

文章编号: 2095-4980(2014)01-0019-05

基于 0.14 THz 成像雷达的 RCS 测量

江 舸^a, 成彬彬^{a,b}, 张 健^{a,b}

(中国工程物理研究院 a. 电子工程研究所; b. 太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 介绍了一种在菲涅耳区测量雷达散射截面(RCS)的方法。通过近-远场变换, 利用目标的一维距离像、二维逆合成孔径雷达(ISAR)像数据估计目标 RCS, 避免了太赫兹(THz)频段 RCS 测量不容易满足远场条件的困难。采用强散射点提取技术剔除支架等背景噪声对测量结果的影响, 提高了 RCS 估计精确度。利用该方法对 0.14 THz 雷达缩比测量数据进行处理, 获得了典型目标在 P 波段的 RCS 估计值。

关键词: 太赫兹; 雷达散射截面; 近-远场变换; 雷达成像; 缩比测量

中图分类号: TN957.52

献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201401.0019

0.14 THz radar imaging based Radar Cross Section measurement

JIANG Ge^a, CHENG Bin-bin^{a,b}, ZHANG Jian^{a,b}

(a. Institute of Electronic Engineering; b. Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Customary Radar Cross Section(RCS) measurement using far-field or compact ranges is limited due to an increasing difficulty to produce plane wave illumination as the frequency grows higher. An image-based technology for predicting far-field RCS from monostatic near-field measurement is developed. Furthermore, RCS estimation accuracy is improved by decreasing the background noise of the target zone, such as trestle table. At last, sample data sets of 0.14 THz target echo are collected to produce P-band RCS of aircraft carrier.

Key words: Terahertz; Radar Cross Sector; near field to far field transformation; radar imaging; scale-model measurement

对太赫兹波雷达散射截面(RCS)进行准确测量^[1-3]是开展太赫兹雷达、遥感和成像等应用研究的基础。由雷达散射截面的理论定义式可知, 为了消除探测距离 R 对 RCS 的影响, 在其定义中给出了 R 趋近无穷大的极限条件。在实际测量中, 人们规定了最常用的标准远场条件:

$$R \geq 2d^2/\lambda \quad (1)$$

从式(1)可知, 对于尺寸 d 为 1 m 的目标及波长 λ 为 2 mm 的入射波来说, 其距离需大于 1 km 才满足远场条件。为缩减 RCS 测量距离, 一种方法是紧缩场技术^[4-6], 采用偏馈抛物面(或透镜)将球面波转化为局部的平面波, 避开了在远场测量中天线与测试区之间长距离的缺点; 另一种办法是利用菲涅耳区目标散射测量数据外推远场目标 RCS。从 20 世纪 90 年代至今, 建立菲涅耳区散射和远场区散射之间的关系及进行相应的误差评估和修正引起了国内外许多学者的关注。如, 通过卷积算法外推菲涅耳区至远场区 RCS^[7]; 利用基于物理光学近似的加权傅里叶变换外推远场 RCS^[8]; 利用平面波近场扫描技术实现 RCS 测量^[9]。此外, 基于合成孔径成像的 RCS 外推技术^[10-12]具有小转角、二维像等优点, 其相位和幅度近似误差更低。

在进行 RCS 测量时, 要求背景噪声足够低才能准确而有效地测出目标自身的回波信号。如果背景噪声太高, 或者被测目标的 RCS 很低, 将严重影响测量精确度。背景噪声包括目标以外所有进入接收机的外来干扰信号, 如环境噪声、收发天线耦合、墙、地多径回波、支架等。其中, 支架是重要的背景噪声来源, 它的回波在距离上和目标回波相同, 不能采用距离波门选通技术来消除支架的散射。本文基于散射中心模型, 使用二次辐射概念, 经高频近似, 将目标的 RCS 看作是若干个散射点或散射源发出的散射信号经矢量合成的结果。通过目标在菲涅耳区 ISAR 图像提取精确的散射源位置和幅度, 把一个电大尺寸目标的菲涅耳区散射问题变成了小面单元的远场

散射积分问题,克服了 THz 频段 RCS 测量不容易满足远场条件的困难。并采用 CLEAN 算法提取支架的散射点位置和幅度等参数,通过算法消除其对 RCS 测量的影响。在 0.14 THz ISAR 成像雷达实验平台上,由菲涅耳区测量结果估计出某典型目标 RCS 值。

1 基于 CLEAN 算法的 THz ISAR 图像外推目标 RCS 技术

CLEAN 算法最初是在射电天文学的研究中提出来的,后来人们把它推广应用到相干的辐射场,如雷达照射目标后的回波,主要用来抑制旁瓣,减少图像伪影,增加目标动态范围等。CLEAN 算法是一种迭代算法,其步骤如下^[13]:

- 1) 对成像系统的二维频谱进行二维逆 Fourier 变换得到原始图像;
- 2) 找出图像中幅度的最大点,即最强的散射点;
- 3) 确定该散射点的位置、幅度和相位;
- 4) 将散射点看作是点扩展函数,利用幅度、相位及位置信息重构该散射点的散射场;
- 5) 从原始采样数据中减去该散射点所产生的散射场得到新的数据;
- 6) 找出新的数据所对应的图像中幅度的最大点;
- 7) 依次类推,直到剩下的图像中的最大幅度小于一定的门限为止。

理论计算和实验测量均表明,雷达目标通常可以看成是某些局部位置上离散点的集合,这些局部性的散射点通常被称为等效散射中心或散射中心模型。散射中心模型遵守几何绕射理论,该理论是严格的麦克斯韦方程的“高频”近似。在高频区,当一个电大尺寸目标被照射时,它的总散射场可以看作是若干个散射点或散射源发出的散射信号经矢量合成的结果^[14]。由于太赫兹波比微波的频率更高,高频近似结果更加精确,因此在太赫兹频段采用 ISAR 图像剔除支架等背景噪声并外推目标 RCS 是恰当的。

2 基于 0.14 THz 成像雷达的 RCS 测量系统

RCS 测量采用中物院研制的 0.14 THz 极高分辨力雷达成像系统^[15],调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)体制,带宽为 5 GHz,中心频率为 139.9 GHz,峰值功率不大于 0.5 mW。该雷达系统的原理框图见图 1。为确保雷达所需的频率、相位、幅度具有瞬时线性可调性,太赫兹源及探测器均采用半导体固态器件实现。

在发射链端,Ka 波段频率源经隔离、有源倍频、放大和滤波输出 V 波段的本振信号,通过谐波混频器将基带信号上变频至 140 GHz,从喇叭天线发射出去,输出功率约为 0 dBm。其中,基带为 $5.5 \text{ GHz} \pm 2.5 \text{ GHz}$ 的线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号,本振信号频率为 67.2 GHz。

在接收链端,目标雷达回波由天线接收经 D 波段低噪声放大器由谐波混频器下变频至中频。该下变频回波信号与 AWG 7122B 产生的 LFM 信号相似,其差别是回波信号中包含了由于飞行时间引入的时延,可采用混频器进行去斜处理得到中频信号。信号处理部分采用 250 MHz ADC 对中频信号进行采样,由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)实现下变频、滤波、降采样,并将降采样后的信号通过光纤传给计算机。计算机既可以利用高性能图形处理器进行实时成像,又可以将数据写入硬盘进行事后分析。

3 RCS 缩比测量实验

实验中将航母 1:720 缩比模型放置于转台上沿垂直方向旋转,发射链与接收链平放于桌面上距转台约 2.7 m,目标大小与测试距离基本满足菲涅耳区条件,系统参数见表 1,实验场景见图 2。

表 1 成像实验参数表

Table 1 Test parameters of imaging system

| RF frequency/THz | signal mode | pulse width/ μs | band width/GHz | PRT/ms | angle velocity of rotor/($^{\circ}$ /s) |
|------------------|-------------|----------------------------|----------------|--------|--|
| 0.14 | LFM | 100 | 5 | 1 | 2.5 |

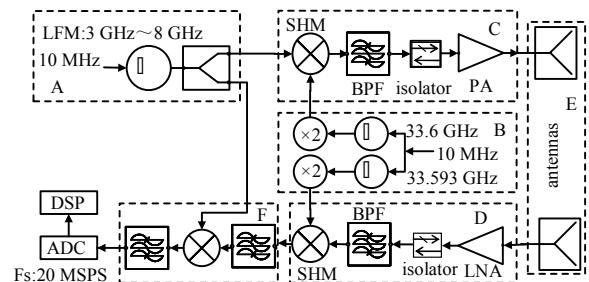


Fig.1 Block diagram of 0.14 THz inverse synthetic aperture radar

图 1 0.14 THz ISAR 成像雷达系统原理框图

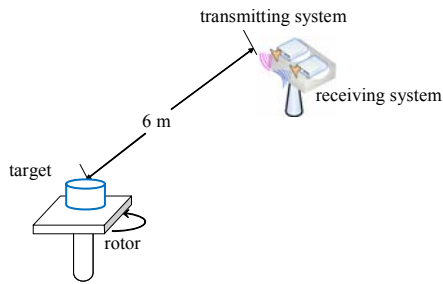


Fig.2 Scene view of scale model imaging with 0.14 THz ISAR
图 2 0.14 THz 雷达成像实验场景

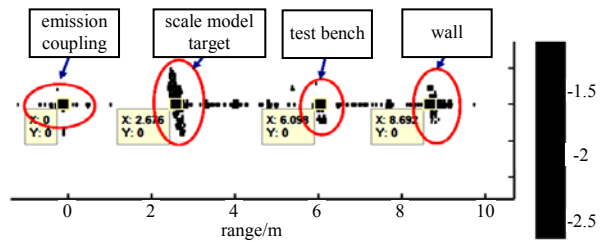


Fig.3 Imaging results after calibration
图 3 校正后的成像结果

由于该系统的带宽非常宽，系统非线性将严重影响雷达分辨力，需对采集信号进行非线性失真校正^[16]以保证系统的分辨力。经非线性失真校正后成像结果见图 3。图中，坐标系原点附近的的目标为收发天线的耦合信号，2.7 m 处的目标为航母缩比模型回波信号，6 m 和 8.6 m 处的目标分别为桌角和墙面的散射回波信号。

为消除收发天线的耦合、墙面等背景噪声对目标 RCS 测量精确度的影响，可采用选择距离的方法剔除。但由于支架和目标在距离上相互重叠，因此无法从距离上剔除。进一步分析，2.6 m 区域的 0° 到 450° 一维距离像见图 4，横坐标为目标观测角度，纵坐标为雷达距离向。图中一簇不同深浅的正弦曲线由测量目标产生，还有一簇直线由支架产生。目标二维成像结果见图 5，图中可明显看到支架的强散射点。目前，在高频频段为减小支架散射常采用低散射、高强度的尖劈状支架。但由于本实验未采用该种支架，因此采用第 2 节介绍的方法通过算法减小其对目标 RCS 测量精确度的影响。

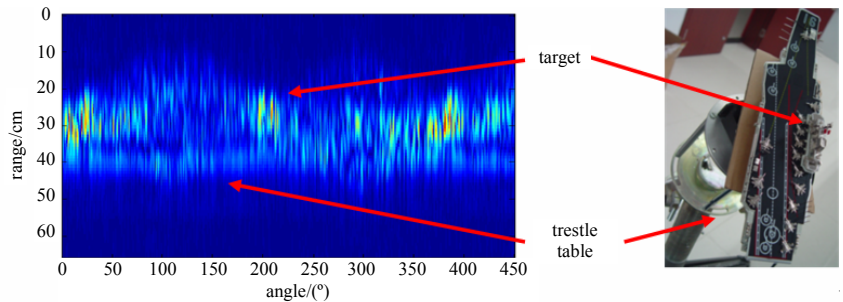


Fig.4 Range profiles image of the aircraft carrier scale model
图 4 航母模型的一维距离像

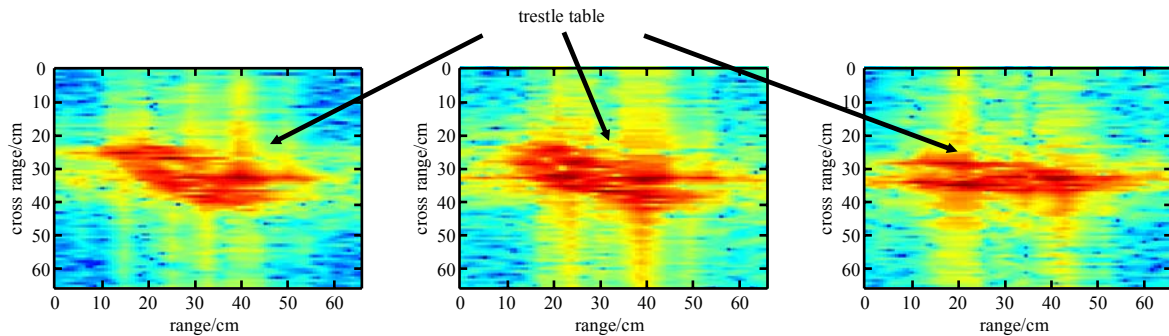


Fig.5 ISAR image of the aircraft carrier scale model
图 5 航母模型的二维 ISAR 像

通过算法消除支架散射回波信号后一维距离像如图 6 所示，目标二维成像结果如图 7 所示，图中可明显看到支架的强散射点已经被削弱。图 8 为在 0.14 THz 条件下俯仰角为 0°时，测量的航母 1:720 缩比模型的 RCS 随方位角的变化曲线，图中船尾为 0°，船头为 180°。

在缩比实验中，采用 RCS 为 $\sigma_0 = -11.5 \text{ dBsm}^2$ 的标校球作为定标体。将缩比模型目标和定标体轮换置于同一距离上，在不改变测量参数的情况下分别测得接收功率为 P 和 P_0 ，则缩比模型的 RCS 为 $\sigma = P\sigma_0/P_0$ 。按缩比规律，其工作波长相当于 1.54 m(195 MHz)，全尺寸目标 RCS 值应相应增加 57 dB。由于缩比测量仅能解决理想导电目标的电磁缩比关系，有关非均匀介质和磁性材料目标的电磁模型缩比理论尚在研究中，因此该方法获得

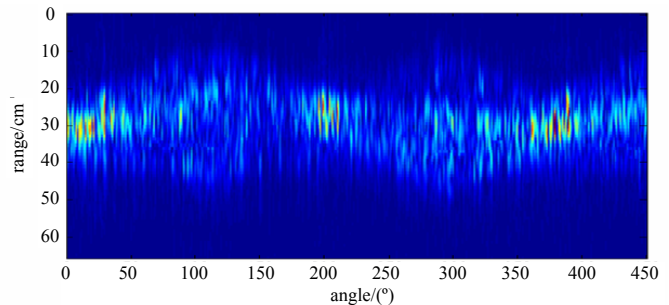


Fig.6 Range profiles image after removing the trestle table
图 6 消除支架散射后的一维距离像

的目标 RCS 数据的精确度还有待通过其他方法验证。

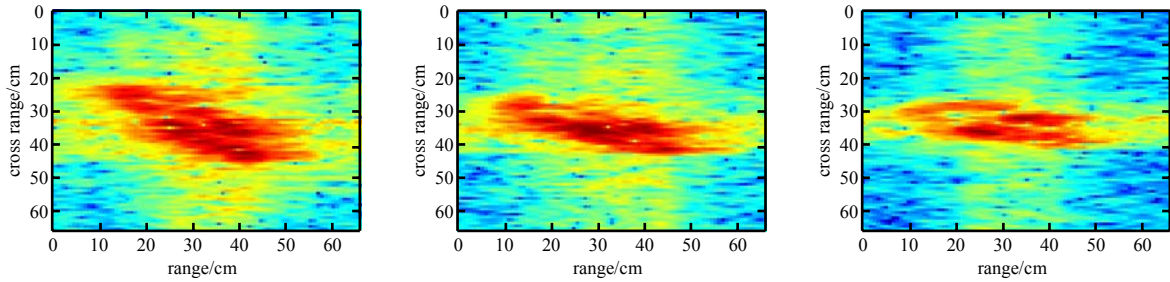


Fig.7 ISAR image after removing the trestle table
图 7 消除支架散射后的二维 ISAR 像

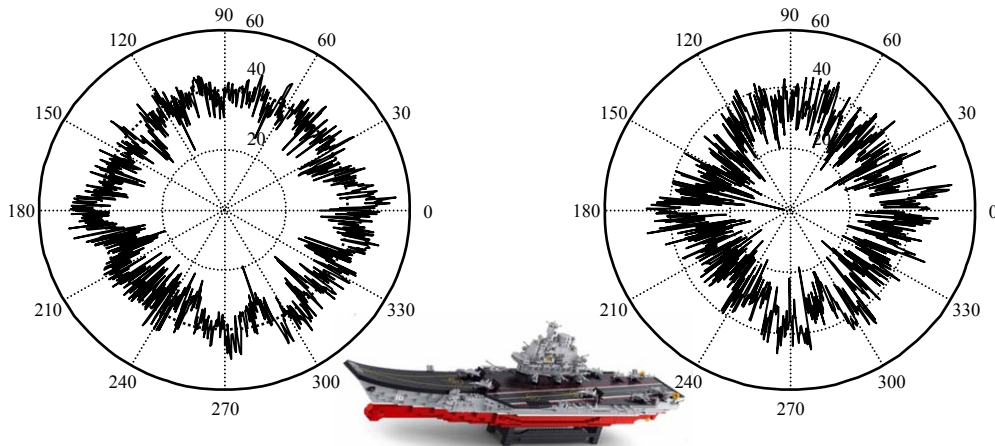


Fig.8 RCS with trestle table(left) and without trestle table(right) at 0° elevation
图 8 目标 RCS 结果

4 结论

在太赫兹频段,电大尺寸目标回波数据往往不满足远场条件,本文通过目标在非涅耳区 ISAR 图像提取精确的散射源位置和幅度,把一个电大尺寸目标的非涅耳区散射问题变成了小面单元的远场散射积分问题,并利用 CLEAN 算法在 ISAR 图像中剔除支架的强散射点,提高 RCS 测量的精确度。由于近场成像中不可避免地引入计算误差,有限的成像分辨率可导致像素点位置模糊,影响 RCS 测量精确度,还需探索更合适的近-远场变换算法。

参考文献:

- [1] Ralf Gente,Christian Jansen,Robert Geise,et al. Scaled bistatic radar cross section measurements of aircraft with a fiber-coupled THz time-domain spectrometer[J]. IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology, 2012,2(4):424-431.
- [2] Krzysztof Iwaszczuk,Henning Heiselberg,Peter Uhd Jepsen,et al. Terahertz radar cross section measurements[C]// 2010 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Rome:[s.n.], 2010:1-3.
- [3] Lonnqvist A,Mallat J,Raisanen A V. Phase-hologram-based compact RCS test range at 310 GHz for scale models[J]. IEEE Trans. on MTT, 2006,54(6):2391-2397.
- [4] 张麟兮,李南京,胡楚峰,等. 雷达目标散射特性测试与成像诊断[M]. 北京:中国宇航出版社, 2009. (ZHANG Linxi,LI Nanjing,HU Chufeng,et al. Measurement and imaging of radar target scattering characteristics[M]. Beijing:China Astronautics Press, 2009.)
- [5] Thomas M Goyette,Jason C Dickinson,Jerry Waldman,et al. Fully polarimetric W-band ISAR imagery of scale-model tactical targets using a 1.56-THz compact range[C]// Proceedings of SPIE,Algorithms for synthetic aperture radar imagery VIII. ORLANDO:[s.n.], 2001:229-240.
- [6] Roger W McGowan,R Alan Cheville,Daniel R Grischkowsky. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging[J]. IEEE Trans. on MTT, 2000,48(3):417-422.
- [7] Craig R Birtcher,Constantine A Balanis. RCS measurements, transformations,and comparisons under cylindrical and plane wave illumination[J]. IEEE Trans. on AP, 1994,42(3):329-334.

- [8] David G Falconer. Extrapolation of near-field RCS measurements to the far zone[J]. IEEE Trans. on AP, 1988,36(6):822-829.
- [9] Barry J Cown,Charles E Ryan. Near-field scattering measurements for determining complex target RCS[J]. IEEE Trans. on AP, 1989,37(5):576-585.
- [10] Antoni Broquetas,Luis Jofre,Angel Cardama. Spherical wave near-field imaging and radar cross-section measurement[J]. IEEE Trans. on AP, 1998,46(5):730-735.
- [11] Robert Anthony Clemens. Near-field to far-field radar cross section transform incorporating super-resolution imaging with MUSIC[D]. USA:School of Electrical Engineering University of Dayton, 2003.
- [12] Thomas Vaupel,Thomas F Eibert. Comparison and application of near-field ISAR imaging techniques for far-field radar cross section determination[J]. IEEE Trans. on AP, 2006,54(1):144-151.
- [13] Jenho Tsao,Bernard D Steinberg. Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging:the CLEAN technique[J]. IEEE Trans. on AP, 1988,36(4):543-556.
- [14] Tseng N Y. A very efficient RCS data compression and reconstruction technique[D]. USA:Graduate School of the Ohio State University, 1992.
- [15] 蔡英武,杨陈,曾耿华,等. 太赫兹极高分辨力雷达成像试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(1):7-9. (CAI Yingwu, YANG Chen,ZENG Genghua,et al. Experimental research on imaging technology for high resolution terahertz radar system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(1):7-9.)
- [16] 成彬彬,江舸,杨陈,等. 0.14 THz 高分辨力成像雷达信号处理[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1577-1581. (CHENG Binbin,JIANG Ge,YANG Chen,et al. Signal processing for 0.14 THz high resolution imaging radar[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1577-1581.)

作者简介:



江 舸(1982-), 男, 四川省乐山市人, 在读博士研究生, 助理研究员, 主要从事太赫兹成像机理及信号处理.email:jiangge321@163.com.

成彬彬(1981-), 男, 湖北省随州市人, 博士, 副研究员, 主要从事太赫兹雷达及成像技术.

张 健(1968-), 男, 四川省大竹县人, 博士生导师, 研究员, 主要从事电子学系统、无线通信、太赫兹技术研究.