基于集成学习的角反射体目标雷达识别理论与方法

胡生亮　范学满　刘　忠　等◎著

RADAR RECOGNITION THEORY AND METHOD OF CORNER REFLECTOR TARGET BASED ON ENSEMBLE LEARNING



中国工信出版集团
電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

需要全本请访问 www.ertongbook.com

基于集成学习的角反射体目标雷达识别理论与方法

责任编辑：张正梅
封面设计：朝天世纪



ISBN 978-7-121-37229-2



定价：98.00元

基于集成学习的角反射体目标雷达识别理论与方法

胡生亮　范学满　刘　忠　罗亚松
张　俊　许江湖　童继进　吴林罡　著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

角反射体是一类重要的军用雷达目标，也是一种重要的无源干扰器材。本书总结了作者基于集成学习的角反射体雷达目标识别方法的研究成果，共由 6 章构成。第 1 章，介绍了角反射体目标概况，分析了角反射体的雷达目标特性及其 RCS 快速预估算法。第 2 章，介绍了全极化高分辨率距离像的特征提取与优选，构建起角反射体与舰船目标混合分类识别数据集。第 3 章，介绍了集成学习的基本理论。第 4 章，介绍了基于静态分类器集成的角反射体目标雷达识别方法。第 5 章，介绍了基于动态分类器集成的角反射体目标雷达识别方法。第 6 章，对 4 种分类器集成算法进行了对比研究。

本书主要读者对象为从事电子对抗、雷达工程等相关专业的科研、教学人员，也可作为相关专业本科生和研究生的学习参考资料。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

基于集成学习的角反射体目标雷达识别理论与方法 / 胡生亮等著. —北京：电子工业出版社，2019.9

ISBN 978-7-121-37229-2

Ⅰ. ①基… Ⅱ. ①胡… Ⅲ. ①雷达目标识别—研究 Ⅳ. ①TN959.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 174103 号

责任编辑：张正梅

印　　刷：北京捷迅佳彩印刷有限公司

装　　订：北京捷迅佳彩印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编：100036

开　　本：720×1000　1/16　印张：13.25　字数：242 千字

版　　次：2019 年 9 月第 1 版

印　　次：2019 年 9 月第 1 次印刷

定　　价：98.00 元

安徽师范大学图书馆 藏书

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254757。

前　言

角反射体能够在较大的范围对入射雷达波形成强反射，是构成军舰、战车等目标的基本反射单元，是一类重要的军用雷达目标。同时，角反射体也是一种历史悠久、应用广泛的无源对抗器材，早在第二次世界大战期间，就曾出现盟军采用金属角反射体模拟大型军舰进行佯攻登陆，成功欺骗德军的战例。马岛海战后，英国根据“谢菲尔德”号等舰艇遭受反舰导弹重创的深刻教训，紧急研制了由舰艇携带使用的充气式角反射体。至此，充气式角反射体作为新型的舰载反导雷达对抗器材正式登上了历史舞台。

充气式角反射体是一种柔性反射体，多以柔性充气柱为框架，以金属织物作为反射面，离舰后自动充气展开成型，以假目标的形式对预警探测雷达、导弹末制导雷达等进行欺骗。经过几十年的发展，舰载角反射体已由早期的简单结构体，发展到由几个甚至几十个反射体单元构成的复杂异型体结构。多个异型角反射体联合使用时，在 RCS 起伏特性、频率特性、极化特性等方面表现出与舰船目标极强的相似性，这给雷达的目标识别与分选造成了极大困难。如何对海上角反射体目标进行有效识别，是摆在对海雷达技术人员面前的重要任务。

本书利用全极化 HRRP 刻画目标本质属性，提高角反射体与舰船目标之间的可分性，并通过集成学习突破传统单一分类器的性能瓶颈，进一步提升雷达对角反射体目标的识别率。

本书内容由 6 章组成，具体安排如下：

第 1 章，角反射体目标概况。本章概述了角反射体的发展与应用现状，分析了角反射体的雷达目标特性，介绍了一种角反射体 RCS 的快速预估算法。

第 2 章，全极化高分辨率距离像的特征提取与优选。本章首先基于 RCS 幅值特性和 HRRP，确定一种与某一典型舰船逼近度较高的异型角反射体阵列，用作目标识别的研究对象之一。然后，将全极化 HRRP 用于雷达目标识别，仿真建立包括舰船和角反射体在内的全极化 HRRP 数据库。最后，从中提取并优选出一个最小冗余、最大相关的特征集，作为后续目标识别的分类数据集。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第 3 章，集成学习的基本理论。本章首先介绍了集成学习的基本框架；其次，阐述了集成学习有效性的内部和外部原因，进而分析了集成学习在雷达全极化 HRRP 目标识别中的可行性；再次，分析了基分类器的多样性对集成系统性能的重要影响，总结了常用的多样性度量方法，并利用集成间隔解释了集成学习中的多样性；最后，介绍了集成学习的主要类别。

第 4 章，基于静态分类器集成的角反射体目标雷达识别方法。本章从分类器融合和静态集成选择两方面入手，介绍了两种静态集成算法，用于角反射体目标的雷达识别，基于全极化 HRRP 数据集寻优确定了两种静态集成算法的主要参数。

第 5 章，基于动态分类器集成的角反射体目标雷达识别方法。本章为进一步提高分类精度，将动态集成选择用于角反射体目标的雷达识别，介绍了两种可以兼顾分类精度和集成多样性的动态集成选择算法，基于全极化 HRRP 数据集寻优确定了两种动态集成算法的主要参数。

第 6 章，4 种分类器集成算法的对比研究。本章首先在理想条件下对第 4 章和第 5 章提出的 4 种集成学习算法进行横向对比。然后，针对实际应用中雷达目标识别通常会面临类别噪声、小样本集以及存在库外目标的情况，进一步分析了 4 种集成学习算法在上述 3 个因素单独作用以及共同作用时的鲁棒性。

本书是作者团队长期从事海上角反射体装备设计研制、特性分析、对抗使用、识别研究等相关工作成果与经验的总结。在编著过程中，参考了国内外广大同仁的相关文献和著作，并得到了电子工业出版社的大力支持与帮助，在此一并表示感谢。

目　录

第 1 章　角反射体目标概况……1
1.1　引言……1
1.2　角反射体的发展与应用现状……1
1.3　角反射体的雷达目标特性……5
1.3.1　角反射体的 RCS 经典公式……5
1.3.2　电磁仿真软件……5
1.3.3　角反射体的 RCS 频率特性……7
1.3.4　角反射体的 RCS 极化特征……7
1.3.5　角反射体的高分辨率距离像……9
1.3.6　异型角反射体的雷达目标特性……10
1.4　角反射体 RCS 快速预估……14
1.4.1　基于改进 GO/AP 法的三面角反射体 RCS 预估……15
1.4.2　角切除和角度公差对三面角反射体 RCS 的影响……24
1.4.3　角反射体群和异型角反射体的 RCS 快速预估……29
1.5　小结……35
参考文献……36
第 2 章　全极化高分辨率距离像的特征提取与优选……38
2.1　引言……38
2.2　异型角反射体布放阵列寻优……39
2.2.1　基于 RCS 幅值特性的异型角反射体阵列寻优……39
2.2.2　基于 HRRP 的异型角反射体阵列寻优……43
2.3　全极化 HRRP 的特征提取……45
2.3.1　全极化 HRRP 数据集建立……46
2.3.2　特征提取……51

2.4 全极化 HRRP 的特征优选 ……61
2.4.1 全极化 HRRP 特征的有效性分析 ……61
2.4.2 基于归一化互信息的特征选择算法 ……69
2.4.3 特征优选 ……79
2.5 小结 ……83
参考文献 ……83
第 3 章 集成学习的基本理论 ……87
3.1 引言 ……87
3.2 集成学习的框架 ……87
3.3 分类器输出的类型 ……90
3.4 集成学习的有效性分析 ……92
3.4.1 有效性的内部条件 ……92
3.4.2 有效性的外部原因 ……93
3.4.3 一个分类器集成的例子 ……95
3.4.4 集成学习在雷达目标识别中的适应性分析 ……97
3.5 集成学习的多样性 ……98
3.5.1 多样性的重要性 ……98
3.5.2 多样性度量方法 ……100
3.5.3 多样性度量方法的集成间隔解释 ……104
3.6 集成学习的主要类别 ……106
3.6.1 静态分类器集成 ……107
3.6.2 动态选择集成 ……111
3.7 小结 ……112
参考文献 ……112
第 4 章 基于静态分类器集成的角反射体目标雷达识别方法 ……116
4.1 引言 ……116
4.2 基于元学习的角反射体目标雷达识别算法 ……116
4.2.1 基分类算法的选择 ……117
4.2.2 基于元学习的目标识别算法 ……123
4.2.3 元学习系统的参数寻优 ……127
4.3 基于集成间隔优化的角反射体目标雷达识别算法 ……135

4.3.1 集成间隔定义……135
4.3.2 分类器权值和样本权值计算……137
4.3.3 基于集成间隔优化的静态选择集成算法……139
4.3.4 SSE-MO 的参数寻优……140
4.4 小结……144
参考文献……145
第 5 章 基于动态分类器集成的角反射体目标雷达识别方法……146
5.1 引言……146
5.2 基于聚类和随机参考分类器的角反射体目标雷达识别算法……147
5.2.1 基于多样性度量的 k-medoids 聚类……148
5.2.2 基于 RRC 的分类器竞争力度量……149
5.2.3 KMRRC 动态集成选择算法……156
5.2.4 KMRRC 的参数寻优……157
5.3 基于混合集成选择的角反射体目标雷达识别算法……160
5.3.1 基于 NSGA Ⅱ 的集成分类器静态优选……160
5.3.2 元分类器的训练与动态选择……165
5.3.3 ODS 混合分类器集成选择算法……169
5.3.4 ODS 的参数寻优……169
5.4 小结……178
参考文献……178
第 6 章 4 种分类器集成算法的对比研究……180
6.1 引言……180
6.2 理想情况下的对比研究……180
6.3 复杂条件下的对比研究……184
6.3.1 类别噪声的影响……184
6.3.2 小样本集的影响……186
6.3.3 库外目标的影响……189
6.3.4 3 种因素的共同影响……196
6.4 小结……201
参考文献……201

第 1 章

角反射体目标概况

1.1 引言

本章在介绍海上角反射体发展与应用现状的基础上，分析了标准三面角反射体以及异型角反射体的 RCS、极化、频率、高分辨率距离像等雷达目标特性，推导了标准三面角反射体 RCS 最大值的计算公式，介绍了一种三面角反射体雷达截面积的快速预估算法，基于这一快速预估算法分析顶角切除和角度公差对角反射体 RCS 的影响，并将该算法用于角反射体群和异型角反射体的 RCS 快速预估。

1.2 角反射体的发展与应用现状

角反射体通常由 2～3 块相互垂直的反射面构成，能够在较大的范围对入射雷达波形成强反射，是构成军舰、战车等目标的基本反射单元，是一类重要的军用雷达目标。同时，作为雷达引导目标，也普遍应用于海上救生等民用行业。

在海上军事领域，角反射体是一种历史悠久、应用广泛的无源对抗器材，早在第二次世界大战期间，就曾出现盟军采用金属角反射体模拟大型军舰进行佯攻

登陆，成功欺骗德军的战例。由于金属角反射体存在质量大、体积大、易变形、使用不便等缺点，制约了其在水面舰艇等特殊平台上的装备使用。为了有效发挥角反射体的作战效能，各发达国家海军纷纷投入财力、物力研制适合水面舰艇平台使用的新型角反射体。马岛海战后，英国根据“谢菲尔德”号等舰艇遭受反舰导弹重创的深刻教训，紧急研制了由舰艇携带使用的充气式角反射体。至此，充气式角反射体作为新型的舰载反导雷达对抗手段正式登上了历史舞台。

充气式角反射体是一种柔性反射体，多以柔性充气柱为框架，以金属织物作为反射面，离舰后自动充气展开成型，以假目标的形式对预警探测、导弹末制导等雷达进行欺骗。经过几十年的发展，舰载角反射体也得到了持续进步与完善，形成了系列产品。结构上，由简单双棱椎八面体发展到复杂球形六十面体。使用方式上，由海面漂浮向空中悬浮拓展，即由舰载抛投型向舰载炮射型拓展。这里以使用方式不同，进行简要介绍。

1. 舰载抛投型角反射体

舰载抛投型角反射体依靠自身重力或者利用高压气体等外力进行近距离布放，离舷后自动充气展开成型，漂浮于海面形成雷达假目标。典型代表是英制 DLF 系列舷外充气式角反射体，目前已发展了三代装备（DLF-1～DLF-3），并处于持续改进中。各代产品主要区别体现在充气式角反射体结构和抛投方式上。

（1）第一代产品 DLF-1。DLF-1 因马岛战争紧急需要而研制，角反射体结构上采用双棱锥形八面体结构，如图 1.1 所示。使用时，先在舰艇甲板上充气成型，然后再投放至海面。由于性能不理想，未装备舰艇。

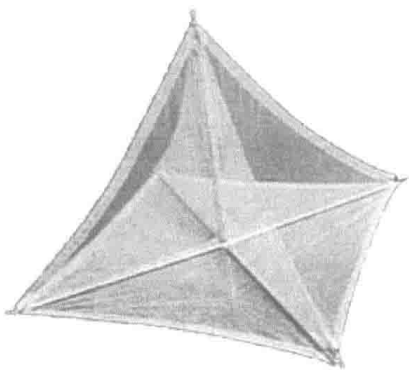


图 1.1　DLF-1 角反射体

（2）第二代及其衍生型产品 DLF-2。DLF-2 是 DLF-1 的改进型，重点对反射

需要全本请访问 www.ertongbook.com

材料、充气方式进行了完善，反射面积有所增大。角反射体结构上仍采用双棱椎形八面体构造。投放时，依靠自重滑离发射架，离舷入水前即开始充气，以假目标的形式对抗反舰导弹。使用时，两个一组成对使用，据称，两个角反射器串联使用时，RCS 值相当于一艘中型舰艇，在 4 级海况条件下可以保持有效时间 3 小时。DLF-2 自 20 世纪 80 年代中期以来除英国海军外还装备了美国及法国、意大利、荷兰等其他北约国家海军，也装备了泰国等部分东南亚国家海军。美军命名为 AN/SLQ-49，如图 1.2 所示。

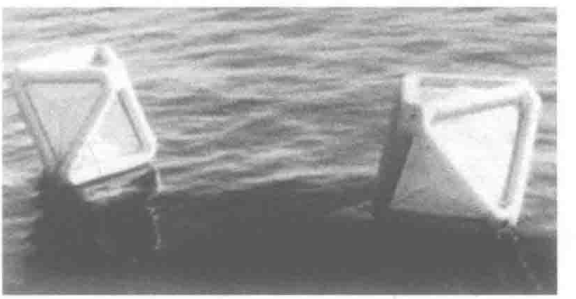


图 1.2　AN/SLQ-49 角反射体

（3）第三代及其发展型产品 DLF-3。DLF-3 产品研制于 20 世纪 90 年代末期，在结构上，采用了 20 个角反射器构成的六十面体，如图 1.3 所示。发射投放方式采用了类似于鱼雷发射管的发射装置。与 DLF-2 相比，DLF-3 的展开成型时间大大缩短，雷达回波效果有了显著提升。近十年来，DLF-3 及其改进产品陆续装备英、美等海军水面舰艇，其中，美军命名为 MK-59 MOD0，如图 1.3 所示。

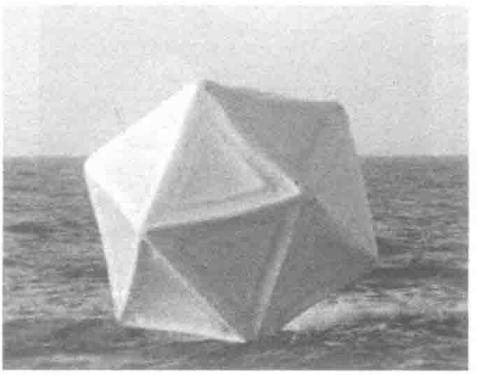


图 1.3　MK-59 MOD0 角反射体

2. 舰载炮射型角反射体

舰载炮射型角反射体是近十几年以来迅速发展和装备的一种新型无源干扰器

材，角反射体装填在箔条弹弹舱等运载器中，利用通用无源发射装置发射并飞至距载舰一定距离后，从运载器中脱离，在空中展开成型，以雷达假目标形式对雷达实施干扰。舰载炮射型角反射体典型代表有以色列“维扎德”（Wizard）反雷达假目标（图 1.4）和德国的“舷外角反射器”（OCR）（图 1.5）诱饵。



图 1.4 “维扎德”（Wizard）反雷达假目标

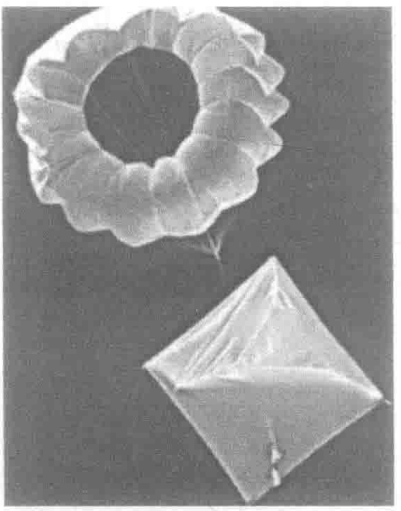


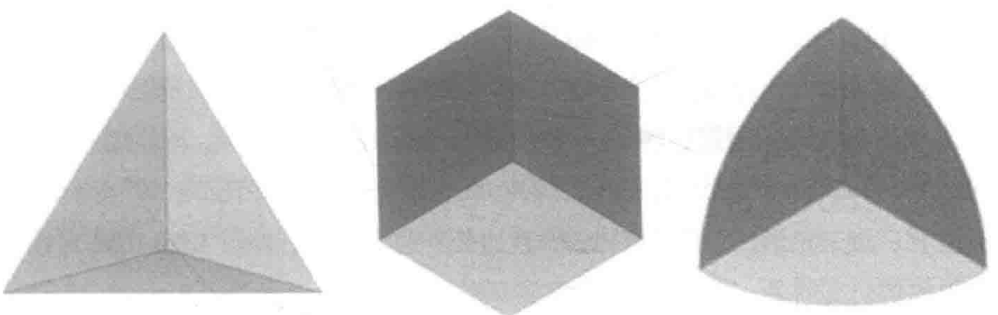
图 1.5 “舷外角反射器”（OCR）诱饵

总体而言，角反射体特别是海上漂浮式角反射体，主要是通过假目标形式对雷达进行欺骗和干扰。如何对海上角反射体目标进行有效识别，是摆在对海雷达技术人员面前的重要任务。

1.3　角反射体的雷达目标特性

1.3.1　角反射体的 RCS 经典公式

三角形角反射体、方形角反射体和圆形角反射体是 3 类较为常见的三面角反射体，如图 1.6 所示。3 类三面角反射体的 3 个面均两两垂直，其中三角形角反射体的 3 个面均为等腰直角三角形，方形角反射体的 3 个面均为正方形，圆形角反射体的 3 个面均为 1/4 圆。



（a）三角形角反射体　　（b）方形角反射体　　（c）圆形角反射体

图 1.6　常见的三面角反射体

这 3 类角反射体 RCS 最大值的经验公式如表 1.1 所列[1~3]。

表 1.1　典型三面角反射体的 RCS 最大值计算公式

类型	波长依赖关系	垂直边长依赖关系	RCS 最大值计算公式
三角形角反射体	$1/\lambda^2$	L^4	$\sigma_{\Delta\max}=4\pi L^4/3\lambda^2$
方形角反射体	$1/\lambda^2$	L^4	$\sigma_{\square\max}=12\pi L^4/\lambda^2$
圆形角反射体	$1/\lambda^2$	L^4	$\sigma_{O\max}=15.6L^4/\lambda^2$

1.3.2　电磁仿真软件

考虑到实验测量的高成本问题，依靠商用电磁仿真软件进行仿真分析已经成为角反射体雷达目标特性研究的重要手段之一。比较有代表性的专用软件包括 CST、FEKO、XPATCH、GRECO、ADS 电磁仿真软件[4~6]，其中以 CST 和 FEKO 最为典型。FEKO 是一款用于 3D 结构电磁场分析的仿真工具，它以矩量法（MOM）为基

础对三维目标实现全波电磁场分析，并集成了物理光学法（PO）等多种算法，形成了一套完整的电磁计算体系[7]。Computer Simulation Technology STUDIO SUITE 即 CST 工作室套装，是面向 3D 电磁场、微波电路和温度场设计工程师的一款有效、精确的专业仿真软件包，包含 7 个工作室子软件，集成在同一平台上。软件覆盖整个电磁频段，一共提供了 7 个完备的时域和频域全波算法。仿真自带全新的理想边界拟合技术和薄片技术，与其他传统的仿真器相比，在精度上有数量级的提高。为了得到更好的求解效果，该软件提供了 4 种不同的求解器，用在各自最适合的应用领域。由于瞬态求解器对绝大多数的高频应用都极为有效，并包含有最新的多级子网技术，能够提高网格划分效率，极大加快仿真速度，对复杂器件尤为有效。

到底选择 CST 还是 FEKO 呢？下面以标准三角形三面角反射体为例，设计实验对比 CST 和 FEKO 对于电大尺寸目标的仿真精度和仿真效率。实验环境为 Core i5 处理器、主频 3.3GHz、内存 4GB；入射波频率为 10GHz，极化方式为垂直极化；在 FEKO 和 CST 中均选取弹跳射线法（Shooting and Bouncing Ray，SBR）[8]，网格划分尺寸为波长的一半，其他均为默认设置；扫描范围为：俯仰角 θ=54.75°，方位角 $-10° \leqslant \varphi \leqslant 100°$，步长为 1°；取三角形三面角反射体的垂直边长分别为 0.5m、1m、1.5m、2m 对比 CST 和 FEKO 的仿真结果。两个软件的仿真结果如图 1.7 所示，运行时间如表 1.2 所列。

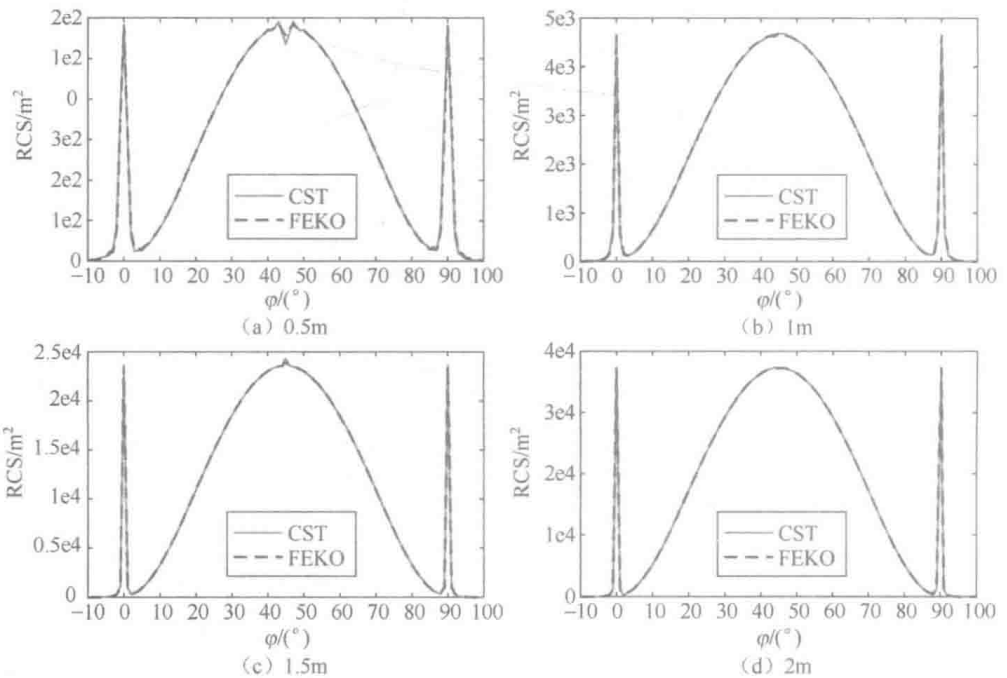


图 1.7　CST 与 FEKO 的仿真结果对比图

表 1.2　CST 与 FEKO 的运行时间对比表

仿真软件	垂直边长/m			
	0.5	1	1.5	2
CST/s	18	59	131	226
FEKO/s	439	1107	3736	11323

综合图 1.7 和表 1.2 可知，对于电大尺寸目标，CST 和 FEKO 软件的计算精度相当，但 CST 的仿真效率高于 FEKO，因此本书选用 CST 作为本书的电磁仿真工具软件。

1.3.3　角反射体的 RCS 频率特性

RCS 频率特性是雷达目标的重要特性之一，用于表征雷达目标 RCS 随入射波频率的变化情况。以垂直边长为 1m 的三角形三面角反射体为例，在给定入射方向为 φ=45°∩θ=90°、φ=15°∩θ=70°、φ=50°∩θ=40°、φ=65°∩θ=20°这 4 种情况下，分别利用 CST 仿真得到入射频率 3～15GHz（步长 0.1GHz）对应的 RCS，结果如图 1.8 所示。可以看出，在 3～15GHz 这一波段范围内，三角形三面角反射体的 RCS 会随入射电磁波频率的升高而变大。

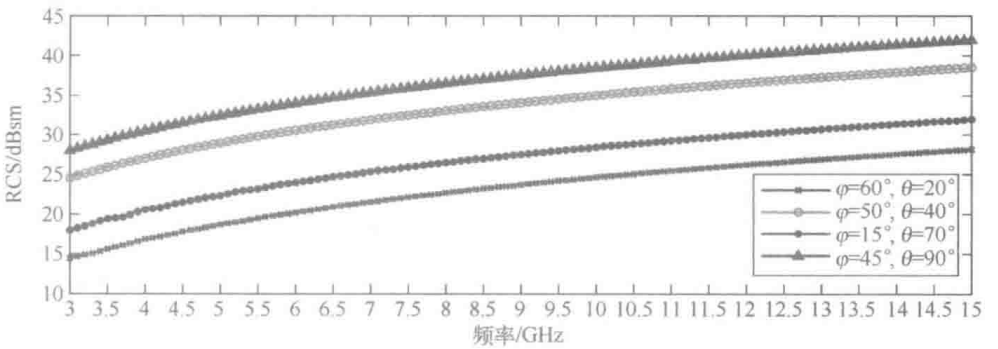


图 1.8　三角形三面角反射体的 RCS 频率特性

1.3.4　角反射体的 RCS 极化特征

极化特征是继能量、频率、相位、结构等特征之后被提出的一类重要的雷达目标特征，通过提取极化信息可以获得表面粗糙度、结构对称性、姿态取向、材料质地等其他参数难以表征的目标特征。文献[9,10]提出利用极化特征进行舰船与

箔条的识别。对于双极化体制的雷达导引头，为抑制海杂波、箔条等干扰，选用垂直极化发射，用垂直极化和水平极化进行接收。假设得到的两个极化通道的雷达回波幅度分别为 A_{VV}（垂直极化发射、垂直极化接收）和 A_{HV}（垂直极化发射、水平极化接收），则最常用的两种极化特征——极化比 ρ 和极化角 Ψ 的定义如下：

$$\begin{cases} \rho = A_{VV} / A_{HV} \\ \Psi = \arctan(\rho) \end{cases} \tag{1.3.1}$$

式中，A_{VV} 和 A_{HV} 可以用 $(RCS_{VV})^{1/2}$ 和 $(RCS_{HV})^{1/2}$ 代替。

计算角反射体极化角的一般步骤为：首先，利用 CST 仿真得到角反射体在俯仰角 90°、方位角 0°～180°（步长 1°）范围内的两种极化通道的 RCS，即 RCS_{VV} 和 RCS_{HV}；然后，根据式（1.3.1）计算得水平入射条件下的极化角方位曲线。

对于垂直边长为 1m 的三角形三面角反射体，当入射波频率为 10GHz，俯仰角 θ=90°、方位角 $\varphi \in 0° \sim 180°$（步长 1°），仿真得到其 RCS_{VV} 和 RCS_{HV} 如图 1.9 所示。

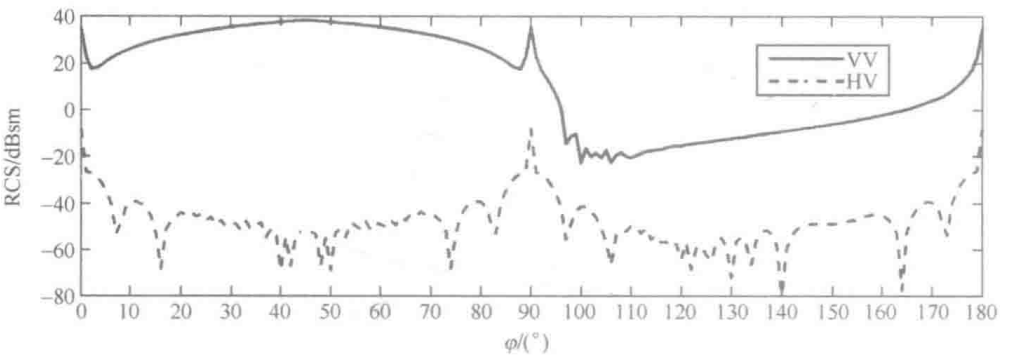


图 1.9　三角形三面角反射体的 RCS_{VV} 和 RCS_{HV}

基于式（1.3.1）计算得到三角形三面角反射体的极化角方位曲线，如图 1.10 所示。

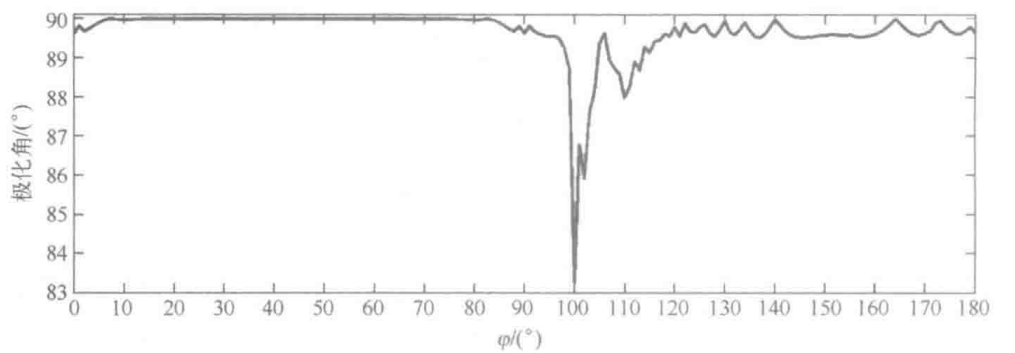


图 1.10　三角形三面角反射体的极化角方位曲线

需要全本请访问 www.ertongbook.com