

## 一种基于多标定体融合的超宽带虚拟孔径雷达系统校正方法

王鹏宇\* 周智敏 宋千 金添  
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 系统校正技术是影响超宽带(Ultra Wide Band, UWB)虚拟孔径雷达(Virtual Aperture Radar, VAR)对浅埋弱小目标穿地探测效果的重要因素,系统的超宽带特性及多通道不一致性使得常规高频窄带雷达基于单一标定体的校正方法不再适用,该文在对系统误差、标定体及地雷电磁特性分析的基础上,提出了多标定体-分频段融合的多通道校正方法,利用多个标定体对不同频段分别校正,该方法有效地校正了系统误差,提高了成像质量,实测数据验证了方法的有效性。

**关键词:** 虚拟孔径雷达; 系统校正; 多标定体; 频带融合

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)11-2775-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00337

## A Calibration Method Based on Fusing Multiple Calibrators for Ultra Wide Band Virtual Aperture Radar System Using Stepped Frequency

Wang Peng-yu Zhou Zhi-min Song Qian Jin Tian

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The system calibration is very important for the Ultra Wide Band-Virtual Aperture Radar (UWB-VAR) which could penetrate ground to detect the flush buried targets with weak scattering. The usual system calibration method used in narrow band radar with high frequency is based on one single calibration object, which can not be applied to the UWB-VAR system any more for its ultra bandwidth and inconsistentness among different channels. In this paper after analyzing the system errors and the electromagnetism of both calibration objects and landmines a new method basing on fusing multiple calibrators and multiband is introduced. This new method could not only calibrate the system errors efficiently, but also enhance the performance of imaging. Finally it is proved to be effective by the real data.

**Key words:** Virtual Aperture Radar (VAR); System calibration; Multiple calibrators; Multi-band fusion

### 1 引言

UWB-VAR 雷达通过分裂孔径发射配置<sup>[1,2]</sup> (Split Aperture Transmit Configuration, SATC)方式,在同样孔径长度下实现了与传统单站 SAR 相当的方位分辨率,而系统的超宽频带又使其具有穿透地表的距离高分辨能力,因此能够实现对目标电磁散射特性(Radar Cross Section, RCS)的有效测量。但由于系统存在误差,雷达无法获得目标全频带回波响应,特别是具有穿透能力的低频段回波,严重影响目标的成像质量。对具有多通道的 UWB-VAR 系统而言,由于器件特性、制造工艺的不同易造成各收发通道特性的不一致,尤其是天线频率响应一致性较差,通过测量可以获得其固有的频率响应特

性,但受系统结构、其他雷达部件及工作温度等因素的影响,其在整系统中的频率响应是无法测量的。基于标定体的系统校正是目前应用较为广泛的一种系统校正技术<sup>[3,4]</sup>,它具有操作相对简单,受地形影响小,较容易实现等优点,是一种简单、快捷、有效全系统闭环校正方法。本文采用三面角反射器作为标定体,它维护简单,造价低廉,虽然其电磁散射特性没有确切的函数表达式,但可以建立较为准确的数值模型,是系统校正较为理想的标定体。

但 UWB-VAR 系统的超宽频带特性使得三面角 RCS 与频率相关,存在以下问题:(1)当三面角尺寸远小于波长时,虽然可以视为点目标,但由于处于 RCS 的瑞利区,低频回波信噪比低,生成校正数据质量较差;(2)当三面角尺寸大于波长时,回波信噪比较高,但不能视为点目标,同样也不适用于整系统误差提取。因此利用单一标定体无法实现 UWB-VAR 雷达的整系统、全频段校正,即使具有准确电磁散射模型的金属导体球也存在相同的问题,这是

2011-04-11 收到, 2011-07-28 改回

国家自然科学基金(60972121)和全国优秀博士学位论文作者专项资助(201046)资助课题

\*通信作者: 王鹏宇 kedawangpengyu@yahoo.com.cn

UWB 系统基于标定体校正的固有缺点。

UWB-VAR 系统利用低频穿透性实现地表穿透探测, 利用超宽频带实现高分辨成像, 但地雷目标小、回波弱的特性对系统校正特别是低频段校正提出了较高要求。低频校正效果直接影响系统穿透能力, 进而影响地雷目标的高分辨成像。本文采用金属三面角作为标定体, 以三面角及金属地雷的电磁分析为基础, 提出了多标定体-分频段融合的整系统、全频带校正方法, 解决了多频段校正数据融合问题, 有效地校正了系统误差, 提高了成像质量。

## 2 系统误差及标定体 RCS 特性分析

本文研究基于国防科学技术大学 2007 年研制的车载超宽带步进频率前视虚拟孔径探地雷达演示系统(SFGPVAR), 该系统为典型阵列超宽带雷达, 主要用于近场浅埋目标(反坦克地雷)的高分辨成像及检测鉴别, 发射天线位于接收天线阵列两端, 本文所用实测数据均源自该系统。

与常规 SAR 系统相似, UWB-VAR 系统也可视为由信号产生子系统、收发子系统、天线子系统等组成的级联系统<sup>[5]</sup>, 基于 VAR 系统的多通道结构, 定义系统通道传输函数  $H(m, n, f, t)$ , 其中  $m$  为发射天线序号,  $n$  为接收天线序号。根据信号处理理论, 目标电磁散射特性可定义为

$$H_T = \sigma_T e^{-j\theta(f)} \quad (1)$$

其中  $\sigma_T$  为目标雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS),  $f$  为发射信号频率,  $\theta(f)$  为目标 RCS 的相位响应, 此时整系统信号输入-输出方程可由下式表示。

$$Y(m, n, f, t) = X(f, t) \otimes H(m, n, f, t) \otimes H_T e^{-j2\pi f \tau(m, n)} \quad (2)$$

$X(f, t)$  为雷达发射信号,  $Y(m, n, f, t)$  为雷达接收回波,  $\tau(m, n)$  为对应回波通道目标延迟, 式(2)经解调后得

$$Y(m, n, f, t) = H(m, n, f, t) \otimes H_T e^{-j2\pi f \tau(m, n)} \quad (3)$$

由式(3)可知: 求得目标电磁散射特性  $H_T$  的前提是对系统传输函数  $H(m, n, f, t)$  进行有效估计, 最大程度地消除系统传输函数引入的误差, 即系统校正。基于三面角的系统校正利用已知电磁散射特性的三面角对系统传输函数进行有效估计, 由式(3)可得

$$Y_{\text{Tri}}(m, n, f, t) = H(m, n, f, t) \otimes H_{\text{Tri}} e^{-j2\pi f \tau_0(m, n)} \quad (4)$$

其中  $\tau_0(m, n)$  为已知三面角的通道延迟, 那么联立式(3), 式(4)式即可求得目标的 RCS。已知系统频率范围 400~2200 MHz, 对应波长 0.137~0.75 m, 考虑 0.1 m, 0.2 m, 0.3 m 3 种尺寸三面角作为系统校正标定体, 对应的 RCS 幅度、相位曲线如图 1 所示, 可以看出: 各三面角的 RCS 在系统有效频带内均介于瑞利区和谐振区之间<sup>[6]</sup>, 且存在较明显的拐点, 如图 1(a)中点  $a$  (340 MHz), 点  $b$  (540 MHz), 点  $c$  (1000 MHz) 分别对应于 0.3 m, 0.2 m 和 0.1 m 三面角。在低频段, 三面角尺寸越大, RCS 响应幅值越高, 并且 RCS 相位-频率响应曲线在全频带均可用频率的一次响应函数加以逼近, 这有利于 UWB-VAR 系统传输误差特别是低频误差的提取及校正。

## 3 基于多标定体融合的系统校正

系统校正高分辨成像的基础, 尤其低频校正效果会直接影响浅埋目标的成像质量, 根据前文所述, 以三面角作为标定体进行系统校正是一种简单、快捷、有效系统校正手段, 但是由于单一标定体在全频带内无法同时满足点散射模型和低频响应高信噪比双重要求, 因此基于单一标定体的系统校正对 UWB-VAR 系统不再适用, 图 2 为以不同尺寸三面角作为标定体单独进行系统校正所得的浅埋地雷 RCS 响应曲线。

由图 2 中结果可知: 400~500 MHz 频段 0.3 m 三面角校正曲线与地雷理想 RCS 曲线相近, 因此校正效果较好, 而 0.1 m 与 0.2 m 三面角校正偏差较

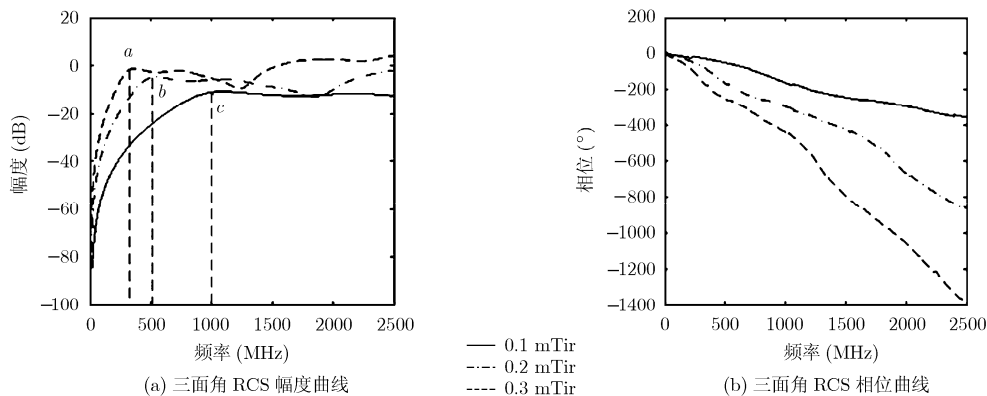


图 1 三面角 RCS 幅度及相位曲线

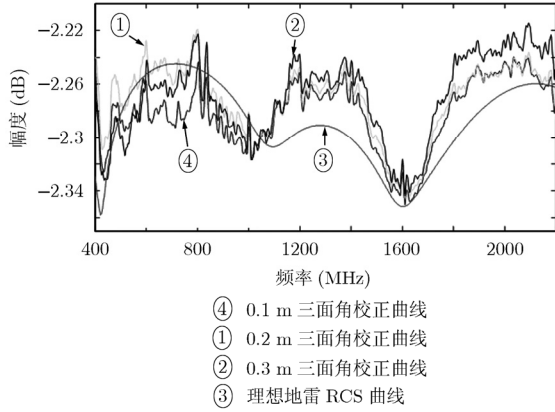


图 2 基于单标定体校正的地雷 RCS 曲线

大，主要由于该频段恰为 0.1 m, 0.2 m 三面角电磁响应的瑞利区，回波信噪比低；500~1000 MHz 频段 0.2 m 三面角校正效果较好，而 0.1 m, 0.3 m 三面角则校正效果较差，主要由于该频段为 0.1 m 三面角电磁响应的瑞利区，回波信噪比低，虽然该频段对应 0.3 m 三面角的谐振区，但此时 0.3 m 三面角却不能视为点目标，其违背了标定体校正的点目标散射假设；1000~2200 MHz 频段 0.1 m 三面角与其他两个标定体的校正效果相近，但只有 0.1 m 三面角在该频段满足点目标散射假设，利于高频段校正误差提取。综上所述，利用单一三面角作为标定体无法实现 UWB-VAR 系统校正，需要考虑基于多标定体-分频段的融合校正方法，即对系统全频带进行子带划分，利用不同尺寸三面角对相应子带进行校正，然后对校正后的子带进行数据融合，求得全频带的最佳校正效果。

根据图 1(a)中不同三面角 RCS 响应曲线可得子带划分原则：在满足标定体点散射模型的前提下，应选取标定体具有较高信噪比的谐振区频带回波，以提高系统误差估计精度，并且避免选取瑞利区的低信噪比数据而增大系统校正偏差，因此以图 2 单一三面角校正结果为基础将全频带做如下划分：

虽然不同标定体在对应校正子频带内可近似为点目标，但各自的相位响应中心并不一致，因此基于多标定体-分频段的融合校正需要解决相位响应中心不一致造成的子频带相位不连续问题，其实质是不同标定体相位响应中心位置误差估计问题。定

表 1 校正子频带划分

标定体	频带范围(MHz)
0.3 m 三面角	400~540
0.2 m 三面角	540~1000
0.1 m 三面角	1000~2200

义 0.2 m, 0.3 m 三面角与 0.1 m 三面角相位中心位置误差分别为  $(\Delta x_{0.2}, \Delta y_{0.2})$ ,  $(\Delta x_{0.3}, \Delta y_{0.3})$ ，对应相位误差分别为  $\theta_{12}(f, \Delta x_{0.2}, \Delta y_{0.2})$ ,  $\theta_{13}(f, \Delta x_{0.3}, \Delta y_{0.3})$ ，则根据式(3)可得

$$\left. \begin{aligned} Y_{\text{Tri}}^{0.1}(m, n, t) &= H(m, n, t) \sigma_{\text{Tri}} e^{-j2\pi f \tau_0^{0.1}(m, n, f, x_0, y_0)} \\ Y_{\text{Tri}}^{0.2}(m, n, t) &= H(m, n, t) \sigma_{\text{Tri}} e^{-j2\pi f \tau_0^{0.1}(m, n, f, x_0, y_0)} \\ &\quad \cdot e^{-j\theta_{12}(m, n, f, \Delta x_{0.2}, \Delta y_{0.2})} \\ Y_{\text{Tri}}^{0.3}(m, n, t) &= H(m, n, t) \sigma_{\text{Tri}} e^{-j2\pi f \tau_0^{0.1}(m, n, f, x_0, y_0)} \\ &\quad \cdot e^{-j\theta_{13}(m, n, f, \Delta x_{0.3}, \Delta y_{0.3})} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$(m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N)$$

显然根据式(5)方程组无法估算位置误差，因此考虑基于标定体 2 维图像的位置误差估计，2 维图像利用多通道回波的有效累积，提高了信噪比，有利于降低估计误差，多标定体子频带 2 维图像相位响应中心误差估计的实质是多频段雷达目标图像 2 维平面空间的配准问题。Hausdorff 距离<sup>[7]</sup>是两个集合间距离的一种定义形式，用于度量两个集合间最大不匹配程度，它是对两个集合之间相似程度的测量，不要求测试样本与模板像素点之间具有一一对应关系，因此适用于不同尺寸三面角子频带图像的精确配准。

Hausdorff 距离定义如下：

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|P_a - P_b\| \quad (6)$$

其中  $a, b$  分别为集合  $A, B$  中的点(对应图像中则为像素点)， $P_a, P_b$  为对应的值， $h(A, B)$  即为集合  $A, B$  的 Hausdorff 距离。定义  $I_{0.1}, I_{0.2}, I_{0.3}$  分别为 0.1 m, 0.2 m, 0.3 m 三面角的校正子频带 2 维图像，均由后向投影(Back-Projection, BP)算法<sup>[8]</sup>得到，则

$$\left. \begin{aligned} h(I_{0.1}, I_{0.2}) &= \max_{a \in I_{0.1}} \min_{b \in I_{0.2}} \|P_a - P_b\| \\ h(I_{0.1}, I_{0.3}) &= \max_{a \in I_{0.1}} \min_{b \in I_{0.3}} \|P_a - P_b\| \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据文献[9]对式(7)Hausdorff 距离求解可得相位响应中心误差，联合式(5)将各校正子频带数据有效融合，得到系统全频带校正数据，具体流程如下：

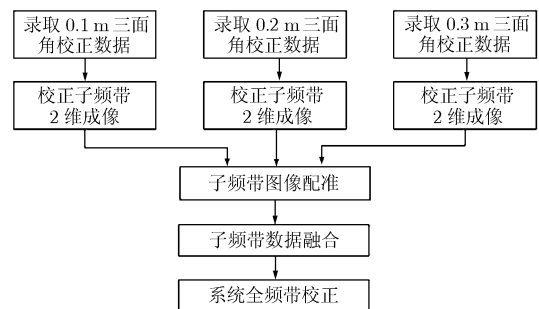


图 3 多标定体-分频段系统校正流程图

### 4 实测数据处理结果

SFGPVAR 系统发射频率步进增量为 2 MHz 的步进频率连续波, 天线高 3.2 m, 采用 4 发-16 收的分裂发射虚拟孔径配置, 系统有效探测宽度 6 m, 有效探测距离为车前 5~21 m, 试验金属地雷直径约 30 cm, 浅埋于车前中心 9 m。

图 4 为多标定体-分频段校正的金属地雷 RCS 曲线与理想曲线对比图, 与基于单一三面角校正结果相比, 新方法能够更加有效地校正系统误差, 还原地雷真实的 RCS。图中频点 A, B 幅度远高于地雷 RCS 曲线包络主要是 A, B 两点恰位于 900 MHz 手机频段, 为射频干扰。

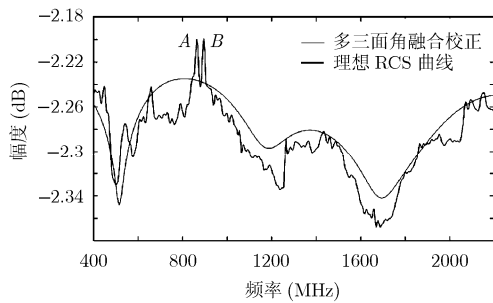


图 4 多标定体融合校正后地雷 RCS 曲线

图 5(a)~5(d) 为不同校正方法校正后浅埋地雷成像结果, 表 2 为对应地雷感兴趣区域(Range Of Interest, ROI)图像指标, 对比可知: 与基于单一三面角校正相比, 多标定体-分频段融合校正能够有效校正系统误差, 在改善成像质量的同时提高了检测率, 图 6 为 SFGPVAR 系统某次探测试验不同校正方法校正后的目标检测率曲线。

表 2 地雷图像指标对比

	距离分辨率 (m)	峰值旁瓣比 (dB)	积分旁 瓣比(dB)
0.1 m 三面角校正	0.0917	-13.23	-6.81
0.2 m 三面角校正	0.0940	-15.37	-8.49
0.3 m 三面角校正	0.0964	-16.61	-9.26
多标定体融合校正	0.0835	-11.06	-5.24

### 5 结论

步进频率 UWB-VAR 系统的超宽频带特性使其能够穿透地表进行 2 维高分辨成像, 广泛用于地雷等浅埋弱小目标探测, 而系统校正技术则是制约 UWB-VAR 系统信息处理的重要因素, 尤其是基于

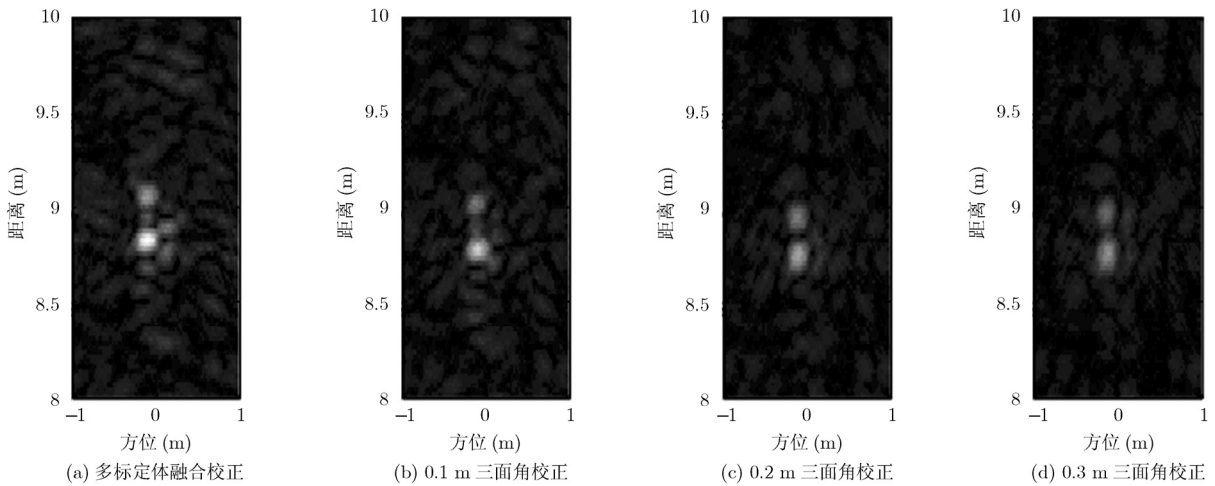


图 5 不同标定体校正实测埋地地雷成像结果

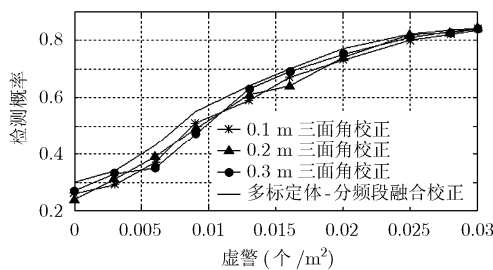


图 6 地雷目标检测率对比曲线

图像的检测鉴别。系统的超宽带特性及多通道不一致性使得常规高频窄带雷达基于单一标定体的系统校正方法不再适用, 本文在对系统误差及标定体电磁特性分析的基础上, 提出了基于多标定体-分频段融合校正方法, 根据 Hausdorff 距离准则提出了基于标定体 2 维图像配准的相位响应中心误差估计, 实现了校正子频带的有效融合, 有效地校正了系统误差, 增强地雷双峰特征的同时提高了检测率, 实测数据验证了该方法的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] Jin Tian and Zhou Zhi-min. Imaging model of forward-looking ground penetrating radar with split-aperture transmitting configuration. 2nd Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xi'an, China, 2009: 21-24.
- [2] Jin Tian, Song Qian, and Lu Bi-ying. Virtual array imaging radar azimuth resolution analysis. IET International Radar Conference, Guilin, China, 2009: 223-226.
- [3] Biancardi P and Iannini L. Performances and limitations of persistent scatters-based SAR calibration. Radar Conference 2010, Washington D.C, 2010, 10: 762-766.
- [4] D'Aria D and Ferretti A. SAR Calibration aided by permanent scatters. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 2076-2088.
- [5] 邹鲲. 低频UWB-SAR校准技术研究. [博士论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [6] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性. 北京: 电子工业出版社, 2005, 第3章.
- [7] Huttenlocher D P, Klanderman G A, and Rucklidge W J. Comparing images using the Hausdorff distance. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(9): 850-863.
- [8] 王鹏宇, 宋千, 金添. 步进频率SAR快时间多普勒效应补偿新方法. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2053-2058.
- Wang Peng-yu, Song Qian, and Jin Tian. A new fast-time doppler effect compensation method applied to SAR system using step frequency waveforms. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(9): 2053-2058.
- [9] 张志刚, 周明全, 耿国华. 一种基于 Hausdorff 距离的图像配准算法. 计算机应用与软件, 2007, 24(8): 17-19.
- Zhang Zhi-gang, Zhou Ming-quan, and Geng Guo-hua. An image registration algorithm based on Hausdorff distance. *Computer Applications and Software*, 2007, 24(8): 17-19.
- 王鹏宇: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为步进频率信号处理、超宽带 SAR 成像技术.
- 周志敏: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代雷达系统设计、实时信号处理等.
- 宋千: 男, 1973年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为实时信号处理、超宽带SAR信息处理技术、超宽带探地雷达技术等.
- 金添: 男, 1980年生, 副教授, 研究方向为 SAR 成像算法、目标检测技术、目标电磁建模、机器学习等.