

文章编号: 1671-0576(2026)01-0038-06

空间大尺寸高速旋转目标角速度补偿方法

杨明远, 顾泽凌, 孙晓谥, 江利中, 赵欣

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘要: 针对大尺寸高速旋转目标回波存在的跨多普勒单元现象导致其相参积累增益低的问题, 提出了一种目标旋转角速度的参数化相位补偿方法。该补偿方法利用预测的目标旋转角速度, 对脉冲压缩后的目标回波先进行多普勒相位补偿, 再进行相参积累, 解决了积累回波的能量发散问题。经仿真验证, 所提方法有效提高了积累回波的信噪比, 改善了雷达对大尺寸高速旋转目标的探测性能。

关键词: 多普勒雷达; 相参积累; 高速旋转目标; 角速度补偿

中图分类号: TN958.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2026.01.006

Angular Velocity Compensation Method for Large-Sized High-Speed Rotating Targets in Space

YANG Mingyuan, GU Zeling, SUN Xiaoyi, JIANG Lizhong, ZHAO Xin

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: To address the issue of low coherent integration gain caused by the echoes of large-sized high-speed rotating targets spanning multiple Doppler filter resolution cells, a parametric phase compensation method based on rotational angular velocity was proposed. The compensation method utilized the predicted target rotational angular velocity to first perform Doppler phase compensation on the pulse-compressed echoes, followed by coherent integration, thereby resolving the energy dispersion problem in the integrated echo. Simulation results demonstrate that the proposed method significantly improves the signal-to-noise ratio of the integrated echoes and enhances radar detection performance for large-sized high-speed rotating targets.

Key words: Doppler radar; coherent integration; high-speed rotating target; angular velocity compensation

0 引言

目前,在轨的航天器数量众多,而直径大于10 cm的空间碎片数量已达数十万个,对空间安全造成严重威胁。旋转运动是航天器、空间碎片等空间目标常见的运动形式,其产生的微多普勒(micro-Doppler, m-D)效应特征^[1-4]为空间目标的分类识别提供了重要信息。然而,对于尺寸在几米至几十米范围内的空间目标,其旋转运动不仅会产生显著的微多普勒效应,还会导致目标回波产生较大的跨多普勒(速度)单元徙动。因此,利用微多普勒效应进行空间旋转目标探测,对于维护空间安全以及提升空间目标的认知分析能力具有重要意义。

基于相参积累技术,星载脉冲多普勒雷达提高了目标检测信噪比^[5-7],并实现了高精度探测^[8-9]。传统的相参积累方法通常基于匀速及匀加速运动模型对目标的相对速度和加速度进行补偿,然而针对空间大尺寸高速旋转目标,该模型假设不再成立。此时,目标回波的多普勒频率呈现时变特性,使目标回波在相参积累时间内表现为非平稳,传统的相参积累技术不再适用。高速旋转目标回波相参积累技术已成为当前雷达信号处理领域重要的研究方向。

文献[10]提出了一种基于分段伪Keystone变换的新型成像方法,实现了对高速旋转目标的成像。文献[11]提出了一种基于高分辨率一维距离像(high-resolution range profile, HRRP)序列的联合重构方法,在低信噪比条件下实现了对空间目标的高分辨率成像。文献[12]提出了一种基于改进遗传算法的快速旋转空间碎片逆合成孔径雷达成像新方法,实现了在低脉冲重复频率和数据缺失的情况下的高分辨率成像。文献[13]综述了雷达技术在空间碎片监测与跟踪中的最新进展,并分析了未来发展趋势。文献[14-15]基于轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)波的螺旋相位特性,研究了旋转目标的多普勒效应,并建立了OAM波与旋转目标的相互作用模型。文献[16]提出了一种基于OAM波的新型目标多维运动参数检测方法,为复杂运动目标的高精度探测与识别提供了新的解决方案。上述文献聚焦

于旋转目标成像和参数估计方法研究,而未涉及旋转角速度多普勒补偿及长时间相参积累问题。对于大尺寸高速旋转目标,雷达与目标间相对速度变化较大,导致目标回波在相参积累过程中会跨多个多普勒分辨单元,这种现象称之为跨多普勒单元现象。若直接采用传统的相参积累方法,目标回波能量将分散在多个多普勒分辨单元中,不能在单一单元中实现能量聚集,从而导致目标回波相参积累的信噪比损失。

针对大尺寸高速旋转目标回波存在的跨多普勒单元现象导致其相参积累增益低的问题,本文提出一种旋转角速度的参数化相位补偿方法。该补偿方法先利用预测的目标旋转角速度,对脉冲压缩后的回波先进行多普勒相位补偿;再进行相参积累,以提高相参积累回波信噪比。最后,通过仿真实验验证所提方法的有效性。

1 旋转目标运动模型

空间大尺寸高速旋转目标在雷达视线方向上产生多普勒效应,导致目标回波的多普勒频率呈现周期性变化特征,其运动模型如图1所示。图中,以雷达为坐标原点 O 建立直角坐标系 $OXYZ$,设目标旋转半径为 r ,旋转角速度为 ω ,旋转轴与雷达视线方向的夹角为 β ,则目标的最大尺寸为 $2r$ 。

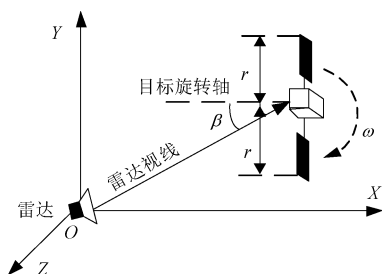


图1 大尺寸高速旋转目标运动模型

设目标沿着雷达视线方向的径向速度为 v ,目标旋转轴与雷达视线方向的初始相位角为 φ_0 ,则在雷达发射信号第 m 个脉冲的第 T 个脉冲重复周期内,目标的相对速度

$$v_r = v + v_\omega \sin \beta \sin(\varphi_0 + \omega m T) \quad (1)$$

式中: $v_\omega = \omega r$ 为目标旋转线速度。

由式(1)可知,目标的相对速度会呈现周期性

的变化特征。当雷达采用相参积累方法提高其回波信噪比时,若未对目标旋转角速度引起的多普勒频率进行补偿,则在相参积累时间内,目标回波的多普勒频率变化将超过多普勒分辨单元,导致跨多普勒单元效应,造成目标回波相参积累信噪比损失。

2 旋转角速度补偿方法

雷达发射的线性调频信号

$$s(\tau, t) = \text{rect}(t/T_p) \exp(j\pi\mu t^2) \times \exp(j2\pi f_c(\tau + t)) \quad (2)$$

式中: τ 为慢时间; t 为快时间; $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数; T_p 为脉宽; μ 为调频斜率; f_c 为载频。

设目标与雷达间的初始距离为 R_0 , 根据式(1), 当慢时间 $\tau = mT$ 时, 第 m 个相参积累时刻目标与雷达间的距离

$$R(\tau) = R_0 + v_r\tau = R_0 + v\tau + v_\omega \sin\beta \sin(\varphi_0 + \omega\tau)\tau \quad (3)$$

当目标与雷达间的距离为 $R(\tau)$ 时, 雷达接收到的目标时域回波

$$s_r(\tau, t) = \text{rect}((t - 2R(\tau)/c)/T_p) \times \exp(j\pi\mu(t - 2R(\tau)/c)^2) \times \exp(j2\pi f_c(\tau + t - 2R(\tau)/c)) \quad (4)$$

式中: c 为光速。

对目标时域回波进行脉冲压缩处理, 可得脉冲压缩后的目标时域回波

$$s_c(\tau, t) = A_1 \text{sinc}(B(t - 2R(\tau)/c)) \times \exp(-j4\pi R(\tau)/\lambda) \quad (5)$$

式中: A_1 为脉冲压缩后的时域回波幅度; B 为发射信号带宽; λ 为发射信号波长。

将式(3)代入式(5), 对目标高阶运动分量进行近似, 可得近似处理后的目标时域回波

$$s_c(\tau, t) \approx A_2 \text{sinc}(B(t - 2R_0/c)) \times \exp(-j4\pi R_0/\lambda) \exp(-j4\pi v\tau/\lambda) \times \exp(-j4\pi f_c \Delta r_\omega/c) \quad (6)$$

其中

$$\Delta r_\omega = v_\omega \sin\beta \sin(\varphi_0 + \omega\tau)\tau \quad (7)$$

式中: A_2 为近似处理后的时域回波幅度; Δr_ω 为在相参积累时间内因目标旋转引起的雷达与目标间的距离变化量。式(6)中的指数项 $\exp(-j4\pi f_c \Delta r_\omega/c)$ 为目标旋转引起的相位变化

项, 若不对此项进行补偿, 则会引起相参积累后的能量发散。设 $h(\Delta r_\omega)$ 为补偿相位函数, 其表达式为

$$h(\Delta r_\omega) = \exp(j4\pi f_c \Delta r_\omega/c) \quad (8)$$

将式(6)与式(8)相乘, 可以得到相位补偿后的目标时域回波

$$s_{c-ph}(\tau, t) = A_3 \text{sinc}(B(t - 2R_0/c)) \times \exp(-j4\pi R_0/\lambda) \exp(-j4\pi v\tau/\lambda) \quad (9)$$

式中: A_3 为相位补偿后的时域回波幅度。

完成相位补偿后, 回波的高阶相位残差引起的多普勒频率变化不超过一个多普勒分辨单元。最后, 对相位补偿后的目标时域回波信号(式(9))沿着慢时间维进行快速傅里叶变换(FFT), 可得相位补偿后的目标频域回波

$$S_k(f_r, t) = A_4 \text{sinc}(B(t - 2R_0/c)) \times \text{sinc}(MT(f_r + 2v/\lambda)) \quad (10)$$

式中: f_r 为慢时间频率; A_4 为相参积累后的频域回波幅度; M 为相参积累点数。由式(10)可知, 对多普勒相位补偿后的目标时域回波沿慢时间维进行 FFT, 目标的回波能量会在多普勒域聚焦形成一个尖峰。这表明, 对大尺寸旋转目标回波进行相位补偿, 可以解决回波相参积累过程中的能量发散问题。

3 仿真实验验证

3.1 仿真参数

对径向速度、加速度、旋转角速度、尺寸、初始距离等目标参数以及重频、相参积累点数、发射信号带宽、信号脉宽等雷达参数进行设计, 目标与雷达的仿真参数如表 1 所示。

表 1 目标与雷达的仿真参数

目标参数	数值	雷达参数	数值
径向速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	10	重频/Hz	2 000
加速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	1	相参积累点数	512
旋转角速度/($^\circ\cdot\text{s}^{-1}$)	60	发射信号带宽/MHz	1
尺寸/m	20	脉宽/ μs	30
初始距离/km	40	—	—

3.2 仿真结果与分析

根据如表 1 所示的仿真参数, 进行目标回波

的脉冲压缩处理仿真。旋转目标回波的脉冲压缩结果如图 2 所示。

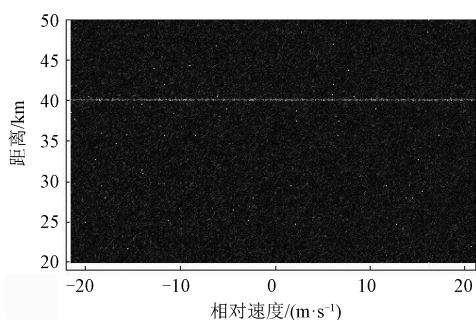


图 2 旋转目标回波的脉冲压缩结果

在未进行角速度补偿的情况下,对脉冲压缩后的回波直接进行相参积累,其仿真结果如图 3 所示。

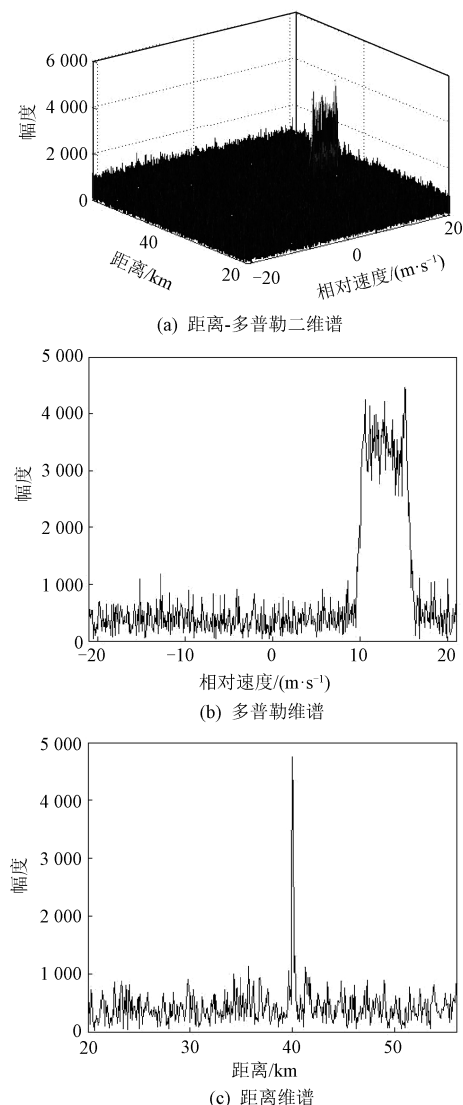


图 3 未经角速度补偿的脉冲压缩回波积累仿真结果

可知:对于大尺寸高速旋转目标,若未经旋转角速度补偿而直接进行相参积累,则目标回波的距离-多普勒二维谱出现散谱现象,如图 3(a)所示;因目标旋转运动影响,相参积累后回波在多普勒维呈现能量发散现象,未能形成谱的尖峰,能量无法聚焦从而影响后续目标检测,回波的多普勒维谱如图 3(b)所示;尽管未进行旋转角速度补偿,但目标回波单个脉冲的距离维谱仍能保持聚焦状态,其分布特性不受旋转角速度的影响,目标回波的距离维谱如图 3(c)所示。

对目标回波依次进行脉冲压缩、旋转角速度补偿和相参积累处理,其仿真结果如图 4 所示。

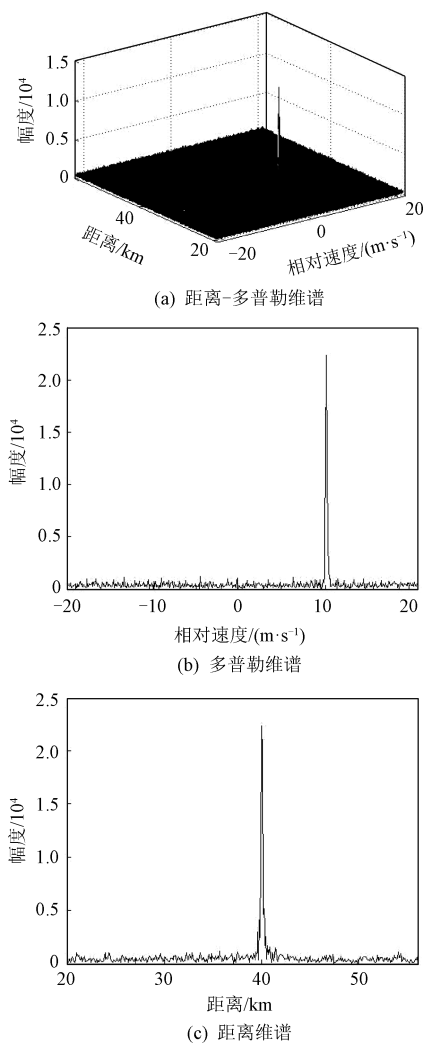


图 4 经角速度补偿的脉冲压缩回波积累仿真结果

可知:先对由目标旋转运动引入的回波相位变化进行补偿,再进行相参积累,可有效消除相参积累引起的能量发散,最终获得聚焦良好的目标

回波二维尖峰谱,其目标回波的距离-多普勒二维谱如图 4(a)所示;经脉间相位对齐后,目标回波在多普勒维的相位保持一致,使得相参积累能够得到很好聚焦效果,回波的多普勒维谱如图 4(b)所示;旋转角速度补偿后的目标回波的距离维谱如图 4(c)所示,与图 3(c)相比,角速度补偿后的距离维谱幅度显著提高。

对比图 3 和图 4 可以看出,对目标旋转角速度进行补偿处理后,目标回波的相参积累幅度显著高于未经补偿的情况。这表明,旋转角速度补偿有效解决了目标回波脉间相位不一致问题,从而提高了目标回波能量的积累效率。

设目标径向速度为 0 m/s,目标旋转角速度在 $0\sim 100(^{\circ})/s$ 范围内以 $4(^{\circ})/s$ 为步进变化。在不同目标旋转角速度下,对目标相对速度、回波幅度、信噪比进行仿真分析。角速度补偿前后的目标相对速度测量仿真结果如图 5 所示。可知:若不进行目标旋转角速度补偿,则相对速度测量误差会随着旋转角速度的增大而增大;在进行旋转角速度补偿后,相对速度的测量误差很小,能够实现目标相对速度的精准估计。

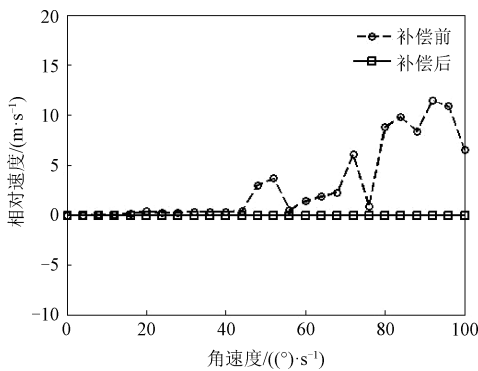


图 5 角速度补偿前后的目标相对速度测量仿真结果

在不同目标旋转角速度下,角速度补偿前后的相参积累回波幅度仿真结果如图 6 所示。可知:在未进行旋转角速度补偿时,相参积累回波幅度随着旋转角速度的增大而减小;在进行补偿后,其幅度不再受旋转角速度影响。因此,若不进行旋转角速度补偿,相参积累回波幅度会随着旋转角速度的增大而显著减小,进而影响雷达的目标检测及跟踪性能。

在不同目标旋转角速度下,角速度补偿前后相参积累回波的信噪比仿真结果如图 7 所示。可

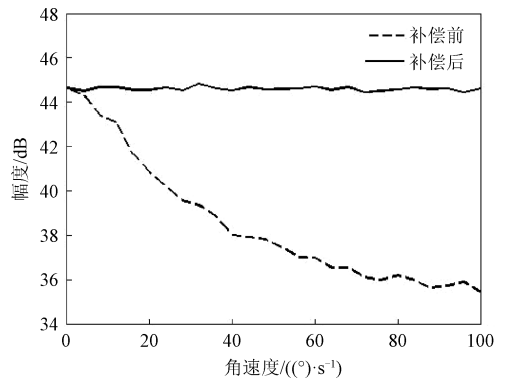


图 6 角速度补偿前后相参积累回波幅度仿真结果

知:在未进行旋转角速度补偿时,相参积累回波的信噪比随角速度的增大而降低;在进行补偿后,其信噪比不再受角速度影响。因此,通过对旋转角速度进行补偿,可以大幅度改善相参积累回波的信噪比,有效解决了目标旋转导致的回波能量发散问题。

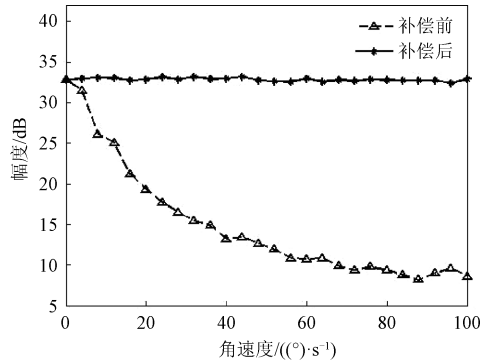


图 7 角速度补偿前后相参积累回波的信噪比仿真结果

上述仿真结果表明:通过对目标旋转的角速度补偿,可有效解决脉间相位不一致问题;结合相参积累技术,可显著提高回波的信噪比。

4 结论

空间大尺寸目标的高速旋转运动会导致跨多普勒单元现象,进而引起雷达回波相参积累的能量损失,严重影响雷达的目标探测性能。针对这一问题,本文提出了一种旋转角速度的参数化相位补偿方法。该方法有效抑制了频谱展宽,解决了目标回波在相参积累过程中因跨多普勒单元而导致的能量发散问题。仿真实验结果表明,先进进行目标旋转角速度补偿,再进行回波相参积累,可以显著提高回波的积累增益,改善信噪比。该方

法易于工程实现,可为雷达精确探测提供技术支持。

参考文献

- [1] BAI X R, XING M D, ZHOU F, et al. Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3514-3523.
- [2] JUNG J H, KIM S H, CHOI I, et al. Efficient translational motion compensation for micro-Doppler extraction of ballistic missiles [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2017, 18(1): 129-137.
- [3] ZHANG L, LI Y C, LIU Y, et al. Time-frequency characteristics based motion estimation and imaging for high speed spinning targets via narrowband waveforms [J]. *Science China: Information Sciences*, 2010, 53(8): 1487-1502.
- [4] ZHU J, ZHU S Q, LIAO G S. High-resolution radar imaging of space debris based on sparse representation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(10): 2090-2094.
- [5] ZUO L, WANG J, SUI J X. Long-time coherent integration based on intra-partition range-Doppler processing for passive bistatic radar [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2021, 15(2): 128-142.
- [6] ZHAO L X, TAO H H, CHEN W J, et al. Maneuvering target detection based on subspace subaperture joint coherent integration[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(10): 1948-1960.
- [7] CAO Y F, WANG W Q, ZHANG S S. Long-time coherent integration for high-order maneuvering target detection via zero-trap line extraction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(6): 4017-4027.
- [8] WANG C L, ZHENG J B, JIU B, et al. A model-and-data-driven method for radar highly maneuvering target detection [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(4): 2201-2217.
- [9] ZHOU G J, XU Z Y, YANG Y C. Coherent integration for targets with constant Cartesian velocities based on accurate range model [J]. *Digital Signal Processing*, 2021, 116: 103092.
- [10] HUO K, LIU Y X, HU J M, et al. A novel imaging method for fast rotating targets based on the segmental pseudo keystone transform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(4): 1464-1472.
- [11] BAI X R, ZHOU F, ZHENG B. High-resolution radar imaging of space targets based on HRRP series[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2369-2381.
- [12] NING Y, BAI X R, ZHOU F, et al. Method for inverse synthetic aperture radar imaging of space debris using improved genetic algorithm[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(5): 812-821.
- [13] MUNTONI G, MONTISCI G, PISANU T, et al. Crowded space: a review on radar measurements for space debris monitoring and tracking [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1364.
- [14] ZHENG J Y, ZHENG S L, SHAO Z L, et al. Rotational Doppler effect based on the radio orbital angular momentum wave[C]// 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1298-1301.
- [15] ZHENG J Y, ZHENG S L, SHAO Z L, et al. Analysis of rotational Doppler effect based on radio waves carrying orbital angular momentum[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(16): 164907.
- [16] WANG Y Z, WANG Y L, GUO K, et al. Detecting targets' longitudinal and angular accelerations based on vortex electromagnetic waves[J]. *Measurement*, 2022, 187: 110278.