

星载逆合成孔径激光成像雷达空间碎片观测

臧博, 陈士超, 郭睿, 唐禹, 邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 分析了星载 ISAIL 对空间碎片目标成像的原理, 根据空间碎片目标自旋运动的特点, 提出了一种结合压缩感知与复逆 Radon 变换的低重频成像算法。该算法结合压缩感知技术和复逆 Radon 变换, 只需发射带宽很窄的激光信号, 并对单个距离单元处理即可实现对目标的高分辨率二维成像, 解决了系统脉冲重频率对成像的限制。仿真验证表明: 此算法不仅可以解决对空间碎片目标成像过程中系统重频率不够的问题, 而且通过大幅度减小信号带宽降低了激光信号调制技术对成像的影响, 算法是可行性。

关键词 逆合成孔径成像激光雷达; 空间碎片目标; 星载 ISAIL 系统; 低重频成像算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.04.007

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)04-0028-05

逆合成孔径成像激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Imaging Lidar, ISAIL)结合相干激光技术和逆合成孔径技术, 是一种新型主动遥感探测成像技术^[1]。与传统的激光成像雷达相比, ISAIL 突破了系统孔径的限制, 二维分辨率在距离上具有较好的一致性, 不会由于作用距离的增加而导致分辨率恶化; 与常规的微波成像雷达(SAR、ISAR等)相比, ISAIL 可以得到分辨率高得多的目标图像, 提供更为丰富、准确的目标信息, 是理论上可以在数 km 的距离上实现 cm 级的分辨率的唯一手段。

ISAIL 以其上述优势吸引了众多的关注, 国内外展开了广泛的研究并取得突破性的进展^[2]。作为一种相干体制的激光成像雷达系统, 由于大气对发射及回波信号的幅度、相位、传播方向、偏振等要素的影响, SAIL 在大气环境中的应用受到严重地限制。ISAIL 系统在星对星以及星对空间碎片的观测中, 由于脱离了大气的影响, 可以发挥其作用距离远、分辨率高、可对 10 cm 以下小尺寸目标精细成像的特点。与常规的被动光学观测系统相比具有全天时工作、星空背景下目标识别快速等优势, 有广阔的应用前景, 值得深入研究。

受限于波长, ISAIL 系统的视场通常较小, 不适用于大场景搜索目标, 但是由于其高分辨率的特点, 可以对场景中的特定目标精细观测。因此对于星载空间碎片观测系统, 可以将微波雷达系统与 ISAIL 系统结合, 发挥各自优势, 通过星载微波雷达对大范围空域搜索, 而通过 ISAIL 系统实现特定目标的精细观测。

针对空间碎片具有围绕自身主轴进行自旋的运动特点, 本文阐述了星载 ISAIL 对空间碎片成像的原理, 提出了一种低重频成像算法。

1 星载 ISAIL 空间碎片目标成像几何模型

由于空间碎片具有围绕自身主轴自旋的特点, 基于文献[3]中的 SRDI 思想, 系统可发射单频激光信号, 对相同的目标进行多于一个自旋周期观测, 则通过回波的多普勒信息分析获得目标二维图像。由此可以充分利用激光的单色性的特点, 避免使用线性调频信号时引入的非线性干扰, 同时也可以避免线性调频信号对

* 收稿日期: 2010-11-29

基金项目: 国家“973”计划资助项目(2010CB731903); 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合基金资助项目(61001210)

作者简介: 臧博(1983-), 男, 河北衡水人, 博士生, 主要从事合成孔径成像激光雷达、雷达系统设计研究。

E-mail: zangbotiger@163.com

系统重频率的限制。但是考虑到激光信号的接收问题,系统可发射带宽很窄的线性调频激光信号,以便于采用 Dechirp 接收方式^[2],降低系统对回波信号采集的压力,同时也降低了对激光信号调制技术的要求。

空间目标普遍具有高速性,由于高速运动的影响,需要在脉冲作用时间内考虑目标速度给回波带来的影响,“一步一停”的信号模型不再成立,因此在对目标回波处理前,应先进行速度补偿,才能满足“一步一停”的成像条件,进行后续处理。另外,由于星载 ISAIL 仅适用于在搜索到目标后对其进行精细观测,因此,成像模型的分析可基于以下假设条件:第一,通过微波雷达等手段已经确定目标运动参数,并将高速运动的目标补偿为转台模型;第二,假设在雷达观测时间内,目标自旋速度恒定。成像转台模型见图 1。

假设系统发射的为线性调频信号,以便进行 Dechirp 接收,其表达式为:

$$s_i(\tau, t_m) = a_r(\tau) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\gamma\tau^2\right)\right) \quad (1)$$

式中: $a_r(\tau) = \begin{cases} 1, & |\tau| \leq \frac{T_p}{2} \\ 0, & |\tau| > \frac{T_p}{2} \end{cases}$ 为距离窗函数, T_p 为脉宽; f_c 为频率中心; γ 为调频率; τ 为快时间,即发射时刻

为起点的时间; t_m 为慢时间,即激光脉冲信号发射时刻, τ, t_m 与全时间 t 的关系为 $\tau = t - t_m$ 。

目标采用散射点模型。以目标上任一散射点 $P(x, y)$ 为例,则 t_m 时刻 $P(x, y)$ 点的回波信号可表示为:

$$s_r(\tau, t_m) = A_{xy} a_a(t_m) a_r\left(\tau - \frac{2R_{xy}(t_m)}{c}\right) \exp\left[j\pi\gamma\left(\tau - \frac{2R_{xy}(t_m)}{c}\right)^2\right] \exp\left[j2\pi f_c\left(t - \frac{2R_{xy}(t_m)}{c}\right)\right] \quad (2)$$

式中: $a_a(t_m)$ 为方位窗函数; $R_{xy}(t_m)$ 为零时刻位于目标直角坐标系 (x, y) 处的散射点 $P(x, y)$ 在 t_m 时刻距离 ISAIL 接收孔径相位中心的瞬时距离,可表示为:

$$R_{xy}(t_m) \approx R_0 + x\sin\theta(t_m) + y\cos\theta(t_m) \quad (3)$$

式中: R_0 为零时刻目标转动中心距离 ISAIL 接收孔径相位中心的距离; $\theta(t_m)$ 为 t_m 时刻目标相对 ISAIL 视线转过的角度。

设参考距离即为 R_0 ,则经 Dechirp 接收并经去斜处理及补偿剩余视频相位(RVP)项^[4]操作后得:

$$s_r(f_r, t_m) = A_{xy} T_p a_a(t_m) \text{sinc}\left[T_p\left(f_r + 2\frac{\gamma}{c}R_{p0}\sin(\theta_0 + \theta(t_m))\right)\right] \exp\left[-j\frac{4\pi f_c}{c}R_{p0}\sin(\theta_0 + \theta(t_m))\right] \quad (4)$$

式中: R_{p0} 为散射点 P 到转台中心 O 之间的距离; θ_0 为零时刻 PO 连线与直角坐标系横轴夹角,其中进行了距离向傅里叶变换,以便提高信噪比。

由式(4)可知,旋转散射点回波的相位项为正弦曲线,为了对散射点初始位置进行重构,可对式(4)进行复逆 Radon 变换得:

$$I(x, y) = \int_{-\frac{\Theta}{2}}^{\frac{\Theta}{2}} S(\theta) \exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}(x\cos\theta + y\sin\theta)\right) d\theta = \int_{-\frac{\Theta}{2}}^{\frac{\Theta}{2}} \sum_k A_k \exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}((x - x_k)\cos\theta + (y - y_k)\sin\theta)\right) d\theta \quad (5)$$

式中 Θ 为观测时间内目标相对雷达视线转过的角度。由式(5)可知上述过程是一个相干积累的过程,对于第 k 个散射点而言,当 $x = x_k, y = y_k$ 时,上式中的相位项为 1,积分结果为 ΘA_k ,在重构图像域中的 (x_k, y_k) 位置会出现幅度为 ΘA_k 的峰值。反之当 $x \neq x_k, y \neq y_k$ 时,被积分项中的相位是非相干的,因此在图像域中不会出现峰值。

通过文献[5]可知,对空间目标等旋转目标成像的雷达系统,系统重频率应满足:

$$\text{PRF} > \frac{4\omega R_{\max}}{\lambda} \quad (6)$$

式中: R_{\max} 为目标散射点距离目标转动中心最大距离; ω 为目标自旋角速度(rad/s)。则对于一个半径为 0.1

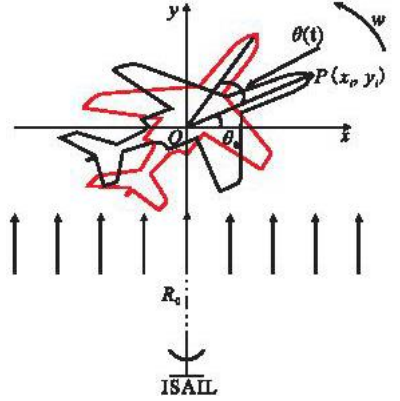


图1 转台模型

Fig. 1 Rotating platform model of ISAIL

m, 自旋频率为 10 Hz, 即转动角速度为 $20 \pi \text{ rad/s}$ 时, 要求中心波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 的 ISAIL 系统的重频率约为 16.2 MHz。如此高的重频率对于 ISAIL 系统是难以实现的^[2], 因此有必要开发一种可以在低重频下实现成像的算法。

2 基于 CS 的星载 ISAIL 空间碎片目标成像算法

2.1 压缩感知原理

压缩感知(Compressed Sensing, CS)是由 David L. Donoho 等人提出的^[6]。以一维有限长的离散信号 $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \in \mathbf{R}^N$ 为例, 根据 CS 理论, 如果 \mathbf{x} 在某个域下是 K 稀疏的, 即存在基矩阵 $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N\}$, 使得 $\mathbf{x} = \Psi \mathbf{s}$, \mathbf{s} 为对应的系数向量, 其中有 $K (K \ll N)$ 个元素非零, 则只需要对 \mathbf{x} 进行 $M (K < M \ll N)$ 次测量, 即可对 \mathbf{x} 进行精确重构, 获取 \mathbf{x} 中的完整信息^[7], 而传统理论对信号 \mathbf{x} 重构需要进行 N 次以上的测量。

利用基于正交基的 CS 理论对原始信号 \mathbf{x} 进行观测和恢复的过程如下: 在对原始信号 \mathbf{x} 观测的过程中, 建立线性测量矩阵 $\Phi (M \times N)$, 通过对 \mathbf{x} 进行 M 次观测实现降维处理, 即:

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} = \Phi \Psi \mathbf{s} = \Theta \mathbf{s} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_M\} \in \mathbf{R}^M$, 测量矩阵 Φ 的建立不依赖于信号模型, 是非自适应的, 且 Φ 的建立应该令 $\Theta = \Phi \Psi$ 满足 RIP (Restricted Isometry Property, RIP) 条件^[8], 即对于任意 $T (|T| \leq K)$ 稀疏信号 \mathbf{x}_T , 应满足不等式:

$$(1 - \delta_K) \|\mathbf{x}_T\|_{l_2} \leq \|\Theta \mathbf{x}_T\|_{l_2} \leq (1 + \delta_K) \|\mathbf{x}_T\|_{l_2}, \quad \mathbf{x}_T \in \mathbf{R}^N, \quad |T| \leq K \quad (8)$$

式中 $\delta_k \in (0, 1)$ 。一般选择高斯白噪声矩阵或贝叶斯矩阵作为测量矩阵。

式(7)是一个病态问题, 为从测量信号 \mathbf{y} 大概率恢复原始信号 \mathbf{x} 或 \mathbf{x} 在空间 Ψ 下的等价向量 \mathbf{s} , 测量次数 M 应满足不等式^[9]:

$$M > cK \log_2(N/K) \leq N \quad (9)$$

Donoho 提出利用最优化方法重构原始信号, 可以得到接近最优化的系数向量 $\hat{\mathbf{s}}$, 建立求解方程如下:

$$\min \lambda \|\hat{\mathbf{s}}\|_1 \quad \text{subject to} \quad \|\mathbf{y} - \Theta \hat{\mathbf{s}}\|_2 < \varepsilon \quad (10)$$

式中 $\|\cdot\|_1$ 表示范数 1。求解式(10)属于基匹配问题, 通常采用凸优化的方法或效率较高的贪婪算法实现, 如正交匹配追踪算法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)^[10]或基追踪算法(Basis Pursuit, BP)^[11]。

2.2 基于 CS 的星载 ISAIL 空间碎片成像算法

ISAIL 目标像可解释为目标上散射点的位置以及各散射点对激光信号后向散射的强度, 从而反映了目标的尺寸和形状。强散射点通常只占成像平面的一部分, 而来自弱散射点的信号对成像几乎没有贡献, 因此, 回波信号通常视为众多强散射点子回波的和, 而来自弱散射点的回波则视为噪声。上述分析表明 ISAIL 信号在成像域可视为稀疏的。

将成像平面沿距离向和方位向做二维离散化处理, 假设共有 K 个可能存在散射点的位置, 则成像平面通过一维向量表示为:

$$\mathbf{s} = [A_1, A_2, \dots, A_K]^H, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

式中 A_i 为第 i 个成像位置的后向散射系数, 若不存在散射点则为零, 故一维向量 \mathbf{s} 具有稀疏性; $[\]^H$ 表示共轭转置。

由式(5)可得出变换矩阵 $\mathbf{T} = \{\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_N\}$ 可表示为:

$$\mathbf{T}_i = \left[\exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} (x_i \cos\theta + y_i \sin\theta)\right) \right]^H, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (12)$$

从而基矩阵可表示为:

$$\Psi = \mathbf{T}^H \quad (13)$$

式中 Ψ 为 $N \times K$ 的矩阵, N 为方位向不模糊时, 在观测时间内发射的脉冲数。

假设方位向不存在模糊时的系统重频率为 PRF_0 , 而系统能提供的重频率仅为 PRF_1 , 且二者之间有如下关系, 即:

$$\text{PRF}_0 = Q \times \text{PRF}_1 \quad (14)$$

则相当于对系统重频率为 PRF_0 时的回波数据进行 Q 抽 1 的操作,即对基矩阵 Ψ 进行 Q 抽 1 的操作,使之成为 Ψ_1 , Ψ_1 为 $M \times K$ 的基矩阵, $M = \text{floor}\left(\frac{N}{Q}\right)$ 。

采用高斯矩阵为测量矩阵 Φ ,将式(11)和式(13)代入式(10),利用凸优化的方法或效率较高的贪婪算法即可对稀疏向量 s 进行精确的恢复,最后将 s 再转变为二维矩阵形式,即得到目标二维像。

此算法系统 PRF 的降低是以对目标进行多于一个自旋周期的观测为代价的,当系统要求大幅度降低 PRF 时,则需要对目标进行更多自旋周期的观测。通常情况下,空间碎片目标的自旋频率较高,进行多个自旋周期的目标观测并不会增加太多的观测时间。通过增加观测时间来降低系统的 PRF,即降低系统设计的复杂度,更为方便、经济。

3 仿真实验

通过仿真实验将本文所提的基于压缩感知的低重频成像算法和文献[3]中的算法进行了比较。仿真参数见表 1,处于仿真操作方便的考虑,且不失仿真的有效性,此处将激光波长选为 $100 \mu\text{m}$,以便降低仿真中的数据量。仿真结果见图 2。图 2(a)为仿真模型的点散布图;图 2(b)为基于文献[3]方法的成像结果,结果进行了幂次为 5 的加权,但由于重频不够,方位向的模糊仍然可以清晰看到。图 2(c)为本文所提算法的成像结果,其中对式(10)是利用凸优化的方法求解的,效果明显。

表 1 仿真实验参数

Tab. 1 Parameter of numerical experiment	
仿真变量	变量值
波长/ μm	100
信号带宽/GHz	1
脉冲宽度/ns	1
目标自旋频率/Hz	15
目标尺寸/m	0.075×0.075
理论 PRF/MHz	2.83
实际 PRF/kHz	283

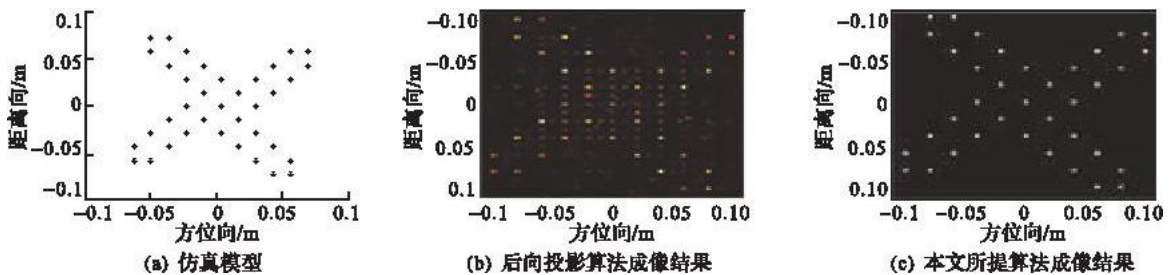


图 2 仿真实验结果

Fig. 2 Result of numerical experiment

4 结束语

本文从 ISAIL 作用距离远、分辨率高的优势出发,提出了采用星载 ISAIL 系统对小尺寸空间碎片目标进行观测的概念,分析了星载 ISAIL 系统空间碎片成像的原理,通过仿真验证了所提算法的有效性和优越性。

但是本算法是以增加对目标的观测时间为代价的,当实际的 PRF 远小于理论的 PRF 时,本文所提算法将面临巨大的运算量,笔者将在下一步的工作中针对此缺陷进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 许楠,鲁伟,刘立人. 合成孔径激光成像雷达中非线性啁啾逐一扫描滤波校正算法的仿真与分析[J]. 光学学报,2008, 29(1): 47-54.
XU Nan, LU Wei, LIU Liren. Simulation of nonlinear - chirp compensation by scan - filtering in SAIL[J]. Acta optica sinica, 2008, 29(1): 47-54. (in Chinese)
- [2] 郭亮. 合成孔径成像激光雷达实验与算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
GUO Liang. Study on experiment and algorithm of synthetic aperture imaging Lidar[D]. Xi'an: Xidian university, 2009. (in

Chinese)

- [3] Sato T. Shape estimation of space debris using single - range doppler Interferometry[J]. IEEE trans on GRS, 1999, 37(2): 1000 - 1005.
- [4] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technical[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2005. (in Chinese)
- [5] 王琦. 空间目标 ISAR 成像的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
WANG Qi. Study of ISAR imaging for space targets[D]. Xi'an: Xidian university, 2007. (in Chinese)
- [6] David L, Donoho. Compressed sensing [J]. IEEE trans on Info theory, 2006, 52(4): 1289 - 1306.
- [7] Matthew A, Herman, Thomas Strohmer. High - resolution radar via compressed sensing [J]. IEEE transactions on signal processing, 2009, 57(6): 2275 - 2284.
- [8] Cands E, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE trans inform theory, 2006, 52(2): 489 - 509.
- [9] Cands E, Tao. Near - optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies [J]. IEEE trans information theory, 2006, 52(12): 5406 - 5425.
- [10] Pati Y C, Rezaiifar R, Krishnaprasad P S. Orthogonal matching pursuit: recursive eunction approximation with applications to wavelet decomposition [C]//Proceedings of the 27th annual asilomar conference in signals systems and computers. Los Alamitos: IEEE press, 1993: 40 - 44.
- [11] Chen S, Donoho D, Saunders M. Atomic decomposition by basis pursuit [J]. SIAM journal sci comput, 1999, 20(1): 33 - 61.

(编辑: 田新华)

Spaceborne ISAIL for Observation of Space Debris

ZANG Bo, CHEN Shi - chao, GUO Rui, TANG Yu, XING Meng - dao

(National Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The imaging principle of spaceborne ISAIL for space debris is analyzed. An imaging algorithm combining compressed sensing with complex inverse Radon transform is proposed to solve the limitation of low Pulse Repetition Frequency (PRF). By using this algorithm, the compact of laser signal modulation on imaging is reduced through reducing the bandwidth at the same time. The imaging experiment with numerical data verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: inverse synthetic aperture imaging lidar; imaging of space debris; spaceborne ISAIL system; low PRF algorithm