up} 可表示为

$$f_{up} = f_0 - k_v t_c = k\xi_1 \frac{2D_0}{c-v} - (f_l + f_m) \frac{2v}{c-v} - k\xi_2 \frac{4v}{c-v} \frac{T}{2} - k\xi_2 \frac{4v}{c-v} \frac{D_0}{c+v} \quad (11)$$

同理,下调频分量形成的中频频谱主瓣的中心频率 f_{down} 可表示为

$$f_{down} = -k\xi_1 \frac{2D_0}{c-v} - (f_l - f_m) \frac{2v}{c-v} + k\xi_2 \frac{4v}{c-v} \frac{T}{2} + k\xi_2 \frac{4v}{c-v} \frac{D_0}{c+v} \quad (12)$$

一旦 f_{up} 和 f_{down} 已知,即可利用上述两式得到目标运动速度 v 和初始距离 D_0 :

$$v = c / \left(-\frac{4f_l}{f_{up} + f_{down}} + \frac{1}{2} \right), \quad (13)$$

$$D_0 = \frac{c^2 - v^2}{c^2 + v^2} \left[\frac{(f_{up} + f_{down})(c - v)}{4k} + \frac{f_m v}{k} + \frac{vc}{c - v} T \right] \quad (14)$$

因此,中心频率 f_{up} 和 f_{down} 的提取是测距测速的关键,其提取精度也直接决定了测距测速精度。对于低速运动目标,中频频谱为单峰结构,中心频率即为峰值频率,通过峰值搜索算法便可得到。然而高速运动引起的频谱展宽使中心频率的特征弱化,不利于数据提取。尤其在存在噪声干扰时,频谱的准确形状无法得到,进一步增加了中心频率提取的不确定度,严重影响了测距测速精度。为解决此问题,需要根据中频频谱物理特征,寻找中心频率新的特征标记,开发新型高精度频率解算算法。

本文利用中频频谱的对称性,提出基于频谱自卷积的中频频率解算算法,算法流程框图如图3所示。值得注意的是,在截取有限长度序列 $F_n(f)$ 时,必须包含整个频谱主瓣。自卷积序列即 $F_n(f)$ 与其镜像序列在不同相对移动条件下乘积的求和。由于频谱幅值具有对称性,故存在一个相对移动频率值 Δf ,使 $F_n(f)$ 与其镜像序列的主瓣完全重合,此时卷积序列可以取最大值。根据其相对移动关系, Δf 的值即为频谱主瓣中心频率与峰值频率 f_p 差值的二倍,因此可计算得到频谱主瓣中心频率值。

为了验证前文所述理论分析结果的正确性,同时验证本文提出的中频频率解算算法的有效性,下面通过数值仿真研究双边带FMCW激光雷达对高速运动目标的测量。

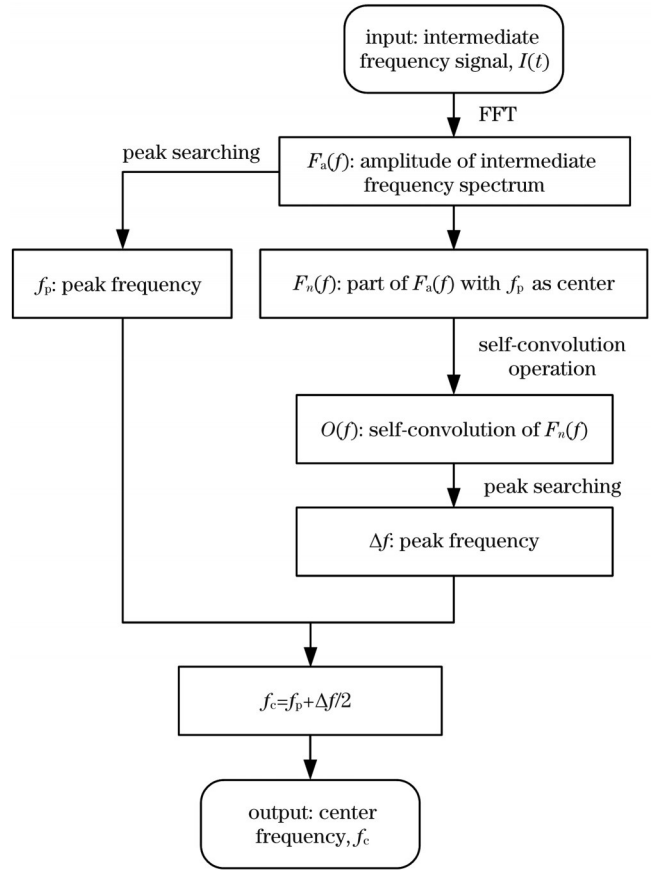


图3 基于频谱自卷积的中频频率解算算法框图

Fig. 3 Calculation process of intermediate frequency based on self-convolution of spectrum

3 数值仿真

3.1 数值仿真方法

作为仿真对象的双边带FMCW激光雷达测量系统如图4所示。激光光源发射双边带线性调频信号激光,经分束器分束后,其中一束作为本振光,另一束则经光学天线发射至目标,目标反射的回波返回激光雷达,由光学天线接收后,与本振光经过 90° 光混频器,形成信号光与本振光的相位延迟分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的四路混频信号,分别由两路平衡探测器探测得到中频信号。基于各个器件工作原理的数学模型搭建数值仿真平台,对于给定的信号光波形以及目标运动信息,仿真得到中频信号。中频信号由FFT确定主峰位置,之后由啁啾Z变换(CZT)得到主峰附近的精细化频谱。需要说明的是,为了单独研究雷达视线方向上目标运动速度对中频频谱以及测量精度的影响,仿真模型中没有考虑目标横向运动、表面散射等因素^[23-24]。

3.2 中频频谱仿真

数值仿真中使用的主要参数如表1所示,其中调制带宽、调制周期、初始调制频率、目标到雷达的初始距离等参数的设置与理论分析中一致。考虑到非合作目标的低反射率(0.2以下)以及传输中的光能损耗,将

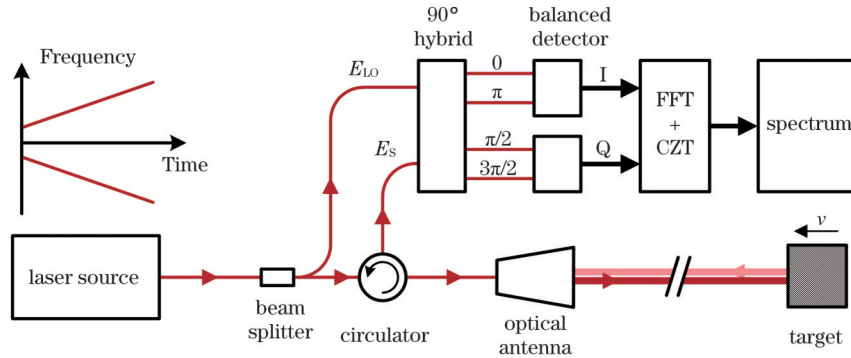


图 4 FMCW 激光雷达示意图
Fig. 4 Schematic diagram of FMCW lidar

雷达接收到的回波功率设置为 10 nW。利用表 1 中参数,在目标运动速度 v 分别为 0.5、1.0、2.5、5.0、7.5、10.0 km/s 的情况下,得到中频频谱的数值仿真结果如图 2(a2)~图 2(f2)所示。对比可见,数值仿真和理论分析结果在中频频谱结构和频率绝对数值方面均符合良好,从而验证了理论分析结果的正确性。

表 1 数值仿真中使用的参数
Table 1 Parameters used in numerical simulation

Parameter	Value
Laser wavelength /nm	1550
Modulation bandwidth /GHz	3
Modulation period / μ s	100
Initial modulation frequency /MHz	200
Echo power /nW	10
Local power /mW	1
Initial distance between lidar and target /km	1

3.3 高速运动目标测量仿真

以运动速度 5 km/s 的情况为例,对高速目标测距测速进行仿真。

首先,为分析高速运动引起的频谱展宽对传统方法测量精度的影响,利用峰值搜索算法提取中频频率,并代入式(13)和式(14),得到目标的距离与速度。在信噪比(SNR)为 10 的条件下重复 200 次仿真,得到的测距和测速结果分别如图 5(a)和图 5(b)所示。可见测距和测速结果均随机在三个离散数值点附近起伏,该现象是因为展宽后的频谱包含多个局部峰值点,在测量噪声影响下均有一定概率被峰值搜索算法识别为全局峰值,导致得到的中频频率在多个离散点处随机取值。图 5(a)和图 5(b)中的插图展示了中间数值点附近的数据,单独对这些数据进行分析,得到其均方差分别为 157.44 μ m 和 21.48 μ m/s。整体的测距随机误差约为 0.18 m (1σ),测速随机误差约为 0.03 m/s (1σ)。因此,目标高速运动引起的频谱展宽会对测量精度形成明显的影响。

然后,利用本文提出的基于频谱自卷积的中频解算算法进行仿真。中频频谱自卷积过程如图 6 所

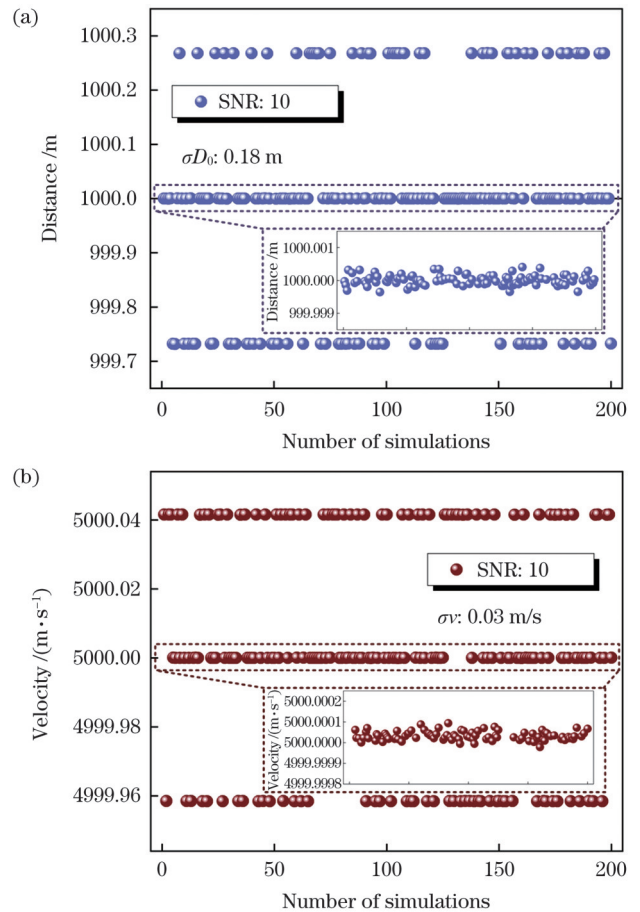


图 5 基于峰值搜索算法的测距测速仿真结果。(a)测距仿真结果;(b)测速仿真结果

Fig. 5 Simulation results of distance and velocity measurements based on traditional peak-searching method. (a) Simulation results of distance measurements; (b) simulation results of velocity measurements

示。图 6(a)为以峰值频率 f_p 为中心截取的频谱序列 $F_n(f)$,其自卷积序列 $O(f)$ 如图 6(b)所示。可见与理论分析相同,自卷积序列存在清晰的峰值,此特征即为本文提出算法的基础,利用此特征即可对图 6(a)中频谱主瓣的中心频率值进行准确提取。

在不同信噪比条件下,对运动速度为 5 km/s 的目标进行测距测速仿真,结果如图 7 所示。对于信

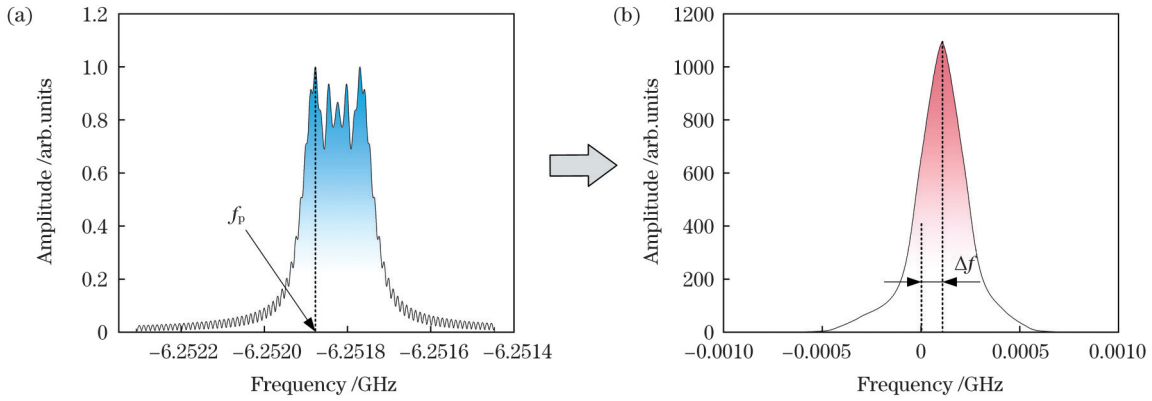


图 6 中频信号频谱的自卷积过程。(a)中频频谱;(b)中频频谱自卷积

Fig. 6 Self-convolution process of intermediate frequency spectrum. (a) Intermediate frequency spectrum; (b) self-convolution of intermediate frequency spectrum

噪比分别为 10、5 和 1 的情况,距离测量的仿真结果如图 7(a1)~图 7(c1)所示,速度测量的仿真结果如图 7(a2)~图 7(c2)所示。可见应用本文提出的算法,有效消除了测量结果在多个离散点处随机取值的情况,所有结果集中在一个数值点附近。在信噪比为 10 的条件下,测距随机误差为 $42.42 \mu\text{m}$ (1σ),而测速随机误差为 $6.72 \mu\text{m/s}$ (1σ),与相同条件下的传统方法相比,测量精度提高了三个数量级以上。即使与传

统方法单个数值点附近的数据相比,均方差也更低。随着信噪比的下降,测距测速的随机误差均会增加。然而在信噪比为 1 的条件下,测距随机误差为 $421.48 \mu\text{m}$ (1σ),测速随机误差为 $65.19 \mu\text{m/s}$ (1σ),仍可实现较高的测量精度。因此,基于频谱自卷积的中频频率解算算法不仅可以有效校正目标高速运动引入的测量误差,提高测量精度,同时也具有较强的抗噪声能力。

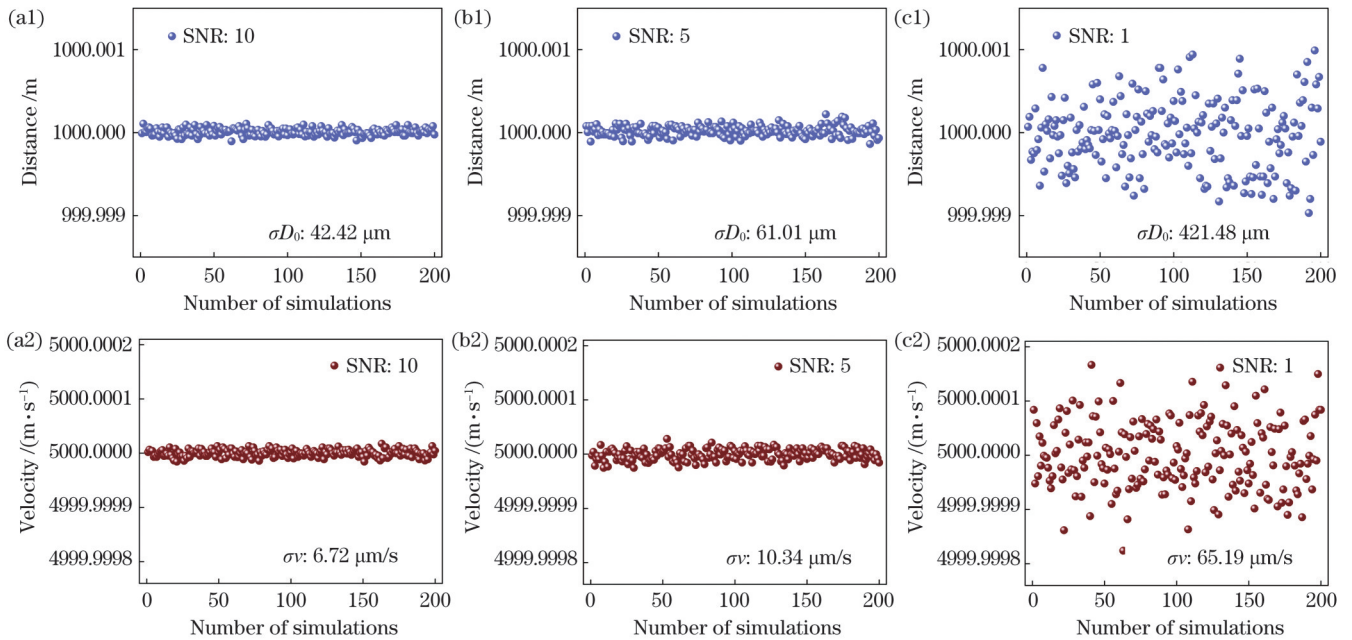


图 7 基于本文提出算法的数值仿真结果。(a1)~(c1)距离测量仿真结果;(a2)~(c2)速度测量仿真结果

Fig. 7 Simulation results of distance and velocity measurements based on proposed algorithm. (a1)–(c1) Simulation results of distance measurements; (a2)–(c2) simulation results of velocity measurements

3.4 多目标测量仿真

本节考虑雷达视场中同时存在多个目标的情况。在微波雷达中,由于波束的角宽度通常较大,视场中通常可有多个目标同时存在,因此需要对每个目标在上下调频分量中形成的中频频率进行匹配^[25-27]。而对于激光雷达,为便于远距离传输,激光束发散角通常控制

在微弧度量级,如此小的瞬时视场使雷达必须在视觉引导机构的配合下工作^[28],因此雷达光束往往只能覆盖单个目标。对于多目标情况,此处只考虑视觉引导机构难以分辨的、距离和运动均较为接近的多个目标。

以三个目标为例进行数值仿真。目标距离、速度及回波功率的设置情况如表 2 所示。在信噪比为

1 的条件下, 计算得到的中频频谱如图 8(a) 所示, 可见频谱上有两组峰值, 分别由上下调频分量形成。其中虚线框内由上调频分量形成的中频频谱的详细情况如图 8(b) 所示, 三个目标各自对应频谱中的一个峰。图 8(c) 所示为对频谱进行自卷积运算的结果, 在自卷积过程中, 频谱任意两个峰发生重叠时, 均可在卷积结果中形成一处峰值, 因此共形成 6 处尖锐的峰值。综合频谱与自卷积结果的信息, 可判断自卷积结果中的各峰值与三个目标之间的关系, 由此利用

本文提出的算法, 可对各目标的距离与速度进行解算。

表 2 多目标测量仿真参数设置

Target	Distance D_0 / m	Velocity v / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Echo power / nW
1	1000	5000.0000	10
2	997	5000.0010	7
3	1005	4999.9985	4

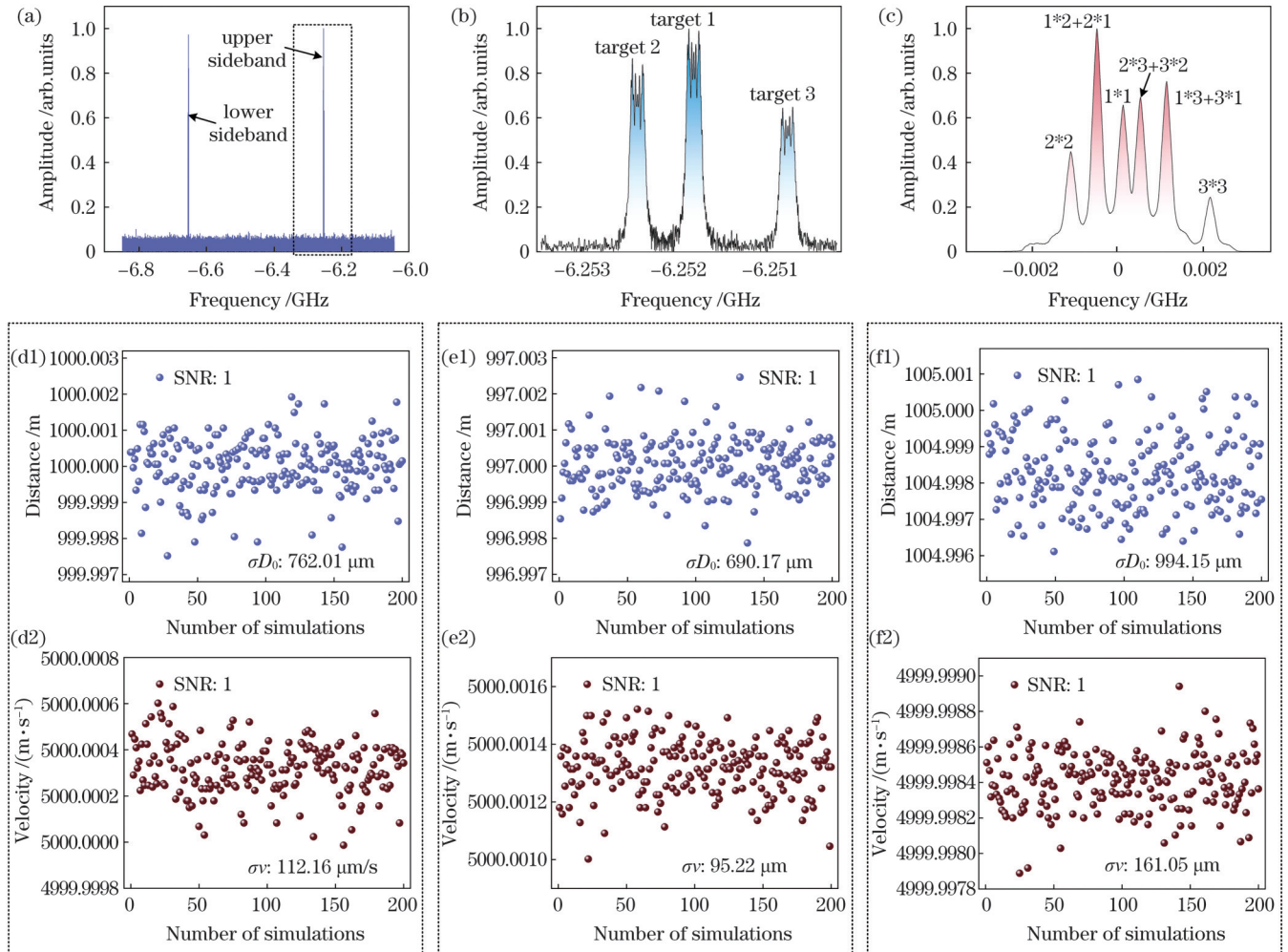


图 8 多目标测量的数值仿真结果。(a) 中频频谱; (b) 上调频分量频谱; (c) 频谱自卷积; (d1), (d2) 目标 1 距离和速度测量仿真结果; (e1), (e2) 目标 2 距离和速度测量仿真结果; (f1), (f2) 目标 3 距离和速度测量仿真结果

Fig. 8 Simulation results of multi-target measurement. (a) Intermediate frequency spectrum; (b) intermediate frequency spectrum of upper sideband; (c) self-convolution of intermediate frequency spectrum; (d1), (d2) simulation results of distance and velocity measurements of target 1; (e1), (e2) simulation results of distance and velocity measurements of target 2; (f1), (f2) simulation results of distance and velocity measurements of target 3

在相同条件下重复 200 次仿真计算, 得到目标 1 距离和速度测量的仿真结果如图 8(d1) 和图 8(d2) 所示。其测距绝对误差为 $1.79 \mu\text{m}$, 随机误差为 $762.01 \mu\text{m}$ (1σ); 测速绝对误差为 $321.19 \mu\text{m/s}$, 随机误差为 $112.16 \mu\text{m/s}$ (1σ)。目标 2 距离和速度测量的仿真结果如图 8(e1) 和图 8(e2) 所示。其测距绝对误差为 $35.58 \mu\text{m}$, 随机误差为 $690.17 \mu\text{m}$ (1σ); 测速绝对误差

为 $321.51 \mu\text{m/s}$, 随机误差为 $95.22 \mu\text{m/s}$ (1σ)。目标 3 距离和速度测量的仿真结果如图 8(f1) 和图 8(f2) 所示。其测距绝对误差为 1.73mm , 随机误差为 $994.15 \mu\text{m}$ (1σ); 测速绝对误差为 $90.92 \mu\text{m/s}$, 随机误差为 $161.05 \mu\text{m/s}$ (1σ)。可见在多目标测量情况下, 受各目标所形成的中频频谱间相互干扰的影响, 测距测速均出现了绝对误差, 且随机误差相比单目标情况下

均有所升高。但整体而言误差仍较小,可对各个目标实现准确的测距测速。

另外,在理论分析中已经提到,中频频谱的形状由调频带宽、调频周期与目标速度共同决定,因此除目标高速运动外,调频带宽和周期也是导致中频频谱展宽的因素。在本文的数值仿真中,雷达调频带宽设置为 3 GHz,而在目前关于高分辨率测距技术的研究中,FMCW 激光雷达不断朝向高调频带宽的方向发展,基于内调制激光光源的雷达中调频带宽已达到太赫兹量级^[29-30]。在此条件下,即使目标以较低速度运动,雷达的中频频谱也可能发生明显的展宽,对测量精度形成影响。本文提出的方法也可用于此情况下的测量误差校正。因此,随着宽带调频 FMCW 激光雷达技术的发展,本文的方法将有更为广阔的应用前景。

4 结 论

本文研究了双边带 FMCW 激光雷达对高速运动目标的测量。针对目标高速运动引起的中频频谱展宽导致中频频率不确定度增大,并影响测量精度的问题,提出了一种基于频谱自卷积的中频频谱解算算法,实现了距离和速度测量误差的校正。首先,通过理论分析,建立了雷达中频信号频谱的理论表达式,得到了频谱随目标速度增加而展宽的变化规律。利用中频频谱的对称性特征,由频谱幅值自卷积函数的峰值搜索确定频谱中心频率,从而实现目标距离和速度的解算。然后,通过数值仿真验证了理论分析的正确性以及算法在校正高速目标测量误差中的有效性。与传统方法相比,本文提出的算法在相同信噪比条件下,可实现测量精度三个数量级以上的提升。同时其步骤简单,运算量小,抗噪声干扰能力强,且应用前景广阔。本文工作为高速运动目标的高精度测距测速提供了一种可行的方案,将推进 FMCW 激光雷达在空间碎片观测等空间技术领域中的应用。

参 考 文 献

- [1] 蔡磊,孙立臣,龚自正,等.空间微小碎片探测技术综述[J].空间碎片研究,2021,21(2):10-16.
Qi L, Sun L C, Gong Z Z, et al. Micro space debris detection technology and applications[J]. Space Debris Research, 2021, 21(2): 10-16.
- [2] Popova R, Schaus V. The legal framework for space debris remediation as a tool for sustainability in outer space[J]. Aerospace, 2018, 5(2): 55.
- [3] 陈龙,刘承志,李振伟,等. LEO 空间目标的非协同共视观测及初轨确定[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1912003.
Chen L, Liu C Z, Li Z W, et al. Non-cooperative common-view observation of LEO space objects and initial orbit determination[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1912003.
- [4] 陶江,曹云峰,丁萌.空间碎片检测技术研究进展[J].激光与光电子技术进展,2022,59(14):1415010.
Tao J, Cao Y F, Ding M. Progress of space debris detection technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(14): 1415010.
- [5] 从海胜,孙建锋,卢智勇,等.调频连续波相干激光雷达的多脉冲频域相干累积研究[J].中国激光,2022,49(3):0310003.
Cong H S, Sun J F, Lu Z Y, et al. Multi-pulse coherent accumulation in frequency domain based on frequency-modulation continuous-wave coherent lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0310003.
- [6] 徐忠扬,张洪祥,陈凯,等.调频连续波激光雷达技术进展[J].真空电子技术,2019(4):18-26,40.
Xu Z Y, Zhang H X, Chen K, et al. Progress of frequency-modulated continuous-wave lidars[J]. Vacuum Electronics, 2019(4): 18-26, 40.
- [7] 张洪英,田晓宁,雷艳阳,等.同时测距和测速的注入锁定调频连续波激光雷达[J].光学学报,2020,40(15):1528001.
Zhang H Y, Tian X N, Lei Y Y, et al. Frequency modulated continuous wave lidar based on injection-locking technology for simultaneous distance and speed measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1528001.
- [8] Ke J Y, Song Z Q, Wang P S, et al. Long distance high resolution FMCW laser ranging with phase noise compensation and 2D signal processing[J]. Applied Optics, 2022, 61(12): 3443-3454.
- [9] 舒嵘,凌元,崔桂华,等.着陆导航激光多普勒雷达[J].红外与毫米波学报,2013,32(6):508-513.
Shu R, Ling Y, Cui G H, et al. Laser Doppler radar for landing navigation[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(6): 508-513.
- [10] Pierrotet D, Amzajerjian F, Petway L, et al. Linear FMCW laser radar for precision range and vector velocity measurements[J]. MRS Proceedings, 2008, 1076: 10760406.
- [11] Gao S, O'Sullivan M, Hui R Q. Complex-optical-field lidar system for range and vector velocity measurement[J]. Optics Express, 2012, 20(23): 25867-25875.
- [12] La Lone B M, Marshall B R, Miller E K, et al. Simultaneous broadband laser ranging and photonic Doppler velocimetry for dynamic compression experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(2): 023112.
- [13] Kakuma S. Frequency-modulated continuous-wave laser radar using dual vertical-cavity surface-emitting laser diodes for real-time measurements of distance and radial velocity[J]. Optical Review, 2017, 24(1): 39-46.
- [14] Mo D, Wang R, Li G Z, et al. Double-sideband frequency scanning interferometry for long-distance dynamic absolute measurement[J]. Applied Physics B, 2017, 123(11): 272.
- [15] Xu Z Y, Tang L Z, Zhang H X, et al. Simultaneous real-time ranging and velocimetry via a dual-sideband chirped lidar[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(24): 2254-2257.
- [16] Telitchev I Y. Analysis of burst conditions of shielded pressure vessels subjected to space debris impact[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(2): 179-183.
- [17] 杜小平,宋一铄,曾朝阳.调频连续波激光雷达目标相对距离及径向速度信息提取方法[J].航空学报,2014,35(2):523-531.
Du X P, Song Y S, Zeng Z Y. Methods for relative distance and radial velocity information extraction in LFM/CW laser radar[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 523-531.
- [18] Diaz R, Chan S C, Liu J M. Lidar detection using a dual-frequency source[J]. Optics Letters, 2006, 31(24): 3600-3602.
- [19] 颜子恒,周寿桓,眭晓林,等.相干激光测距中的多普勒频率动态补偿研究[J].激光与红外,2019,49(6):665-669.
Yan Z H, Zhou S H, Sui X L, et al. The dynamic compensation of Doppler frequency in coherent range lidar[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(6): 665-669.
- [20] Ren N, Zhao B, Liu B, et al. Adaptive Doppler compensation method for coherent lidar based on optical phase-locked loop[J]. Measurement, 2022, 187: 110313.
- [21] 赵继广,张晓永,张智谔. LFM/CW 激光雷达测量方法[J].雷达科学与技术,2010,8(3):193-198.
Zhao J G, Zhang X Y, Zhang Z Q. A processing method of target's range and velocity information for LFM/CW lidar[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(3): 193-198.

- [22] Abbas G, Chan V, Ting Y E. A dual-detector optical heterodyne receiver for local oscillator noise suppression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(5): 1110-1122.
- [23] 宋凝芳, 杨德钊, 孙鸣捷, 等. 散斑噪声对相干激光雷达系统性能的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1005001.
Song N F, Yang D Z, Sun M J, et al. Impact of speckle noise to the property of coherent lidar system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(10): 1005001.
- [24] Cheng C H, Lee C W, Lin T W, et al. Dual-frequency laser Doppler velocimeter for speckle noise reduction and coherence enhancement [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20255-20265.
- [25] 邢自然, 朱冬晨, 金星. 一种多目标 FMCW 雷达的高效距离速度测量方法[J]. *电子学报*, 2016, 44(9): 2148-2157.
Xing Z R, Zhu D C, Jin X. An effective method for multi-target range and velocity measurement in FMCW radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(9): 2148-2157.
- [26] 郭晨曦, 郝新红, 栗苹, 等. 毫米波调频引信的优化二维 FFT 信号处理算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(1): 220-228.
Guo C X, Hao X H, Li P, et al. Optimized two-dimensional FFT signal processing algorithm for millimeter-wave FM fuze[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(1): 220-228.
- [27] 宋文豪, 周斌, 卜智勇, 等. 基于复合型 FMCW 波形的多目标匹配算法[J]. *中国科学院大学学报*, 2022, 39(1): 110-118.
Song W H, Zhou B, Bu Z Y, et al. Multi-target matching algorithm based on composite FMCW waveform[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 39(1): 110-118.
- [28] 邵新博, 苑自勇, 刘夏林, 等. 基于运动信息融合的高精度超前瞄准角算法[J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1812003.
Shao X B, Yuan Z Y, Liu X L, et al. High-accuracy advance pointing angle algorithm based on motion information fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 1812003.
- [29] Dilazaro T, Nehmetallah G. Large-volume, low-cost, high-precision FMCW tomography using stitched DFBs[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2891-2904.
- [30] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.

Error Correction Method in Measurement of High-Speed Targets with Frequency-Modulated Continuous-Wave Lidar

Zhang Hengkang*, Wang Li**, Guo Shaogang, Li Lin

Space Optoelectronic Measurement and Perception Lab, Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China

Abstract

Objective Frequency-modulated continuous-wave (FMCW) lidar has the ability to measure ranges and velocities of moving targets simultaneously with high precision, and thus it has great potential in numerous applications such as space debris detection and space situational awareness. The conventional measuring method is to perform fast Fourier transform (FFT) to the intermediate frequency signal, and then the peak-value frequency is used as the intermediate frequency to calculate the target range and velocity. However, this method cannot achieve high-precision measurement of high-speed targets. The high-speed movements of targets could cause spectral broadening of the intermediate frequency signal, resulting in a multi-peak spectral structure. Therefore, it is difficult to accurately find the intermediate frequency, especially in noisy environments, which has a serious impact on the measurement precision. To deal with this problem, a new spectrum analysis method is desired. In this paper, we propose a novel algorithm for calculating intermediate frequency based on self-convolution of the spectrum. By conducting numerical simulations, we verify the ability of the proposed algorithm in correcting measurement error induced by spectral broadening and realizing high-precision measurements of the target range and velocity. Meanwhile, it has small computation, strong anti-noise ability and broad application prospect. Therefore, it is of great significance for promoting the applications of FMCW lidar in space technologies.

Methods A novel algorithm (Fig. 3) is proposed to correct the measurement error caused by high-speed-movement-induced spectral broadening of the intermediate frequency signal, and its validity is verified by numerical simulation. With a theoretical analysis, we find that the intermediate frequency spectrum of FMCW lidar when measuring high-speed targets has the symmetry characteristics, and its center frequency has a certain relationship with target range and velocity. Therefore, as long as the center frequency is known, the target range and velocity can be calculated. We utilize the following algorithm to calculate the center frequency. First, we calculate the self-convolution of the amplitude of the intermediate frequency spectrum, $F_n(f)$. Then we search the peak value of the self-convolution function $O(f)$ and its position. $O(f)$ is calculated by integrating the product of $F_n(f)$ and its shifted mirror image, and $O(f)$ takes its peak value only when $F_n(f)$ overlaps its mirror image completely, since $F_n(f)$ is symmetric. Hence, with the position of the peak value of $O(f)$, we can obtain the center frequency of $F_n(f)$. Utilizing this algorithm, we simulate single-target measurement and multi-target measurement with a model of double-sideband FMCW lidar.

Results and Discussions We first conduct numerical simulations of single-target measurement, where the target velocity is 5 km/s and the signal-to-noise ratio (SNR) is set to be 10, 5 and 1, respectively. The results show that the proposed method can realize accurate measurement of the target range and velocity, and the measurement precision decreases with the decrease of the SNR (Fig. 7). With the SNR of 1, the random errors of the target range and velocity are 421.48 μm (1σ) and 65.19 $\mu\text{m/s}$ (1σ), respectively. As a contrast, we also conduct a simulation with the traditional method, where the peak-value frequency of the intermediate frequency spectrum is used to calculate the target range, and the SNR is set to be 10. Compared with the traditional method, our method can improve the measurement precision by more than three orders of magnitude under the same SNR (Fig. 5).

This shows that our method can effectively correct the measurement error caused by the high-speed movement of the target. Moreover, we also conduct a numerical simulation of multi-target measurement (Table 2). The results show that the proposed method can realize accurate range and velocity measurements of multiple targets (Fig. 8).

Conclusions In this paper, the measurement of high-speed targets with FMCW lidar is studied. A novel algorithm for analyzing the intermediate frequency spectrum is proposed to correct the measurement error caused by high-speed-movement-induced spectral broadening of the intermediate frequency signal. Firstly, with theoretical analysis, we derive the theoretical expression of the intermediate frequency spectrum, and we study the variation of the intermediate frequency spectral structure with the increase of target velocity. Based on the symmetry characteristics of the intermediate frequency spectrum, the center frequency of the spectrum can be found by searching the peak value of the self-convolution function of the spectrum amplitude. With this algorithm applied to the double-sideband FMCW lidar, the target distance and velocity can be calculated. Then, the validity of the theoretical analysis and the effectiveness of the algorithm in correcting the measurement error of high-speed targets are verified by numerical simulation. Compared with the traditional method, the proposed method can improve the measurement precision by more than three orders of magnitude under the same SNR. The advantages of the proposed method also include the small computation burden and strong anti-noise ability. The research work in this paper provides a feasible approach for high-precision range and velocity measurement of high-speed targets, and we believe it will promote the application of FMCW lidar in space technologies.

Key words measurement; lidar; frequency-modulated continuous wave; spectral broadening; error correction