

doi: 10.7690/bgzd.2022.09.015

一种基于 CoSaMP 的双基地 ISAR 稀疏孔径机动目标成像方法

胡文华, 朱瀚神, 郭宝锋, 薛东方, 朱常安

(陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 石家庄 050003)

摘要: 针对双基地逆合成孔径雷达稀疏孔径条件下对机动目标成像会发生散焦的问题, 通过建立包含旋转角加速度与旋转初速度的比值 γ 和双基地时变角度的符合目标回波特性的稀疏基, 结合 CoSaMP 算法对稀疏孔径信号进行机动目标的求解成像, 仿真验证了算法的有效性。

关键词: 双基地逆合成孔径雷达; 机动目标; 稀疏孔径; 压缩感知

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

A CoSaMP Based Bistatic ISAR Sparse Aperture Imaging Method for Maneuvering Target

Hu Wenhua, Zhu Hanshen, Guo Baofeng, Xue Dongfang, Zhu Chang'an

(Department of Electronic and Optical Engineering, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the defocusing problem of bistatic inverse synthetic aperture radar (ISAR) for maneuvering target imaging under the condition of sparse aperture, a sparse basis which contains the ratio of rotation angular acceleration to initial rotation velocity and bistatic time-varying angle and meets the characteristics of target echo is established, and the CoSaMP algorithm is combined to solve the maneuvering target imaging of sparse aperture signals. Simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: bistatic ISAR; maneuvering target; sparse aperture; compressed sensing

0 引言

Bi-ISAR 因其收发分置的模式, 在电子战中具有独特优势与潜力, 增强了系统灵活性, 提高了成像概率, 使其在对抗“四大威胁”方面具有天然优势, 成为现代雷达成像技术研究的重要方向^[1]。

Bi-ISAR 回波经过平动补偿后, 转化为转台目标模型^[2], 但是机动目标自身的机动分量使得多普勒频率时变, 对回波使用传统的距离-多普勒 (range-doppler, RD) 算法对成像时会发生散焦。另一方面, 非合作目标姿态不确定性、宽窄带信号交替发射的发射模式, 包括频率捷变技术等情况的存在, 都会使得观测过程中回波缺失造成稀疏孔径^[3]。稀疏孔径下, 包括 RD 算法在内的一些传统成像方法失效, 不能完成高质量的成像。近年来, 随着压缩感知 (compressed sensing, CS) 技术^[4]的发展, 不少学者将压缩感知理论应用到了 ISAR 成像中。该理论可以完成欠采样下的高质量成像, 为实现 Bi-ISAR 稀疏孔径下对机动目标的成像提供可能。

笔者提出一种基于 CoSaMP^[5]的 Bi-ISAR 稀疏孔径机动目标成像算法。首先对平动补偿后的回波

稀疏表示, 利用最小熵对旋转角加速度与旋转初速度的比值 γ 进行估计, 建立含参数 γ 和双基地时变角的稀疏基矩阵, 然后通过 CoSaMP 算法进行图像重构, 得到 2 维目标图像。通过仿真实验验证了算法的有效性。

1 Bi-ISAR 稀疏孔径机动目标成像模型

1.1 Bi-ISAR 机动目标回波模型

以匀加速旋转目标为例, 采用文献[6]所建立的模型, 如图 1 所示。Tr 为发射站, Re 为接收站, L 为雷达基线长度, E 为等效单基地雷达位置。假设目标在空间匀速运动, 速度为 v , 旋转初速度为 ω , 旋转角加速度为 ω' , 成像起始时刻为 t_0 , 目标质心为 O , 双基地角为 β_0 , 以目标质心为原点, 双基地角平分线为 y 轴, 建立右手坐标系 xOy , 散射点 P 在该坐标系中坐标为 (x_p, y_p) , OP 长度为 d , 与 x 轴夹角为 α_0 。在 t_p 时刻, 目标质心平移至 O_p , 坐标系 $x'O_y'$ 是由坐标系 xOy 平移得到, 以 O_p 为原点, 双基地角平分线为 v 轴, 建立右手坐标系 $uO_p v$,

收稿日期: 2022-05-31; 修回日期: 2022-06-23

基金项目: 河北省自然科学基金(F2019506031); 陆军工程大学基础前沿科技创新项目(YSZJQZL2020)

作者简介: 胡文华(1970—), 男, 湖北人, 博士, 副教授, 从事雷达故障检测, 雷达信号处理研究。E-mail: hwhsaq@sina.com。

通信作者: 朱瀚神(1996—), 男, 安徽人, 硕士, 从事雷达成像技术、雷达信号处理研究。E-mail: 352399814@qq.com。

散射点 P 在该坐标系中坐标为 $P_m(x_{p_m}, y_{p_m})$ ， $O_p P$ 与 u 轴夹角为 α_m ，等效单基地雷达的等效转角为 θ_m 。

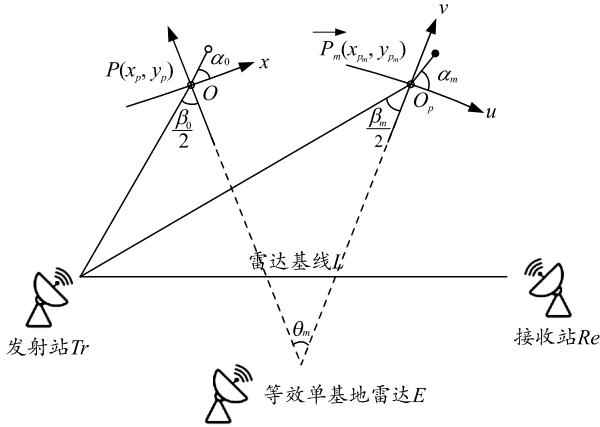


图 1 Bi-ISAR 成像几何模型

雷达通常发射 LFM 信号：

$$s(\hat{t}, t_m) = A \text{rect}(\hat{t}/T_p) \exp[j2\pi(f_c t + \mu t^2/2)] \quad (1)$$

式中： A 为后向散射幅度； $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数且

$$\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & (|u| \leq 0.5) \\ 0 & (|u| > 0.5) \end{cases}; t \text{ 为全时间； } T \text{ 为周期；}$$

$\hat{t} = t - mT$ 为快时间； $t_m = mT$ 为慢时间； $m = 1, 2, \dots, M-1$ ， M 为脉冲总数； T_p 为脉冲宽度； f_c 为载频； μ 为调频率。

回波复包络经过下变频，脉冲压缩后得到目标 1 维距离像(假设回波满足走-停假设^[7])：

$$s(\hat{t}, t) = A \text{sinc}[B(\hat{t} - 2R(t)/c)] \exp[-j4\pi f_c (R(t)/c)] \quad (2)$$

式中： c 为光速； $B = T_p \mu$ 为发射信号带宽； $R(t) = r(t_m) + 2[x_n \sin \Delta \theta(t) + y_n \cos \Delta \theta(t)] \cos(\beta_m/2)$ 为目标上一点 $P(x_n, y_n)$ 距雷达的瞬时距离； $\Delta \theta(t)$ 为成像时间内的累计转角； β_m 为对应 t_m 时刻的双基地角。在旋转角度较小时，可近似认为 $\sin \Delta \theta(t) \approx \Delta \theta(t)$ ， $\cos \Delta \theta(t) \approx 1$ ，而在目标机动情况下， $\Delta \theta(t)$ 由泰勒级数展开为：

$$\Delta \theta(t) = \theta(t) - \theta(t_0) = \omega t + \omega' t^2/2 + o(\omega) \quad (3)$$

式中： t_0 为成像初始时刻； ω 为目标的角速度； ω' 为目标的角加速度。假设距离单元内包含 K 个散射点，将式(3)带入式(2)中可得到信号为：

$$s(\hat{t}, t_m) = \sum_{n=1}^K A_n \text{sinc}\left\{B\left[\hat{t} - (vt + 2(x_n \Delta \theta(t) + y_n) \cos(\beta_m/2))/c\right]\right\} \exp\{-j(4\pi/\lambda)[vt + 2(x_n \Delta \theta(t) + y_n) \cos(\beta_m/2)]\} \quad (4)$$

由上式可以看出，当目标机动飞行时，散射点的多普勒频率会产生时变。正是这个性质导致传统的 RD 算法成像发生散焦，此时的多普勒频率为：

$$f_{\text{doppler}} = (1/2\pi)(d/dt)(4\pi R(t)/\lambda) = 2/\lambda[v + 2x_n(\omega + \omega't)] \cos(\beta/2) \quad (5)$$

1.2 含参数 γ 的匹配稀疏基建立

由式(5)可知，当目标机动飞行时，各散射点多普勒频率是时变的，使用传统的傅里叶基进行成像时，目标回波中的二次项与稀疏基内原子不匹配，使得重构图像发生散焦，成像质量迅速降低，因此需要根据回波特征建立相匹配的稀疏基字典。

文献[8]提出虽然方位向不同散射点的回波具有不同的多普勒频率和调频率，但是旋转角加速度与旋转初速度的比值 $\gamma = \omega'/\omega$ 却仅取决于目标的转动参数，对于所有的散射点都是相同的。利用这一特征，可以构建含参数 γ 的匹配傅立叶字典，与机动旋转目标回波特性相契合，进行高分辨成像。为得到 γ 的估计值，文献[9]提出了一种利用最小熵估计 γ 的方法进行转动参数估计的方法。根据图像聚焦质量越好，熵值越小的原理，建立参数估计的最小熵代价函数，基于拟牛顿的坐标梯度下降法，固定其他参数，依次循环求解代价函数中每一个参数，当算法达到收敛时，可得到最终的估计值 $\hat{\gamma}$ 。

假设一共 Q 个距离单元，以第 q 个距离单元为例构造矩阵代表方位向含参数傅里叶变换字典。 $\Psi(\gamma) = \exp[-j2\pi(1 + \gamma t_m/2)t_m f_d \cos(\beta(t_m)/2)]$ ，其中： $f_d = [-Q/2 : Q/2 - 1] * \Delta f_d$ ， Δf_d 为多普勒分辨率， $Q = f_r / \Delta f_d$ 为多普勒单元数。 $t_m = [1 : M]^T \Delta t_m$ 为方位向慢时间序列， $\Delta t_m = 1/f_r$ ， N 为脉冲数，双基地角可由几何关系得到^[10]。由此建立出含二次项的稀疏基矩阵 F ，该矩阵相比于通常使用的傅里叶矩阵更加符合 Bi-ISAR 机动目标回波特征，仿真验证了其有效性。

1.3 稀疏孔径成像模型

式(4)为方位全孔径信号表达式，前文所提到的实际中的各种问题都会引起雷达方位向回波的缺失，假设 S 为经过平动补偿后的有效孔径回波，其中含有 $K(K < L)$ 个稀疏子孔径，则

$$S_{K \times N} = T_{K \times L} S_{L \times N} = T F_{\text{ALL}} A + \varepsilon = F A + \varepsilon \quad (6)$$

式中： $T_{K \times L}$ 为数据选择矩阵，可以消除 $S_{L \times N}$ 中缺失孔径，合并有效孔径； F_{ALL} 为稀疏基字典； A 为所

求高分辨图像； ϵ 为 $K \times N$ 的复噪声矩阵。

2 基于 CoSaMP 的 Bi-ISAR 成像方法流程

得到参数 $\hat{\gamma}$ 的估计值后，就可以采用重构算法重构式 (4)。CoSaMP 算法是继正交匹配追踪 (orthogonal matching pursuit, OMP) 算法之后提出的一个具有较大影响力的重构算法。相比于 OMP 算法，它每次迭代选择多个原子，并且每次迭代选择的原子在下次迭代中可能会被抛弃^[5]。为实现 Bi-ISAR 稀疏孔径机动目标高分辨成像，采用该算法进行最终的重构，算法流程如图 2 所示，简述如下：

- 1) 对 Bi-ISAR 回波进行脉冲压缩和运动补偿，得到相位校正后的 1 维距离像序列。
- 2) 建立参数估计的最小熵代价函数，基于拟牛顿的坐标梯度下降法，固定其他参数，依次循环求解代价函数中每一个参数，当算法达到收敛时，得到最终的估计值 $\hat{\gamma}$ 。
- 3) 建立含参数 $\hat{\gamma}$ 和时变双基地角的与回波特性相匹配的稀疏基。
- 4) 使用 CoSaMP 算法对信号进行恢复重构得到 Bi-ISAR 图像。

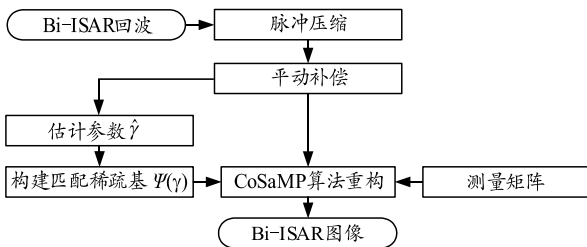


图 2 基于 CoSaMP 算法的 Bi-ISAR 成像流程

3 仿真验证

为说明所建立匹配稀疏基的优越性，仿真背景采用 SNR=10 dB，稀疏孔径为 50% 随机稀疏的条件。Bi-ISAR 稀疏孔径机动目标成像目标散射点模型如图 3(a) 所示，假设双基地基线长度为 60 km，目标在 30 km 的高度以 $v=200$ m/s， $\omega=0.005$ rad/s， $\omega'=0.0005$ rad/s² 的速度从收发雷达距离中值处向有机动，将收发雷达距离中值处作为成像起点，截取 500 个脉冲作为成像数据，该观测时间内累积转角为 1.98°，双基地角变化范围为 (88.05°，89.61°)，稀疏孔径下 RD 成像结果如图 3(b) 所示。仿真参数设置如表 1 所示。

由图 3(b) 可以看出，在稀疏孔径下，使用 RD 算法成像发生了严重的散焦现象。为能得到清晰完

整的 ISAR 机动目标图像，需要根据回波特征建立相匹配的稀疏基字典。图 4 为分别使用 Fourier 稀疏基和匹配稀疏基进行仿真得到的成像结果。

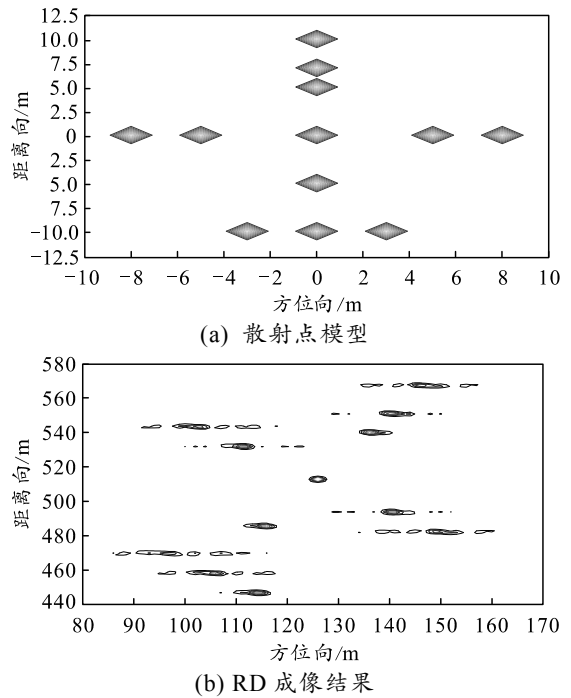


图 3 散射点模型与 RD 算法成像结果

表 1 成像参数

成像参数	值	成像参数	值
载频/GHz	10	脉冲宽度/ μ s	20
带宽/MHz	800	脉冲重复频率/Hz	50
采样率/GHz	1	距离向分辨率/m	0.205 8
成像时间/s	10	方位向分辨率/m	0.194 9

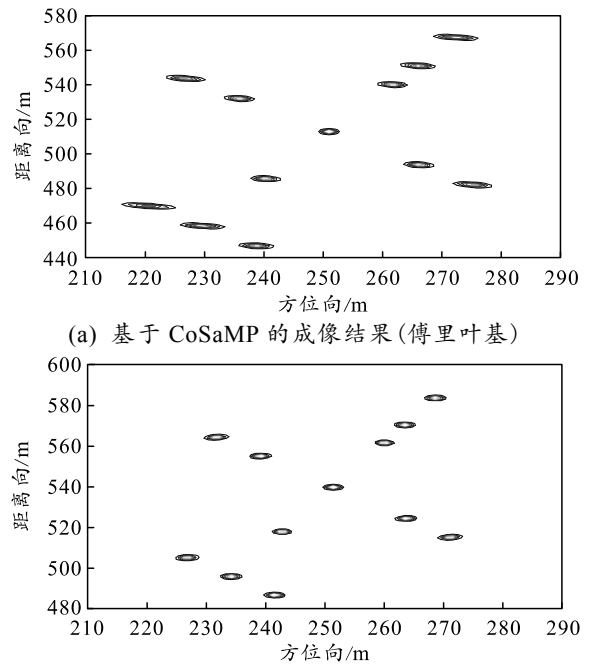


图 4 使用 Fourier 基与匹配稀疏基成像结果

为更直观地说明匹配稀疏基的优越性，采用图像对比度 C 和图像熵 E_n 作为衡量标准。其中，图像对比度可以评价目标图像的整体聚焦质量，值越大越好；熵反映了图像中平均信息量的多少，图像信息熵越小说明其散焦抑制较好，成像质量越好。成像结果指标如表 2 所示。

表 2 成像结果指标

成像指标	Fourier 基	匹配稀疏基
C	29.855 7	35.871 7
熵	4.567 4	1.273 6

由上文结果可以看出，由于目标的非均匀转动，在 Fourier 稀疏基下的 CS 成像出现了被“拉长”的效果，这是由于回波与稀疏基不匹配，多普勒频率仍时变，能量聚焦效果差，发生散焦。而基于本文中方法的机动目标成像效果较好，散射点聚焦清晰，能量汇聚集中， s 成像质量高，成效指标也验证了这一结论，说明了本文中所建立与回波相匹配的稀疏基字典有效提升了成像质量。

4 结束语

笔者通过建立包含旋转角加速度与旋转初速度的比值 γ 和符合双基地时变角度特性的稀疏基，结合 CoSaMP 算法对 Bi-ISAR 稀疏孔径信号进行机动目标的求解成像。在机动目标多普勒频率时变情况下，得到了较为清晰的 Bi-ISAR 图像。仿真结果表明，该算法可在 Bi-ISAR 稀疏孔径情形下完成对机

(上接第 49 页)

5 结束语

笔者搭建基于 Matlab 的仿真平台，并利用等价时延的量化标准对优化模型进行了性能分析。仿真结果表明：该算法能够充分利用 UWB 测距信息和地理信息，实现自主的、有针对性的链路优化。

参考文献：

- [1] 张瑞锋. 车载自组网通信技术研究综述[J]. 汽车工程学报, 2014, 4(2): 79-85.
- [2] 罗龙, 胡凯文, 盛丽, 等. 基于鱼群优化的车载自组网网络路由算法[J]. 电子科技大学学报, 2021, 50(4): 488-495.
- [3] 和何, 李琳琳, 路云飞. 基于车载自组网通信终端和运动信息的容忍时延网络分簇路由算法[J]. 计算机应用, 2018, 38(3): 734-740.

动目标的成像。

参考文献：

- [1] 薛东方, 朱晓秀, 胡文华, 等. 基于加权 l_1 范数优化的双基地 ISAR 稀疏成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(4): 944-953.
- [2] 保铮. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014. 132-146.
- [3] 朱晓秀, 胡文华, 郭宝锋. 基于压缩感知的 ISAR 成像技术综述[J]. 飞航导弹, 2018(3): 84-89.
- [4] DONOHOD L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [5] 王映雪. 压缩感知重构算法研究及 CoSaMP 算法改进[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [6] 朱晓秀, 胡文华, 马俊涛, 等. 双基地角时变下的 ISAR 稀疏孔径自聚焦成像[J]. 航空学报, 2018, 39(8): 238-252.
- [7] LEI Z, SHENG J L, JIA D, et al. Translational motion compensation for ISAR imaging under low SNR by minimum entropy[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013(1): 1-19.
- [8] 李少东, 陈永彬, 杨军, 等. 一种基于压缩感知的机动目标高分辨成像方法[J]. 空军预警学院学报, 2015, 29(5): 313-317.
- [9] 邬俊, 徐刚. ISAR 机动目标联合高分辨成像和参数估计[J]. 信号处理, 2018, 34(11): 1355-1361.
- [10] 郭宝锋, 孙慧贤, 胡文华, 等. 双基地角时变下的 ISAR 等效旋转中心估计[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 198-210.
- [11] 吴志勇. ADHOC 按需带状路由协议的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2006.
- [12] 武春光. 基于流间网络编码的路由与数据分发技术的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [13] 陈妍蓉. 车载自组织网络的链路分析与优化管理[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [14] 伍元胜. 面向动态拓扑网络的深度强化学习路由技术[J]. 电讯技术, 2021, 61(6): 659-665.
- [15] 李鹏飞, 雷迎科. 动态 Ad hoc 网络关键节点识别[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(5): 1473-1475, 1495.
- [16] 陈奎宁. “新三论”的启示—谈耗散结构论、协同论和突变论[J]. 科技导报, 1987, 5(1): 40-42.
- [17] WANG T, ZHANG L, XU D, et al. Novel cooperative navigation method for multi-AUVs based on optimal weightdistribution method[C]//OCEANS, 2017-Anchorage. IEEE, 2017: 1-7.
- [18] 杜国勇. 移动 Ad Hoc 网络分簇算法的研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2013.