

## 空间高速小尺寸碎片目标二维分集融合成像方法

宋大伟, 尚社, 李小军, 罗熹, 孙文锋, 范晓彦, 李栋

(中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 从碎片目标的回波散射特性入手, 将频率分集技术融入到目标的高分辨成像算法中。频率分集技术可以有效地克服碎片目标的角闪烁效应, 提高回波的平均信噪比, 有利于对空间碎片目标的检测和成像; 同时, 空间高速小尺寸碎片目标高分辨二维图像带宽需求过大、难以实现, 采用低分辨信号实现高分辨成像, 信号带宽远小于 ISAR 成像算法, 同时考虑了目标高速运动引起的等效积累转角对成像的影响, 通过对等效转动速度的估算, 修正匹配滤波器, 使之满足转台成像条件, 完成目标高分辨二维成像。最后, 利用文中提出的方法对喇叭形空间碎片进行建模与成像仿真, 仿真结果表明, 文中提出的方法可以在成像时间内有效地克服角闪烁起伏, 获取目标高分辨率二维图像。

**关键词:** 空间碎片; 角闪烁; 高分辨成像

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S229007

## Two-dimensional diverse imaging method for high-speed space debris with small size

Song Dawei, Shang She, Li Xiaojun, Luo Xi, Sun Wenfeng, Fan Xiaoyan, Li Dong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 71000, China)

**Abstract:** According to the signal model of space debris, the frequency diversity technology was reconciled in the imaging method. The frequency diversity can suppress the angle glint of debris, and the average signal-to-noise ratio of echo will be improved. Meanwhile, the demand of bandwidth of two-dimensional imaging of high-speed space debris with small size was too wide to realize, then the low-resolution signal was used to the high-resolution imaging, the bandwidth was much smaller than the need of ISAR, and the influence of the equivalent integration angle caused by high-speed was considered, through the estimation of the equivalent rotating speed, the matched-filter was corrected, which can match the need of rotating imaging and accomplish the imaging. Finally, a simulation of trumpet debris was modeled and made by the method projected in this paper. The result indicates that the method can suppress the angle glint of debris during the time of imaging, and the high resolution image is achieved.

**Key words:** space debris; angle glint; high-resolution imaging

收稿日期: 2016-08-01; 修订日期: 2016-09-01

基金项目: 重点实验室基金(9140C530302150C53003)

作者简介: 宋大伟(1982-), 男, 硕士, 主要从事天基雷达技术方面的研究。Email: songdw0210@163.com

## 0 引言

随着航天技术的发展,越来越多的航天器被发射到地球轨道上(通常为距地面 100~40 000 km 高度的空间内)<sup>[1]</sup>。一般认为 1~10 cm 量级空间碎片潜在威胁最大<sup>[2]</sup>,因为小于 1 cm 量级的空间碎片,探测困难,数量巨大,但是由于撞击动能小,可采用增加航天器表面防护层方法加以规避。大于 10 cm 量级空间碎片数目很少,并且能够编目,可采用航天器激动规避方法。1~10 cm 量级空间碎片数量较大,撞击动能较大,采用结构防护困难,因此需要航天器利用天基雷达进行实时远程探测并跟踪预测其轨迹,迅速判断其外形尺寸,供航天器判断其威胁等级,为航天器的自主规避提供快速准确的信息支持。

然而,准确判断小尺寸碎片的实际尺寸是世界公认的难题,这是因为空间小尺寸碎片通常伴随着剧烈的旋转和高速运动,相对速度很慢的碎片目标动量较小,对航天器的威胁较小,与航天器相对快速运动的小尺寸碎片才是最需关注的目标,因此文中主要针对高速运动的旋转小尺寸碎片,研究空间小尺寸目标的高分辨成像问题。

对于空间小尺寸碎片,传统 ISAR 雷达成像带宽无法满足其成像需求,所以对小尺寸碎片成像可以利用单距离单元匹配滤波(SRMF)进行高分辨二维成像<sup>[3-4]</sup>,高速碎片目标窄带条件下,经运动补偿后回波信号可压缩在一个距离单元内,其方位的时频分布表现为周期性正弦分布。SRMF 算法利用太空碎片围绕其主轴进行自旋运动的事实,通过分析迁徙一个周期的多普勒谱,得到目标的二维像<sup>[5]</sup>。但是通过对空间高速小尺寸碎片目标的仿真可以发现,由于其运动速度较大,致使利用 SRMF 方法成像时根据目标自转建立的匹配滤波函数与实际模型失配严重。因此利用 SRMF 算法对高速碎片目标成像需要补偿高速目标平动带来的模型失配,同时还需在成像过程中克服碎片快速旋转引起的角闪烁问题。

文中针对上述问题,从真实目标的回波散射特性入手,将频率分集技术融入到目标的高分辨成像算法中。频率分集技术可以有效地克服目标的角闪烁效应,提高回波的平均信噪比,有利于对空间碎片目标的检测和成像;同时考虑了目标高速运动引起

的等效积累转角对成像的影响,通过对等效转动速度的估算,修正匹配滤波器,使之满足转台成像条件,完成目标高分辨二维成像。

## 1 空间高速碎片目标 RCS 起伏特征及回波模型分析

空间碎片从材料特性来说,分为有机聚合物、非金属单质、金属与合金、氧化物、硫化物与类硫化物、卤化物以及碳化物等 7 类<sup>[4]</sup>。由于空间碎片成分的复杂性和形状的不规则性,再伴以高速运动和急速旋转,其 RCS 的起伏将十分剧烈,图 1 为金属合金材质 10 cm 碎片的 RCS 分析结果,图中可以看出,其 RCS 的起伏最大可达 30 dB 以上,因此碎片成像过程中回波起伏将是不可避免的。

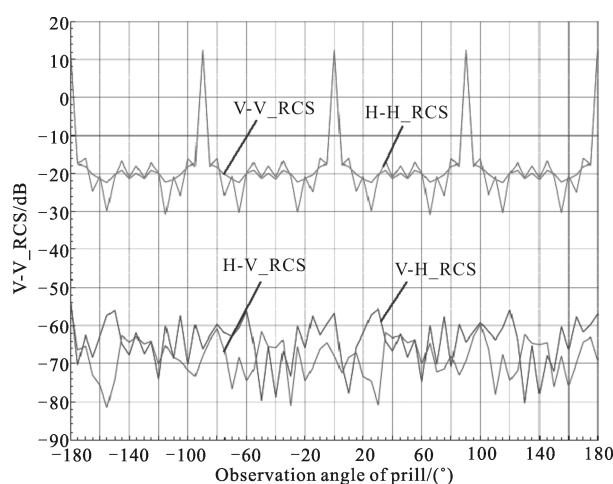


图 1 空间碎片目标 RCS 分析(10 cm)

Fig.1 RCS of space debris (10 cm)

空间碎片的姿态用图 2 直角坐标系来表示,空间碎片在  $X-Y$  平面内以  $Z$  轴为旋转轴以角速度  $\omega$  旋转, $\zeta$  为雷达中心到空间碎片坐标系原点基点连线(LOS:line of site)方向单位向量, $\alpha$  为  $\zeta$  与  $X-Z$  平面夹角。 $v$  为碎片飞行速度向量,与 LOS 夹角为  $\beta$ 。

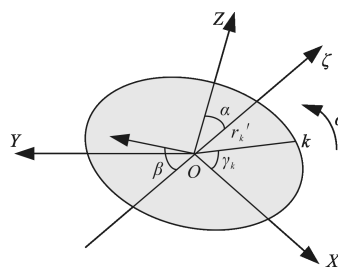


图 2 空间碎片运动坐标系

Fig.2 Coordinate system of movement of space debris

若空间碎片上距旋转中心距离为  $r_k'$ , 与 X 轴夹角为  $\gamma_k$  的一散射点  $k$  的单个距离单元横向回波为:

$$s_k(\tau) = A_k \exp(j2\pi f_c(t - 2R_k(\tau)/c)) \quad (1)$$

式中:  $A_k$  为散射强度;  $f_c$  为回波载频;  $t$  为一固定距离单元到达时间;  $\tau$  为横向采样时间;  $c$  为光速;  $R_k(\tau)$  为散射点  $k$  与雷达之间的距离。

式(1)与载波混频得基带信号:

$$s_k(\tau) = A_k \exp(-j4\pi R_k(\tau)/\lambda) \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  为发射波长。

在只有平动分量的情况下, 目标上各散射点回波的多普勒完全相同, 对雷达成像没有贡献, 应将平动分量补偿掉, 成为转台目标成像。假设目标平动得到很好的补偿, 则距离函数变化只有转动分量, 此时目标仅有转动引起的多普勒变化, 多普勒频率为:

$$f_D = 2\omega r_k \cos(\omega\tau + \gamma_k)/\lambda \quad (3)$$

则回波信号经过平动补偿后可表示为:

$$s_k(\tau) = A_k \exp[-j4\pi r_k \sin(\omega\tau + \gamma_k)/\lambda] \quad (4)$$

式中:  $\omega = \omega_z + \omega_p$ ,  $\omega_z$  为碎片目标自身转动角速度,  $\omega_p$  为目标与雷达视线相对转动角速度。目前的 SRMF 算法假设  $\omega_z \gg \omega_p$ , 即忽略目标与雷达视线相对转动角速度的影响, 此时,  $\omega = \omega_p$ 。

在高频近似条件下, 金属目标的散射场可以表示为离散点散射场的叠加, 所以多个散射点的最终回波模型为<sup>[6]</sup>:

$$s(\tau) = \sum_{i=1}^K A_i \exp[-j4\pi(r_i \sin(\omega\tau + \gamma_i))/\lambda] \quad (5)$$

上式可以看出, 对于恒定的自旋角速度, 横向回波为一系列以不同旋转半径  $r$  和角度相位  $\gamma$  为变参量的已知波形之和。如果给定一点极坐标位置  $(r, \gamma)$ , 则可建立改点理论的回波波形, 以该点信号波形为参考信号, 将横向回波相位校正后相加作相干处理, 可得到该散射点的冲击响应, 对选定点实现相干积累时, 这点附近点的滤波输出信号都不会完全相干, 使输出信号幅度降低, 只实现对该点的聚焦。依次处理可得到不同半径不同角度的各个散射点的冲击响应, 最终得到完整的目标二维像<sup>[7-9]</sup>。

对于旋转半径为  $r_k$  的散射点, 其参考匹配信号为:

$$s_{ref}^k(\tau) = \exp[-j4\pi r_k \sin(\omega\tau)] \quad (6)$$

图 3 给出了对于同一旋转半径两个散射点的仿真结果, 两个散射点的极坐标分别为:  $A_1(2\lambda, \pi/2)$ ,

$A_2(2\lambda, \pi)$ 。

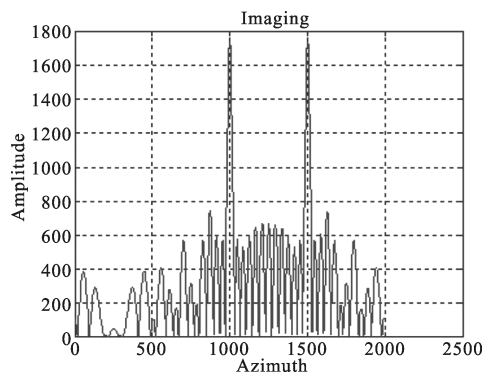


图 3 统一旋转半径的两个散射点的一维成像结果

Fig.3 One-dimensional imaging of two scattering points of same rotating radius

从以上分析可以看出, 在不考虑目标与雷达视线相对转动角速度的前提下, 可以将多个散射点分开, 实现高分辨成像。因此, 传统 SRMF 算法在忽略目标与雷达视线相对转动角速度的前提下, 可以较好地空间碎片上的多个散射点进行高分辨成像, 但在实际雷达应用中以上假设并不总是成立。空间碎片与雷达几何关系如图 4 所示, 空间碎片与微波雷达相距 100 km, 雷达平台与空间碎片的相对速度为 2 km/s, 空间碎片自旋角速度为  $\omega_z = \pi \cdot 0.5$  rad/s, 成像二维分辨率要求达到 0.01 m × 0.01 m。

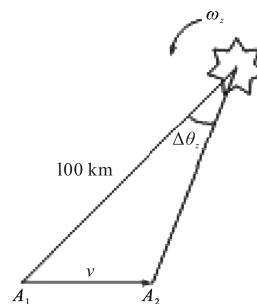


图 4 空间碎片与雷达的几何关系图

Fig.4 Relationship between radar and space debris

成像分辨率取决于积累角度, 其关系如式(7)所示:

$$\delta = \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta\theta_z} \quad (7)$$

式中:  $\lambda$  为雷达射频波长, 取 0.1 m, 则自旋积累角需要达到  $\Delta\theta_z = 5$  rad, 即相干观测时间为  $10/\pi$ s。在相干观测时间内, 雷达平台由  $A_1$  点运动到了  $A_2$  点, 从而形成了目标与雷达平台视线相对转动角度  $\Delta\theta_p$ 。由空间几何关系可以推算出, 目标与雷达视线相对转动角速度为  $\omega_p = 0.65$  rad/s。

若不考虑  $\omega_p$ , 在图 5 所示的几何关系条件下, 匹配函数只考虑自旋角速度  $\omega_z$ , 采用图 4 的仿真参数, 得到的仿真结果如图 5 所示。

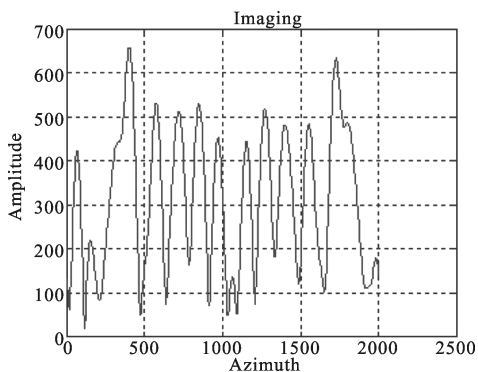


图 5 只考虑自旋角速度成像结果

Fig.5 Imaging result in the condition of rotating

从图 5 的仿真结果可以看出, 在实际雷达工作过程中, 原本可以分开的两个散射点由于忽略了目标与雷达视线相对转动角速度  $\omega_p$  而造成了匹配滤波函数的失配, 从而严重影响成像质量。同时, 对于空间碎片等目标, 目标回波会随着观测角的不同而产生剧烈起伏, 称为角闪烁效应, 频率分集技术可以有效地抑制角闪烁效应, 提高回波的平均信噪比。

## 2 频率分集融合 SRMF 成像方法

针对上述 SRMF 方法在实际雷达应用中的问题及目标的角闪烁效应, 文中提出了 SRMF 的改进算法——频率分集融合 SRMF 成像方法。方法融合了频率分集技术, 同时估算目标与微波雷达视线相对转动角速度  $\omega_p$ , 而后对匹配滤波函数进行修正。此方法要求要求雷达具有测量空间碎片距离和速度的能力, 这对于目前的天基雷达而言技术已较为成熟。

频率分集融合 SRMF 成像方法流程如下。

1) 从  $A_1$  点运动到了  $A_2$  点过程中, 雷达按照脉冲重复频率采样目标回波;

2) 雷达需要完成频率分集和 SRMF 补偿因子求取两项功能, 因此, 需要通过合理的波形设计, 使之满足雷达测量的需要。算法设计的雷达发射信号时序如图 6 所示, 定义雷达发射  $n$  组信号为一个信号处理间隔(CPI), 每组信号包含  $N+1$  个脉冲, 其中前  $N$  个脉冲的射频频率为  $f_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 用于频率分集; 每组最后一个脉冲的射频频率均为  $f_i$ , 用于进行 SRMF;

3) 对每组中的前  $N$  个同射频脉冲进行相干积累, 对不同组数据进行非相干积累, 克服目标的角闪烁效应, 利用距离凝聚技术对目标的距离信息进行测量, 每个 CPI 得到一个距离输出值  $R_j$  和速度输出值  $v_j$ ;

4) 对各组速度输出值  $v_j$  求取平均, 得到测量周期内目标的平均平动速度  $\bar{v}$ ;

5) 利用雷达任两次距离观测结果  $R_i$  和  $R_j$ , 可以计算出目标与雷达视线角速度为:

$$\omega_{pi} = \frac{\arccos\left[\frac{R_i^2 + R_j^2 - (\bar{v} \times (j-i) \times prf)}{2R_i R_j}\right]}{prf \times (j-i)} \quad (8)$$

式中:  $prf$  为脉冲重复频率。

6) 为了消除随即误差和抖动的影响, 可采用统计平均的方法平滑计算结果, 最终估算出的目标与雷达视线相对转动角速度如式(9)所示;

$$\bar{\omega}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_{pi} \quad (9)$$

7) 根据计算出来的目标与雷达视线相对转动速度对匹配滤波函数进行修正, 修正后的匹配滤波函数形式为:

$$s_{ref}^k(\tau) = \exp[-j4\pi r_k \sin(\omega_z - \bar{\omega}_p \tau)] \quad (10)$$

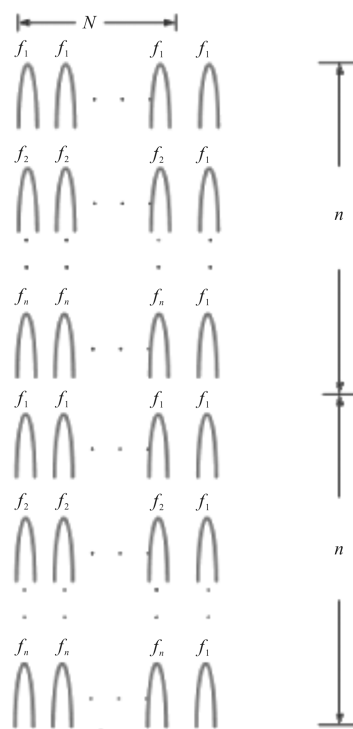


图 6 信号时序图

Fig.6 Signal temporal condition

8) 根据 SRMF 算法进行碎片二维成像。

在图 4 的运动条件下,利用目标定位补偿算法可以估算出目标与雷达视线相对转动角速度  $\omega_p$ ,如图 7 所示,共对  $\omega_p$  进行 8 次采样平均后得  $\bar{\omega}_p=0.6327 \text{ rad/s}$ 。

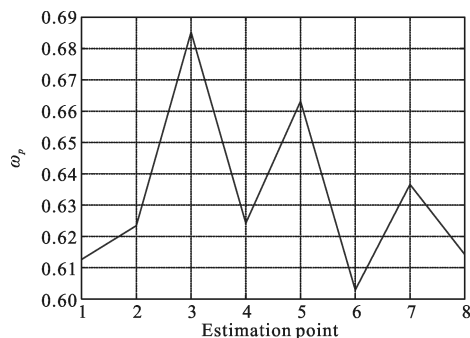


图 7 角速度估算结果

Fig.7 Estimation of angular rate

仿真中,模拟一个喇叭天线形状的空间碎片,如图 8 所示,使用传统 SRMF 方法的成像结果如图 9 所示,从图中可以明显看出碎片目标散射点失配严重,而利用频率分集融合 SRMF 成像方法对碎片目标进行成像的结果如图 10 所示,可以看出角闪烁得到明显抑制的同时相位历程匹配效果良好,从碎片

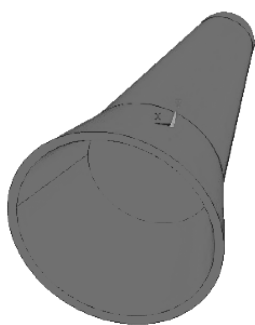


图 8 喇叭形碎片目标

Fig.8 Trumpet debris

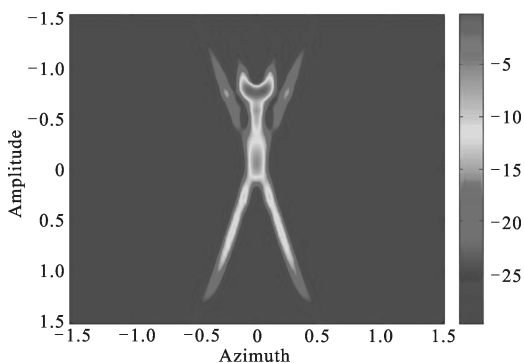


图 9 传统 SRMF 成像结果图

Fig.9 Imaging of traditional SRMF

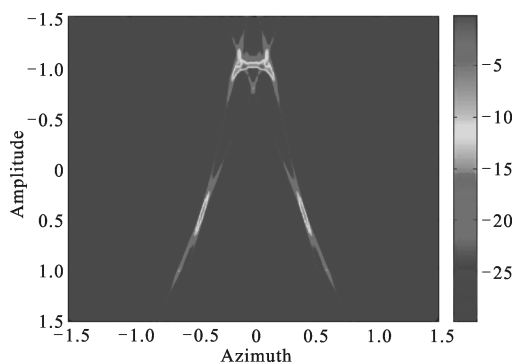


图 10 分集融合 SRMF 成像方法结果图

Fig.10 Imaging with method of diverse SRMF

目标得到清晰的二维成像。

### 3 结论

文中从真实目标的回波散射特性入手,首次将频率分集技术融入到目标的高分辨成像算法中。频率分集技术可以有效地克服目标的角闪烁效应,提高回波的平均信噪比,有利于对空间碎片目标的检测和成像;文中提出了频率分集融合成像波形设计方案,不仅实现了频率分集功能,而且将频率分集信号与成像信号在时间上对应起来,提高了补偿因子的求取精度;同时针对空间高速小尺寸碎片目标获取高分辨二维图像,采用低分辨信号实现高分辨成像,信号带宽远小于 ISAR 成像算法,因此工程实现性大大增强;文中分析了目标高速运动引起的等效积累转角对成像影响,通过对等效转动速度的估算,修正匹配滤波器,使之满足转台成像条件,完成目标高分辨二维成像。

### 参考文献:

- [1] Li Bin, Sang Jizhang, Ning Jinsheng. Analysis of accuracy in orbit predictions for space debris using semianalytic theory [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (11): 3310-3316. (in Chinese)
- [2] Dong Xin, Ouyang Gaoxiang. Relative navigation for space-debris based on cubature Kalman filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S): 152-157. (in Chinese)
- [3] Wang Baoping, Guo Junjie, Sun Chao, et al. ISAR imaging algorithm based on SRMF and sequence CLEAN[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3410-3416. (in Chinese)
- [4] Esmiller B, Jacqueland C. CLEANSPACE "small debris

- removal by laser illumination and complementary technology [J]. *Signal Process*, 2011, 25(2): 26–28.
- [5] Shen S Y, Jin X, Weng M, et al. Removal process analysis of space debris using ground-based pulsed lasers. 2012, 102: 15781–15786.
- [6] Cuomo K M, Piou J E, Mayhan J T. Ultra-wideband sensor fusion for BMD discrimination [C]//IEEE 2000 International Radar Conference, 2000: 31–34.
- [7] Haywood B, Evans R J. Discrete 2–D system identification for imaging rotating radar targets [J]. *Signal Process*, 1992, 29: 191–211.
- [8] Farina A, Prodi F, Vinelli F. Application of superresolution techniques to radar imaging[J]. *Chin J Syst Eng Electron*, 1994, 5(1): 1–14.