

基于单距离匹配滤波的太空碎片雷达成像

王琦 邢孟道 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要: 对于尺寸小于雷达距离分辨率的太空碎片进行雷达成像,以前提出的方法只有SRDI (Single Range Doppler Interferometry)。该文针对太空碎片运动特点,给出了一种单距离匹配滤波太空碎片成像方法。该方法利用一个距离单元横向回波数据经不同旋转半径参考信号匹配滤波后得到太空碎片二维像。仿真结果表明这种方法比SRDI方法计算量少、成像效果好。

关键词: 雷达成像; 太空碎片; 单距离匹配滤波

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1037-04

Single Range Matching Filtering Based Space Debris Radar Image

Wang Qi Xing Meng-dao Bao Zheng

(Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian Univ, Xi'an 710071, China)

Abstract: For space debris radar imaging with the dimension smaller than radar range resolution, only Single Range Doppler Interferometry (SRDI) is discussed before. Considering movement features of space debris, a Single Range Matching Filtering (SRMF) approach for space debris radar imaging is proposed in this paper. The proposed approach is to obtain 2-D image of space debris by using a range unit cross-range echo data and by matching filtering the signals with different turning radius. Simulation results show that of the proposed approach, its computational load is less than that of SRDI, and its imaging effect is better.

Key words: Radar imaging; Space debris; Single Range Matching Filtering (SRMF)

1 引言

空间碎片的存在严重地威胁着在轨运行航天器的安全,它们和航天器的碰撞能直接改变航天器的表面性能,造成表面器件损伤,导致航天器系统故障,对航天器的正常运行带来极大的危害。所以太空碎片(卫星和火箭在地球轨道上留下的碎片)的形状估计是一项重要的工作,它可以用来估计碎片和运行的太空船进行碰撞的可能性。那些远小于1cm的碎片可以通过设计适当的防护装置来保护太空飞船,那些大于10cm的碎片可以通过环球雷达网络和光学传感器对其进行不断地监测。所以远景观测太空碎片的最重要的目标是那些尺寸在1-10cm的碎片。对于这些尺寸较小的空间碎片,目前的雷达带宽还无法满足对其进行 ISAR 成像的要求。所以对那些尺寸小于雷达距离分辨率的太空碎片进行成像,通常采用一种方法——SRDI^[1], SRDI方法主要利用太空碎片通常会围绕它的主轴进行简单的自旋转运动这一事实,通过迁徙一个旋转周期的多普勒谱就可以得到目标的二维像。SRDI主要通过分析目标横向回波的多普勒谱的变化特点,将单个距离单元数据转化为时频域进行曲线积分处理以得

到目标二维像。魏格纳分布等非线性时频分析算法精度较高但有交叉项的影响,线性时频分析算法稳健,多信号下没有交叉项,但加窗使一小段非平稳信号近似平稳来分析的方法使分辨率受到限制,这些都使SRDI方法达到理想分辨率图像。同时这种方法由于采用时频变换与沿固定曲线进行积分复杂运算,所以计算量很大。本文同样基于太空碎片通常会围绕它的主轴进行简单的自旋转运动这一事实,给出一种SRMF(Single Range Matching Filtering)方法进行太空碎片雷达成像。这种方法对目标不同旋转半径建立不同匹配滤波器的方法来对横向回波数据进行逐个半径匹配滤波,得到不同半径上存在点散射强度估计。由此得到极坐标形式的目标二维像,从中可以估计目标的形状、尺寸。这种算法可利用FFT有效提高成像速度,与SRDI方法相比具有分辨率高、计算量少的优点。通过研究与仿真实验结果可以证实文中算法的有效性。

2 回波信号分析

通常 ISAR 成像是发射宽带信号从而获得高分辨距离像,但即使是使用高功率雷达,在 100-1000km 远处观测 1-10cm 的物体也是很困难的事情。同时为了确保对这些小目标观测的灵敏度,还需要限制系统的带宽,在这种情况下要达到小于 10cm 的距离分辨率更是不可能的。然而,由于太空碎片总是围绕主轴以一定的角速度旋转的实际情况,对

2006-10-23 收到, 2007-05-15 改回

国家自然科学基金(60502044)和雷达信号处理重点实验室基金(9140C010205060C01)资助课题

相同的目标如果观测周期多于一个自旋转周期,只利用横向回波信息还是有可能获得两维图像的。所以只需要对单个距离单元横向回波加以分析处理。

设空间碎片在空间的姿态用图1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 ω 旋转, ζ 为合成孔径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, α 为 ζ 与X-Z平面夹角。 v 为碎片飞行速度向量,与los夹角为 β 。

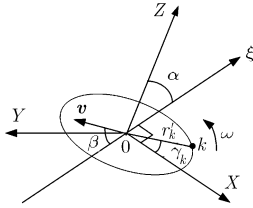


图1 空间碎片运动坐标系

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

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

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, τ 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

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

其中 λ 为发射波长。令信号 $s_k(\tau) = A_k \exp[-j\phi_k(\tau)]$,其中相位 $\phi_k(\tau) = \frac{4\pi}{\lambda} R_k(\tau)$ 。如图1所示,点目标的距离函数可写为

$$R_k(\tau) = R_0 + v \cos(\beta)\tau + r'_k \sin(\omega\tau + \gamma_k) \sin(\alpha) \quad (3)$$

式(3)中 R_0 为初始雷达距目标中心O距离,是一常量, v 为飞行速度,在观测时间内 α 认为常量,可将 $r'_k \sin(\alpha)$ 合写为成像平面内点目标半径 r_k ,则该点的雷达回波多普勒频移为

$$f_D = \frac{1}{2\pi} d\phi(R_k(\tau))/d\tau = 2[v \cos(\beta) + \omega r_k \cos(\omega\tau + \gamma_k)]/\lambda \quad (4)$$

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,式(3)距离函数变化只有转动分量,可令 $R_k(\tau) = r_k \sin(\omega\tau + \gamma_k)$,此时目标仅有转动引起的多普勒变化,多普勒频率变为

$$f_D = 2\omega r_k \cos(\omega\tau + \gamma_k)/\lambda \quad (5)$$

则信号平动补偿后回波可写为

$$s_k(\tau) = A_k \exp\left[\frac{-j4\pi}{\lambda} r_k \sin(\omega\tau + \gamma_k)\right] \quad (6)$$

实际式(6)中 $\omega = \omega_z + \omega_p$, ω_z 为目标自身转动角速度, ω_p 为目标与雷达视线相对转动速度。通常ISAR成像在目标没有自旋转的情况下,采用转角很小的微动模型,由相对转动角速度 ω_p 在不同半径产生不同的多普勒频率得到横向图像,即为普通RD算法^[2]。此时额外附加了自转角速度 ω_z 引起的

多普勒频率,且观测时间超过自转周期,这样回波信号上产生额外的频率调制,所以旋转目标在信号回波上产生正弦相位调制^[3]。在自旋转引起的角度变化远大于相对转动角度时,可近似认为 ω 为目标自旋角速度。

这种时变频率信号通常分析方法采用时频分析。旋转点目标($2\lambda, 0$)回波信号的时频分布如图2所示

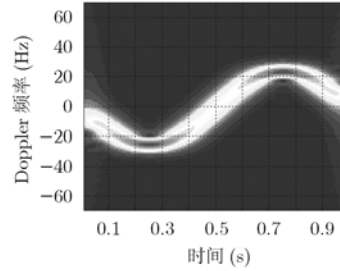


图2 旋转点目标时频分布

由图2看到随着时间变化频率做正弦周期变化,这也验证了式(5)。在高频近似的情况下,金属目标的散射场可以表示为离散点散射场的叠加^[4],所以在多个散射点的情况下最终回波信号模型为

$$s(\tau) = \sum_{k=1}^K A_k \exp[-j4\pi(r_k \sin(\omega\tau + \gamma_k))/\lambda] \quad (7)$$

3 SRDI与SRMF算法

在确定自旋角速度 ω 的基础上,SRDI算法可以把信号的瞬时频率和目标相对转台中心的位置直接联系起来。将横向回波数据由时频分析算法转化到时频域后进行成像处理,令回波数据时频表达式为 $S_r(\tau, f)$,在时频域中时间轴对应旋转角度变化,可将时间变化 τ 转换为转动角度 $\theta = \omega\tau$,所以不同的转角 θ 对应的回波数据瞬时多普勒频率可用关系式

$$r(\theta) = \frac{\lambda}{2\omega \cos(\theta)} f(\theta) \quad (8)$$

与半径对应起来。则最终由式(9)

$$S_m(r, \gamma) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} S_r(r \cos\{\theta - \gamma\}, \theta) d\theta \quad (9)$$

得到极坐标点 (r, γ) 的散射强度。

这种方法必不可少的步骤要采用时频分析,通常时频分析方法分为线性与非线性两大类,线性时频分析算法稳健,多信号下没有交叉项,但加窗使一小段非平稳信号近似平稳来分析的方法使分辨率受到限制。魏格纳分布等非线性时频分析算法精度较高但有交叉项的影响,所以SRDI算法受到时频分析算法的精度限制,并不能达到理想半雷达波长的分辨率图像。而且用到的式(9)积分通常是在特定的曲线上求和来进行的,这是比较麻烦的。所以SRDI算法计算量大,同时达不到理想精度。

本文给出另一种太空碎片成像方法SRMF。通过上节分析,可以看到如果自旋角速度在观测时间内恒定,横向回

波为一系列以不同旋转半径 r 和角度相位 γ 为变参量的已知波形之和。如果给定一点极坐标位置 (r, γ) , 则可建立该点理论回波波形, 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, 可得到该散射点冲激响应。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, 使输出信号幅度下降, 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。需要指出通过卷积直接作匹配滤波的运算量相对较大, 处理所需的信号与匹配滤波器的卷积可由 FFT 在频域通过共轭相乘再作 IFFT 求得, 这样大大提高了运算效率。

首先将式(7)的回波信号用傅里叶变化转换到频域来讨论如何处理, 回波FFT变为

$$S(f) = \sum_i \int_{T_1}^{T_2} A_i \exp\left[\frac{-j4\pi}{\lambda} r_i \sin(\omega\tau + \gamma_i)\right] \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (10)$$

其中 $[T_1 \ T_2]$ 为采样区间, 针对不同半径 $r_k \in (0, r_{\max})$, 建立 r_k 参考匹配信号:

$$S_{\text{ref}}^k(\tau) = \exp[-j4\pi(r_k \sin(\omega\tau))] \quad (11)$$

将式(11)参考信号 FFT 后

$$S_{\text{ref}}^k(f) = \int_{T_1}^{T_2} \exp\left[\frac{-j4\pi}{\lambda} r_k \sin(\omega\tau)\right] \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (12)$$

令 $t_1 = \tau - \frac{\gamma_i}{\omega}$; 则式(10)转化为

$$S(f) = \sum_i \int_{T_1 + \gamma/\omega}^{T_2 + \gamma/\omega} A_i \exp\left[\frac{-j4\pi}{\lambda} r_i \sin(\omega t_1)\right] \exp(-j2\pi f t_1) \cdot \exp\left(j2\pi f \frac{\gamma_i}{\omega}\right) dt_1 \quad (13)$$

通常周期信号抽样点数应包含整数周期, 否则会出现频谱泄漏, 带来不利影响。在由自相关法得到自旋转周期的基础上可以选取整数倍自旋转周期长度数据进行处理, 则 $\omega(T_2 - T_1) = 2k\pi$, $k = 1, 2, \dots$ 。由此得到

$$S(f) = \sum_i \int_{T_1}^{T_2} A_i \exp\left[\frac{-j4\pi}{\lambda} r_i \sin(\omega t_1)\right] \exp(-j2\pi f t_1) d(t_1) \cdot \exp\left(j2\pi f \frac{\gamma_i}{\omega}\right) \quad (14)$$

在由半径 r_k 构造的参考信号进行匹配滤波时其它半径上的回波视为杂波, 设在半径 r_k 上有 p 个散射点, 可令

$$S(f) = \sum_p \int_{T_1}^{T_2} A_p \exp\left[\frac{-j4\pi}{\lambda} r_k \sin(\omega t_1)\right] \exp(-j2\pi f t_1) d(t_1) \cdot \exp\left(j2\pi f \frac{\gamma_p}{\omega}\right) + n = S_k(f) + n \quad (15)$$

式(15)中 n 为除旋转半径 r_k 上信号外的回波之和的贡献, 相对参考信号视为杂波, 与参考信号匹配滤波后不会形成完全相干输出。旋转半径 r_k 上频域信号为

$$S_k(f) = \sum_p A_p S_{\text{ref}}(f) \exp\left(-j2\pi f \frac{\gamma_p}{\omega}\right) \quad (16)$$

经匹配滤波后忽略杂波影响输出为

$$s(t) = F_{(f)}^{-1}[S(f)S_{\text{ref}}^*(f)] = F_{(f)}^{-1}\left[\sum_p A_p S_{\text{ref}}(f)S_{\text{ref}}^*(f) \exp\left(-j2\pi f \frac{\gamma_p}{\omega}\right)\right] \quad (17)$$

最终得到旋转半径为 r_k 的信号输出表达式

$$s(t) = \sum_p A_p \text{psf}\left(t - \frac{\gamma_p}{\omega}\right) \quad (18)$$

其中 $\text{psf}(t) = F_{(f)}^{-1}[|S_{\text{ref}}(f)|^2]$, $\text{psf}(\cdot)$ 称为点散布函数(point spread function), 它可确定分辨率。所以经上面步骤可得到旋转半径为 r_k 上面各个点目标散射强度。选用不同旋转半径匹配滤波参考信号, 就能得到每个半径上点散射强度估计, 从而得到旋转目标空间二维像。从上面分析可以看到旋转物体不同的半径具有不同的点散布函数, 分辨率也不同。一般定义散射中心包络的主瓣峰值和相邻散射中心包络的第一零点相互重合, 则两个散射点处于临界可分状态, 这种定义下系统分辨率为主瓣宽度的一半。图3给出了一旋转目标在旋转半径分别为 2λ , λ , 0.5λ 时得到的 psf。从图中可看到分辨率分别为 5° , 10° , 20° , 旋转半径越大角度分辨性能越好。

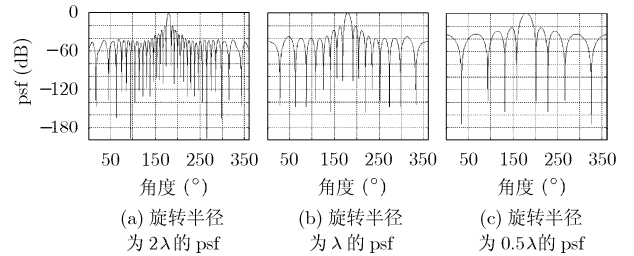


图3 不同旋转半径 psf

从上述分析可以看到 SRMF 直接利用了已知数据波形的特点进行成像, 并没有通过时频分析与曲线积分运算, 同时可利用快速 Fourier 变换, 具有好的计算效率。为了与 SDRI 方法作性能比较, 下面给出分别用 SRDI 与 SRMF 方法成像结果, 3 个点平面坐标分别位于 $(0, \lambda)$, $(0, \lambda/2)$, $(\lambda \cos(2\pi/3), \lambda \sin(2\pi/3))$, 发射波长 λ 选用 0.03m 。图 4(a), 4(b) 分别为 SRMF 与 SRDI 所成的二维像, 为了比较两种方法的角度分辨率, 图 4(c), 4(d) 分别给出了旋转半径为 λ 上的 SRMF 与 SRDI 所成的一维像。图 4(e), 4(f) 则给出了 SRMF 与 SRDI 在同一方位角, 半径方向上分辨率的比较图。从成像结果比较, 可以看到 SRMF 方法明显具有更好的分辨率。

4 结束语

对于尺寸较小(如 1-10cm)的空间碎片, 目前的雷达带宽还无法满足对其进行 ISAR 成像的要求。所以对那些尺寸小于雷达距离分辨率的太空碎片进行成像, 通常采用一种方法—SRDI, 以具有分辨率低, 计算量大的缺点。本文给出另

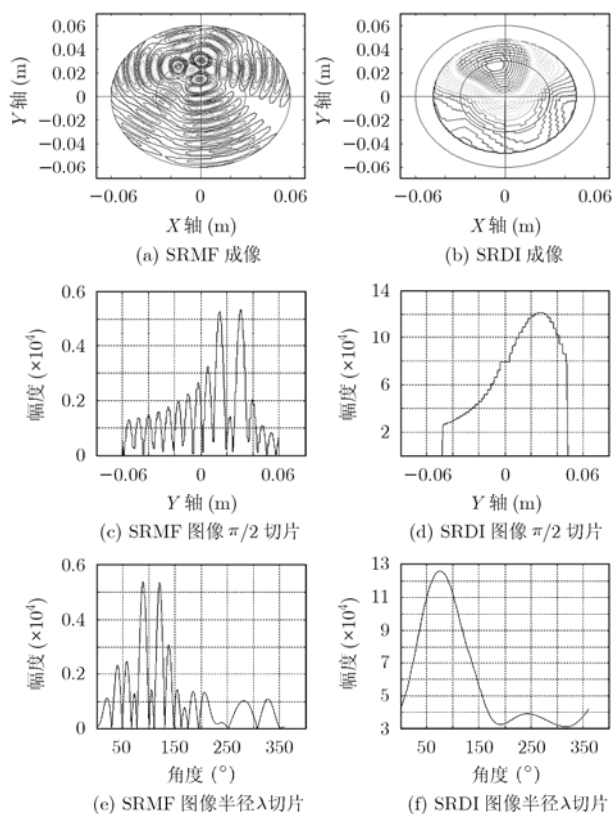


图4 SRMF与SRDI性能比较

一种成像方法 SDMF。这种方法利用太空碎片通常会围绕它们的主轴进行简单的自旋转运动的事实,对不同旋转半径的

散射点分别采用相应的匹配滤波器进行滤波的方法得到二维图像。文中对 SRMF 方法进行了分析推导,通过仿真验证了 SRMF 算法特性。研究与实验表明 SDMF 算法在对太空碎片成像方面与 SDRI 相比较具有更好的实用性。

参考文献

- [1] Sato T. Shape estimation of space debris using single-range doppler interferometry [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(2): 1000-1005.
- [2] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005: 6-9.
- [3] Chen V C and Qian S. Joint time-frequency transform for radar time Doppler imaging [J]. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.* 1998, 34(2): 486-499
- [4] Li H J and Farhat N H. A new iterative algorithm for extrapolation of data available in multiple restricted regions with application to radar imaging [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1987, 35(5): 581-588.

王琦: 男, 1972年生, 工程师, 研究方向为 ISAR/SAR 成像、运动目标检测和 ISAR 干扰研究.

邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达成像、目标识别和天波超视距雷达信号处理.

保铮: 男, 1927年生, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 中国电子学会会士, 主要研究方向为雷达信号处理.