

# 基于 ISAR 成像的目标大角度 RCS 外推

闫伟<sup>1</sup>,杜卫民<sup>1</sup>,董群锋<sup>1,2</sup>,许家栋<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学电子信息学院,陕西 西安 710129;

2. 咸阳师范学院电波传播与散射研究所,陕西 咸阳 712000)

**摘要:**传统逆合成孔径雷达(ISAR)转台成像算法对目标进行成像后只能外推小角度区域雷达散射截面(RCS)。针对这一问题,建立了大转角转台成像系统,提出了一种基于近场微波成像的 RCS 外推算法,分析了近场大转角转动带来的越距离单元徙动问题。通过将距离与方位域解耦,并对方位方向进行圆周卷积运算,得到高质量的目标成像,进而可以外推目标 360 度方位的 RCS,并与传统 ISAR 小角度成像算法进行比对。仿真结果表明,外推算法不仅可以对目标进行成像,诊断目标的强散射点位置,还可以用来做远区 RCS 大角度外推,并结合成像结果分析目标散射机理。

**关键词:**逆合成孔径雷达;大转角目标;雷达散射截面外推;散射问题

**中图分类号:**TN957 **文献标识码:**B

## RCS Computation Technique Based on ISAR Imaging for Large Angular Rotation Problem

YAN Wei<sup>1</sup>, Du Wei-min<sup>1</sup>, DONG Qun-feng<sup>1,2</sup>, XU Jia-dong<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnic University, Xi'an Shanxi 710129, China;

2. Institute of Radio Wave Propagation & Scattering; Xianyang Normal University, Xianyang Shanxi 712000, China)

**ABSTRACT:** In this paper, a radar cross section (RCS) extrapolation method was proposed based on inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging system with large angular rotation. It can solve the problem that the ISAR system can not deal with the small angle rotation problem to acquire the RCS. The range cell migration problem caused by large angle rotation was also considered. The proposed system was accomplished by decoupling the green function to range direction and azimuth direction. In azimuth direction, the convolution method was used to obtain the accurate images rapidly. Then, the images were used for RCS extrapolation over 360 degree. The proposed method is testified by simulation results. The results show that the proposed method can be used to acquire high resolution image which can be used for high quality RCS extrapolation.

**KEYWORDS:** Inverse synthetic aperture radar (ISAR); Large angular rotation; Radar cross section (RCS) extrapolation; Scattering problem

### 1 引言

雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)是反映目标散射特征的重要参数,对于飞机、导弹以及军事目标隐身性能具有重要的意义<sup>[1]-[2]</sup>。目标 RCS 特性一般是通过仿真软件对实物进行建模,然后进行仿真。然而,当频率处于微波波段时,目标的电尺寸通常会有几十个甚至上百个波长,要计算目标的 RCS,剖分的网格会很多,仿真软件计算时间会

很长,很难工程上实现。

在微波波段,由于目标各个散射点的相互影响减弱,目标可以看做是点散射模型,因此,只要知道了目标的散射点分布,就可以外推目标的 RCS。目前,外推目标 RCS 的方法主要是通过逆合成孔径雷达(ISAR)小角度转动进行成像,从而得到目标的散射点分布并外推 RCS<sup>[3]-[7]</sup>。对于 ISAR 小角度转动成像来说,只要目标转动引起的距离徙动不超过一个距离单元,那么可以采用直接 FFT 法对测量的数据做二维傅里叶变换。但是,由于直接 FFT 法只能应用于很小的转角,这样使得像方位分辨率下降,难得到高质量的像,并且外推 RCS 的角度范围很小。

基金项目:国家自然科学基金(61102018);陕西省教育厅专项科研项目(2010JK891)

收稿日期:2011-11-26

本文给出了一种基于 ISAR 大角度转动的高分辨成像算法,并用其进行了大角度 RCS 外推,结果表明,该算法的成像分辨率由于传统的 ISAR 成像,外推 RCS 的精度较高。

## 2 系统几何模型

系统的模型如图 1 所示,  $O$  是转台中心,  $\theta$  是转台相对于初始位置的转角。目标相对于转台中心的位置是  $(\rho, \phi)$ , 反射率系数为  $\gamma(\rho, \phi)$ , 随着转台绕  $z$  轴转动。发射天线与接收天线放置在距离目标为  $R_0$  的位置, 由于两天线放置的很近, 因此双站角很小, 可以近似认为是单站系统。发射信号是频率步进信号, 通过接收天线来获得目标的回波信号并进行数据处理。

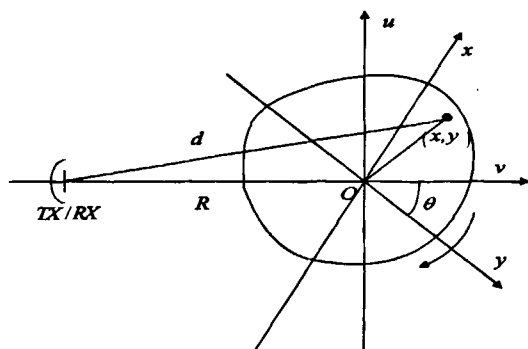


图 1 目标的几何模型

对于转台目标, 转台的转动等同于目标不动, 而天线绕着目标转动, 因此, 天线与目标的距离可以表示为

$$d = \sqrt{R^2 + \rho^2 + 2R\rho\cos(\phi - \theta)} \quad (1)$$

假定发射信号是步进频率信号, 那么回波信号可以表示为

$$E_r(f, \theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \psi(\rho, \phi) G(\rho, \phi; f, \theta) \rho d\rho d\phi \quad (2)$$

其中  $G(\rho, \phi; f, \theta, z')$  是近场空间传播的格林函数, 考虑到该格林函数的幅度项是缓变的, 故可以表达为

$$G(\rho, \phi; f, \theta) = e^{-j2kd} \quad (3)$$

由于目标的回波信号是随着频率、角度变化的, 为了得到目标的二维像, 需要对目标回波进行处理, 提取出目标的散射点信息。

## 3 成像及 RCS 外推算法分析

目标的反射率分布可以表示为对于转动目标, 小角度转动也可以进行成像, 但是由于相干积累时间短, 因此分辨率很差。要获得高的分辨率, 需要合成较大的孔径, 即目标的大转角成像。但是大转角成像带来的问题就是散射中心出现越距离单元徙动, 如果仍利用小角度成像的算法, 得到的目标像会出现散焦。为了解决这一问题, 这里给出了一种在极坐标系下将目标转角精确匹配的方法, 从而避免了大角度

转动带来的越距离单元徙动问题。

目标的散射中心由式(2)可以得出

$$\psi(\rho, \phi) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E_r(f, \theta) e^{j2k[\rho, \sqrt{R^2 + \rho^2 + 2R\rho\cos(\phi - \theta)}]} f df d\theta \quad (4)$$

式(4)内部的二重积分可以变换为

$$\psi(\rho, \phi) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(f, \phi) f df \quad (5)$$

其中

$$\psi(f, \phi) = \int_0^{2\pi} E_r(f, \theta) e^{j2k[\rho, \sqrt{R^2 + \rho^2 + 2R\rho\cos(\phi - \theta)}]} d\theta \quad (6)$$

令近场聚焦因子  $\zeta(f, \theta; \rho, \phi) = e^{j2k[\rho, \sqrt{R^2 + \rho^2 + 2R\rho\cos(\phi - \theta)}]}$ , 那么该聚焦因子可以同时表示为  $\zeta(f, \theta - \phi, \rho)$ 。因此式(6)内部的角度积分可以表示为散射电场  $E_r(f, \theta)$  与近场聚焦因子  $\zeta(f, \theta - \phi, \rho)$  卷积的形式于是目标的反射率分布可以表示为

$$\begin{aligned} \psi(f, \phi) &= E_r(f, \theta) * e^{j2k[\rho, \sqrt{R^2 + \rho^2 + 2R\rho\cos(\phi - \theta)}]} \\ &= E_r(f, \theta) * \zeta(f, \phi, \rho) \end{aligned} \quad (7)$$

在得到目标的散射分布以后, 目标远区 RCS 是所有散射点的贡献和, 可以表示为

$$RCS(f, \theta') = \left| \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \gamma(\rho, \phi) e^{j2k\rho\cos(\phi - \theta')} \rho d\rho d\phi \right|^2 \quad (8)$$

要想对目标的散射中心进行分析, 可以在极坐标系  $\gamma(\rho, \phi)$  的基础上进行二维内插, 从而得到直角坐标系下目标的散射点分布  $\gamma(x, y)$ 。但是在外推的过程中, 为了避免二维内插过程中出现的插值误差, 最好采用极坐标系下目标的二维像  $\gamma(\rho, \phi)$ 。

## 4 成像分辨率讨论

对于 ISAR 成像, 大转角转动与小角度转动合成的孔径不同, 因此对应的分辨率不同。小角度成像的方位分辨率通常是通过  $\delta\gamma = \lambda/\Delta\theta$  来定义, 但是该分辨率公式并没有考虑转动带来的距离弯曲效应, 仅仅是将转动合成的孔径等效为一条直线孔径来进行定义的。对于大转角转动, 成像的合成孔径为一个圆周孔径, 因此很难利用合成孔径分辨率的原理来进行简单的推导。

反映目标成像能否进行分辨的特征是分析目标的点扩散函数, 然后通过点扩散函数的 3dB 带宽来分析大转角成像的分辨率。由于频率的范围是从  $f_{\min}$  到  $f_{\max}$ , 因此目标的空间频率  $k_\rho = 2\pi f/c$  在区间  $[k_{\rho_{\min}}, k_{\rho_{\max}}]$  内, 假定目标位于坐标零点且为 360 度转动时, 点扩散函数可以表示为<sup>[4]</sup>

$$PSF(x, y) = k_{\rho_{\max}} \frac{J_1(\rho k_{\rho_{\max}})}{\rho} - k_{\rho_{\min}} \frac{J_1(\rho k_{\rho_{\min}})}{\rho} \quad (14)$$

其中  $J_1$  是第一类 Bessel 函数。对于不同的频率带宽, 其分辨率随之改变。

## 5 仿真结果

### 5.1 简单目标仿真

假定两个等幅度的点目标分别位于  $(0.5, 0)$  以及  $(0, 0)$ 。

5), 天线与转台中心的位置为 3m, 频率范围为 8-12GHz, 采样点数为 401 个, 转台转过的角度为 360 度, 角度的采样间隔为 361 个。为了验证本文的算法, 分别用本文的大转角 ISAR 成像算法与传统的 ISAR 成像算法进行了比较。图 2(a) 是 ISAR 小转角成像的结果, 两个散射中心从图中可以看出, 但是由于分辨的限制, 目标的主瓣较宽, 约为 0.05m。图 2(b) 是用本文算法成像的结果, 从图中可以看出, 成像后目标的主瓣较窄, 分辨率较高, 大约为 0.01m, 且目标点的幅度信息与原始模型吻合较好。图 2(c) 为用本文成像结果外推后得到的目标 RCS, 其在 360 度方位上都与理论值吻合较好, 外推的平均误差小于 0.5dB, 而传统的小角度 ISAR 成像外推的结果只有在几度范围内与理论值吻合较好, 如文献[3]和[6]所示。

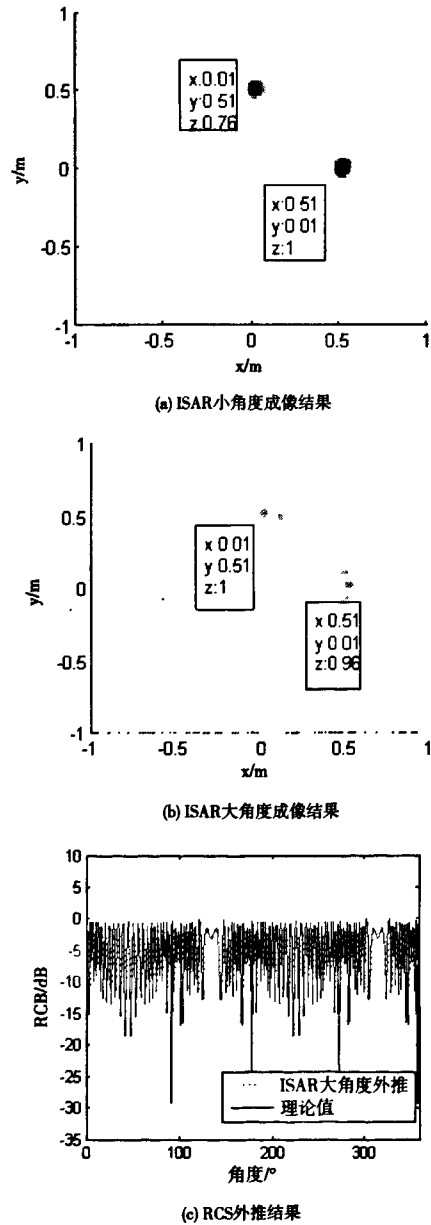


图2 成像及 RCS 外推结果

## 5.2 复杂目标仿真

为了进一步验证算法的有效性, 这里采用了五个不同反射率分布的目标, 如图 3 所示。天线与转台中心的位置为 2m, 频率范围为 8-12GHz, 采样点数为 401 个, 转台转过的角度为 360 度, 角度的采样间隔为 1201 个。

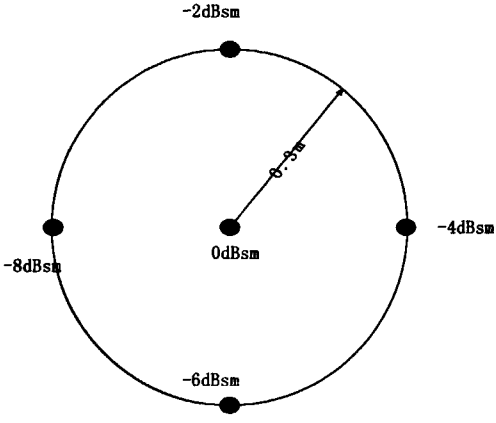


图3 目标的几何模型

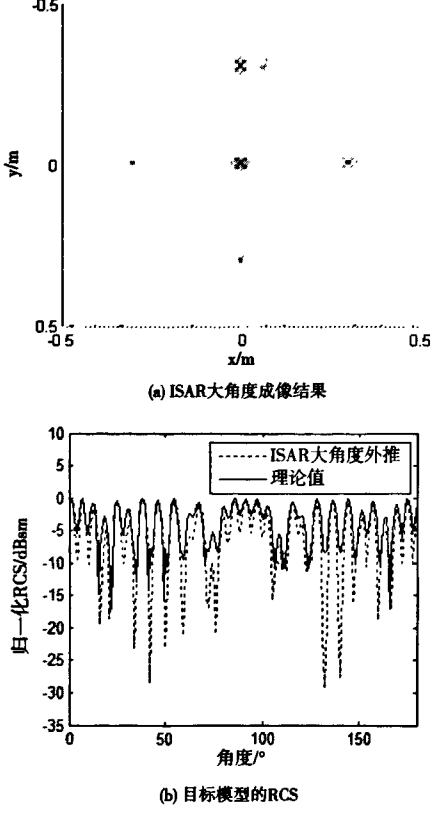


图4 成像并外推 RCS 的结果

用本文的大转角 ISAR 成像算法对目标进行了成像, 如图 4(a) 所示, 成像结果的目标位置与幅度信息与目标模型基本一致, 但是成像后的目标会有旁瓣, 对于某些强散射点附近的弱散射点识别会产生一定的干扰, (下转第 54 页)

- [22] Anthony Colozza, James L Dolce. High - Altitude, Long - Endurance Airships for Coastal Surveillance[R]. NASA/TM - 2005 - 213427, 2005.
- [23] Anthony Colozza. Initial Feasibility Assessment of a High Altitude Long Endurance Airship [R]. NASA/CR - 2003 - 212724, 2003.
- [24] D E Goldberg. Genetic Algorithms on Search, Optimization and Machine Learning[M]. Addison - Wesley, 1989.
- [25] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [26] 王全保, 陈吉安, 段登平, 付功义. 平流层飞艇外形的设计优化[J]. 计算机仿真, 2010, 27(9): 43 - 47.
- [27] T S Kanikdale, A G Marathe, R S Pant. Multidisciplinary Optimization of Airship Envelope Shape [C]. 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, New York, 2004.
- [28] Sagar M Kale, Pankaj Joshi, Rajkumar S Pant. A Generic Methodology For Determination Of Drag Coefficient Of An Aerostat

Envelope Using CFD[C]. 5th AIAA/ATIO and 16th Lighter - Than - Air Systems Technology Conference and Balloon Systems Conference, USA, 2005.

- [29] C Vijay Ram, Rajkumar S Pant. Multi - disciplinary Shape Optimization of Aerostat Envelopes[C]. 7th AIAA/ATIO Conference and 17th Lighter - Than - Air Technology Convention, UK, 2007.

#### [作者简介]



杨燕初(1982 -), 男(汉族), 河南郑州市人, 工程师, 博士研究生, 主要研究领域为浮空飞行器总体与结构。

王生(1964 -), 男(汉族), 河北人, 研究员, 博士研究生导师, 主要研究领域为飞行器总体设计、结构与机构分析设计和试验研究。

顾逸东(1946 -), 男(汉族), 上海人, 中国科学院院士, 博士研究生导师, 主要研究领域为飞行器总体设计。

李英堂(1973 -), 男(汉族), 河南人, 工程师, 博士, 主要研究领域为航空器气动优化设计与计算机仿真分析。

#### (上接第37页)

可以通过加窗来降低旁瓣。图4(b)是本文算法外推 RCS 的结果, 从中可以得出, 外推以后的 RCS 在大部分角度上吻合的较好, 但是在某些 RCS 谷点的角度上, 外推得到的 RCS 在幅度上较理论值偏低, 这是由于近场成像以后副瓣引起的能量泄露。

## 6 结论

本文在传统 ISAR 成像的基础上, 同时利用目标大转角信息, 给出了高分辨率的目标二维成像系统, 并利用成像结果进行目标的 RCS 外推。仿真结果表明该算法可以对目标可以进行高分辨率的二维成像并精确外推目标的 RCS。目标高分辨成像以及 RCS 外推可以用于分析隐身性能, 具有很强的工程及军事应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] 胡楚锋. 雷达目标 RCS 测试系统及微波成像诊断技术研究[D]. 西北工业大学硕士论文, 2007.
- [3] 李南京, 胡楚锋, 张麟兮, 许家栋. 球面波环式散射远近场变换算法研究[J]. 电波科学学报, 2009, 1: 39 - 42.
- [4] W Yan, J D Xu, N J Li and W Tan. A Novel Fast Near - field Electromagnetic Imaging Method for Full Rotation Problem[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2011, 120: 387 - 401.

- [5] T Vaupel and T F Eibert. Comparison and Application of Near - Field ISAR Imaging Techniques for Far - Field Radar Cross Section Determination[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(1): 144 - 151.

- [6] Li Shiyong, Zhu Bocheng, Sun Houjun. NUFFT - Based Near - Field Imaging Technique for Far - Field Radar Cross Section Calculation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 550 - 553.

- [7] K J Nicholson and C H Wang. Improved Near - Field Radar Cross - Section Measurement Technique[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 1103 - 1109.

#### [作者简介]



高群(1984 -), 男(汉族), 山西省柳林县人, 博士研究生, 主要研究领域为 ISAR 大角度成像, SAR 成像算法, 目标散射特性, 近远场 RCS 外推。

杜卫民(1977 -), 男(汉族), 河南人, 博士研究生, 主要研究领域为散射计算, 宽带天线设计, 可重构

天线。

董群峰(1978 -), 男(汉族), 陕西人, 博士研究生, 主要研究领域为电磁测量, 雷达系统, 天线技术。

许家栋(1948 -), 男(汉族), 安徽人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究领域为电磁测量与雷达, 天线技术, 电子对抗。

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 ( Radar Cross Section, 简称 RCS ) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

### 更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>