

基于多姿态角下一维距离像的雷达目标三维成像

任双桥, 刘永祥, 黎 湘, 庄钊文

(国防科技大学 ATR 国家重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文根据目标散射中心在雷达视线上的几何投影关系, 分析了由多姿态角下一维距离像对雷达目标进行三维成像的基本原理和散射中心关联等技术难点, 提出了基于聚类分析的散射中心关联和三维成像算法. 最后, 本文采用 GTD 散射模型生成的回波数据和暗室测量数据进行成像实验, 验证了该算法具有实现简单、成像效果稳定等优点.

关键词: 聚类分析; 关联; 雷达成像

中图分类号: TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2005)06-1088-03

Radar Target 3 D Imaging Based on Multi-Aspect Range Profiles

REN Shuang qiao, LIU Yong xiang, LI Xiang, ZHUANG Zhao wen

(ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Based on the geometrical projection of scattering center on the line of radar sight, a technique for reconstructing the 3 D distribution of target is performed in the paper, using multiple 1-D range profiles in different aspect angles. After analyzing the principle of 3 D radar imaging and the mechanism for scattering centers association, an associating and imaging method based on clustering analysis is provided. The imaging experiments based on simulation and measurement data are developed, and experimental result shows the validity and robustness of the performed algorithm.

Key words: clustering analysis; association; radar imaging

1 引言

借助高分辨雷达对目标成像, 可以获得目标形状和结构的细节信息, 从而有利于自动目标识别. 近年来, 基于一维距离像的目标识别技术被广泛和深入地研究, 然而, 一维距离像实质上是目标散射中心在雷达视线上的投影分布, 携带的信息不够充分而且敏感于目标姿态变化. 因此, 研究雷达二维或三维成像技术一直是人们所关注的热点^[1,5].

雷达二维成像主要有 SAR 成像、ISAR 成像以及毫米波单脉冲雷达成像. SAR 成像是通过发射宽带信号来达到较高的纵向分辨力, 机载天线通过合成孔径得到优良的横向分辨力^[1]. ISAR 成像是基于目标转台模型的距离-多普勒成像方法, 其纵向分辨依靠雷达发射宽带信号来实现, 横向分辨则利用散射点的多普勒频移而实现^[1]. 毫米波雷达以其波束窄、角度分辨率高、可用带宽大以及器件尺寸小等特点有利于雷达成像^[2].

雷达三维成像技术虽然已有许多研究成果, 但实际应用的并不多, 目前最先取得实际应用效果的是 SAR 干涉测量^[3]. 干涉 SAR 系统是在 SAR 飞行平台上装载两路相互独立的通道, 分别对地面同一区域进行条件苛刻的飞行并通过干

涉处理来获得地面的高度信息.

在硬件实现、成像算法和数据获取等方面, SAR、ISAR 和 INSAR 都有一定的复杂度和难度, 而且通常的成像算法都是在小角度下对目标进行成像, 这些因素在一定程度上限制了其应用范围. 本文在多姿态角下高分辨一维距离像的基础上, 根据雷达视线与目标之间的姿态变化信息, 基于各姿态角下散射中心在雷达视线上的几何投影关系, 实现了对目标二维或三维成像. 在成像过程中较好的解决了散射中心关联这一技术难点, 而且本文提出的成像算法具有代价小、实现简单、成像效果稳定等优点.

2 多姿态角下雷达目标三维成像基本原理

基于几何绕射理论(GTD), 在目标本体坐标系(见图1)中点 (x_l, y_l, z_l) 处的散射电场^[4,6]

$$E_l = D_l(f, \theta, \phi) \exp \left[-j \frac{4\pi f}{c} \mathbf{k} \cdot \mathbf{p}_l \right] \quad (1)$$

其中, c 为光速, f 表示频率, $D_l(f, \theta, \phi)$ 表示电磁绕射系数^[5], $\mathbf{p}_l = (x_l, y_l, z_l)^T$ 表示目标第 l ($1 \leq l \leq L$) 个散射中心的空间位置, θ, ϕ 分别表示雷达观测视线的俯仰角和方位角, $\mathbf{k} = (\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi, \cos\theta)^T$ 是雷达视线在目标本体坐标系

中的单位矢量。

在图 1 中, 矢量 OR 表示雷达的观测视线, 矢量 OA 表示散射中心 A 空间坐标 (x_l, y_l, z_l) , 矢量 OD 为 OA 在 OR 上的投影, 记矢量 OD 的长度为 r_l , 则有

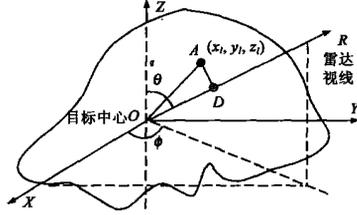


图 1 目标散射中心在雷达视线上的投影

$$r_l = \mathbf{k} \cdot \mathbf{p}_l = x_l \sin\theta \cos\phi + y_l \sin\theta \sin\phi + z_l \cos\theta \quad (2)$$

假设雷达在不同的方向对目标观测了 M 次, 雷达视线的俯仰角和方位角分别记为 $\{(\theta_m, \phi_m)\}_{m=1}^M$, 目标散射中心 A 在不同雷达视线方向上的投影记为 $r_{m,l}$, 且令

$$\mathbf{R}_l = \begin{pmatrix} r_{1,l} \\ r_{2,l} \\ \vdots \\ r_{M,l} \end{pmatrix}, \mathbf{X} = \begin{pmatrix} \sin\theta_1 \cos\phi_1 & \sin\theta_1 \sin\phi_1 & \cos\theta_1 \\ \sin\theta_2 \cos\phi_2 & \sin\theta_2 \sin\phi_2 & \cos\theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin\theta_M \cos\phi_M & \sin\theta_M \sin\phi_M & \cos\theta_M \end{pmatrix}, \mathbf{p}_l = \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{pmatrix} \quad (3)$$

则由式(2)可知

$$\mathbf{R}_l = \mathbf{X} \mathbf{p}_l \quad (4)$$

从而, 由最小二乘原理可得

$$\mathbf{p}_l = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{R}_l \quad (5)$$

基于式(5)便可求得目标所有散射中心的三维空间坐标 $\{(x_l, y_l, z_l)\}_{l=1}^L$, 从而实现了目标散射中心的三维成像, 这里, L 是雷达观测目标的散射中心个数。

3 多姿态角下散射中心的关联与目标成像

3.1 散射中心关联机理分析

通过多个姿态角下的一维距离像来重构目标的三维像, 其原理虽然简单、直观, 但是在实际求解过程中还存在散射中心的关联这一技术难点。在成像之前如果不先进行散射中心的正确关联, 那么在式(4)中, 距离矢量 \mathbf{R}_l 的分量将会发生错乱, 从而导致散射中心的三维分布估计错误。一般情况下, 由于目标和雷达之间存在相对运动, 不同观测角下的各散射中心投影距离的顺序会发生变化, 也即散射中心的走动。通过大量实验发现, 即使相邻观测方向的差别很小, 散射中心距离参数的排列顺序也并非固定不变。特别的, 在某些观测角度下会存在雷达视线被遮挡的情形, 致使有些散射中心无法观测得到。因此, 多姿态角下散射中心的关联是影响成像质量十分重要的一个因素, 只有先经过关联处理才能获得理想的目标三维散射中心分布。

3.2 基于聚类分析的散射中心关联与目标成像

在多个姿态角下, 散射中心关联是目标转台成像过程中十分关键的一个环节。一般来说, 当观测方向较多时, 目标散射中心的关联较难, 计算量较大。考虑到确定一个散射中心的空间位置只须三个方程, 因此, 为了化繁为简, 本文只考虑任意三个不同观测方向上的散射中心关联。从式(4)中任意取出三行, 则有

$$\begin{pmatrix} r_{m,l} \\ r_{n,l} \\ r_{p,l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin\theta_m \cos\phi_m & \sin\theta_m \sin\phi_m & \cos\theta_m \\ \sin\theta_n \cos\phi_n & \sin\theta_n \sin\phi_n & \cos\theta_n \\ \sin\theta_p \cos\phi_p & \sin\theta_p \sin\phi_p & \cos\theta_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{pmatrix} \quad (6)$$

在不考虑散射中心距离参数 $r_{m,l}$ 的估计误差时, 由式(6)

可知, 真实散射中心可通过 C_M^3 个线性方程组求解得到, 而若考虑参数 $r_{m,l}$ 的估计误差时, 这 C_M^3 个方程组的解会集中分布于真实散射点 (x_l, y_l, z_l) 四周。由此, 利用穷举法思想, 考虑任意三个不同观测方向 (θ_m, ϕ_m) 、 (θ_n, ϕ_n) 和 (θ_p, ϕ_p) 上所有散射点之间任意组合, 此时可得 N_l 个方程组

$$\begin{pmatrix} \{r_m\} \\ \{r_n\} \\ \{r_p\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta_m \cos\phi_m & \sin\theta_m \sin\phi_m & \cos\theta_m \\ \sin\theta_n \cos\phi_n & \sin\theta_n \sin\phi_n & \cos\theta_n \\ \sin\theta_p \cos\phi_p & \sin\theta_p \sin\phi_p & \cos\theta_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{x\} \\ \{y\} \\ \{z\} \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中, 序列 $\{r_m\}$ 、 $\{r_n\}$ 和 $\{r_p\}$ 分别表示第 m 、 n 和 p 个观测方向上投影距离集合中的任意一个, $(\{x\}, \{y\}, \{z\})$ 表示(7)中所有方程组的 N_l 个解。若记 $L(\theta_m, \phi_m)$ 为雷达观测方向 (θ_m, ϕ_m) 上散射中心的个数, 则有

$$N_l = \sum_{m=1}^{M-2} \sum_{n=m+1}^{M-1} \sum_{p=n+1}^M L(\theta_m, \phi_m) L(\theta_n, \phi_n) L(\theta_p, \phi_p) \quad (8)$$

显然, 上述 N_l 个交点既包含真实散射点也包含虚假散射点, 但是, 在这些交点中, 大部分的点都集中于几个真实的散射中心的周围, 每一个真实散射点四周会紧密的分布着 C_M^3 个交点, 而对于少数虚假的散射点只会零星的散布在整个区域内。本文正是基于这个重要的特征, 以真假散射点的密集程度作为切入点, 利用统计直方图和聚类分析较好的实现了散射中心关联和目标成像。算法的基本思路就是首先统计 N_l 个交点的样本直方图, 经过阈值化处理后, 散布在空间中的虚假散射中心都将被剔除, 最终保留的只是几个相对独立的点簇, 而每一个点簇的中心就是真实的目标散射中心。为了能从这些点簇中提取散射中心, 本文采用聚类分析中的 C-均值法来实现^[7], 这样就把散射中心关联和成像融为一体同时实现。

总之, 本文提出的多姿态角下雷达目标三维成像算法的流程如下。

STEP1 基于 GTD 模型求解各姿态角下目标散射中心的投影距离、幅度和类型信息。

STEP2 由式(7)求得 N_l 个交点, 统计这 N_l 个交点的样本直方图, 设定一个阈值, 剔除零星的散布在整个空间中的虚假散射中心。

STEP3 利用 C-均值算法提取目标散射中心, 实现对目标散射中心的三维成像。

4 实验及结果分析

本节利用平底圆锥的暗室测量数据来验证本文提出的成像算法性能。目标的结构和尺寸如图 2 所示, 由于目标是轴对称体, 故成像时只需考虑其二维成像(二维与三维成像在原理上是一致的, 其差别仅在于计算量的大小)。雷达的工作频段为 8.75~10.75GHz, 频率采样间隔 $\Delta f = 20\text{MHz}$, 频率采样点数 $N = 101$, 极化方式为 HH 极化, 雷达观测视线的俯仰角 $\theta = 0$, 方位角范围 $\phi = 0 \sim \pi$, 方位角采样间隔 $\Delta\phi = \pi/30$, 方

位角采样点数 $K = 31$.

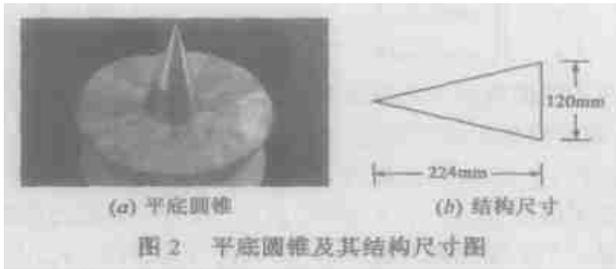


图 2 平底圆锥及其结构尺寸图

另外,本节还对 GTD 模型生成的回波数据进行了三维成像实验,实验中采用高为 2 米、底半径为 0.5 米的圆柱体,此时雷达视线的俯仰角 $\theta = \pi/3$,方位角范围 $\phi = 0 \sim \pi/2$,方位角采样间隔 $\Delta\phi = \pi/30$,方位角采样点数 $K = 16$,成像结果见图 3.

图 3 中的 (a)、(c) 是本文提出的基于聚类分析的成像结果, (b) 是基于 RD 成像算法的结果. 实验结果表明,对于实测数据和 GTD 模型生成的回波数据,本文的成像算法所重构的散射中心分布与目标的结构和尺寸一致,成像结果比较稳定,而对于 RD 成像结果来说,由于方位分辨率的限制(小角度成像)而无法得出散射中心的真实分布. 因此,本文的成像算法相对于 RD 成像算法来说,其实质上是

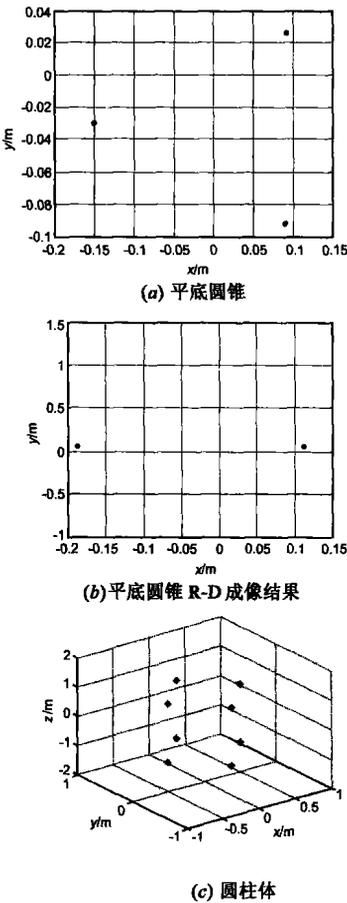


图 3 平底圆锥和圆柱体的成像结果

5 结论

雷达成像是获取目标形状和结构信息的有效途径,相对一维距离像而言,雷达目标二维或三维像提供了更加丰富和稳定的信息,为自动目标识别创造了更有利的条件. 本文基于多姿态角下一维距离像来重构目标散射中心的三维分布,通过分析关联机理,利用聚类分析较好的实现了散射中心关

联和目标成像. 实验中利用实测数据和 GTD 模型生成的回波数据进行成像,成像结果验证了算法的有效性和稳健性.

参考文献:

[1] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.

[2] 刘峥, 张守宏. 毫米波单脉冲雷达目标二维结构成像方法[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(3): 281- 285.

[3] 吴一戎, 朱敏慧. 合成孔径雷达技术的发展现状与趋势[J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(2): 121- 123.

[4] J T Mayhan, M L Burrows. High resolution 3D " Snapshot " ISAR imaging and feature extraction[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2): 630- 640.

[5] D A Ausheman, A Kozma, J L Walker, H M Jones, E C Poggio. Development in radar imaging[J]. IEEE Trans on AES, 1984, 20(4): 363- 399.

[6] J B Keller. Geometrical theory of diffraction[J]. Journal Optical Society, 1962, 52(9): 116- 130.

[7] 孙即祥. 现代模式识别[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.

作者简介:



任双桥 男, 1977 年 12 月生于湖南望城, 2000 年本科毕业于国防科大应用数学专业, 2003 年硕士毕业于国防科技大学获得系统工程. 现在正攻读国防科大自动目标识别与模糊工程专业的博士学位. 主要研究方向为一维距离像识别和雷达二维成像技术. E-mail: shuangqiaoat@yahoo.com.cn.



刘永祥 男, 1976 年 10 生于河北唐山, 1999 年获国防科技大学通信工程专业学士学位, 2004 年获国防科技大学信息与通信工程博士学位. 目前主要从事信息融合、雷达目标识别的研究工作, 已发表学术论文 10 余篇.



黎湘 男, 1967 年生, 博士, 副教授, 已发表学术论文二十余篇. 目前主要从事精确制导、信息融合、非线性信号处理等领域的研究工作.