装备科技译著出版基金

[乌克兰] 奥列格 I·苏克哈雷夫斯基（Oleg I.Sukharevsky） 著

尚社 李小军 宋大伟 李栋 等译

李立 徐进 审校

Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects

空中及地面雷达目标电磁波散射特性

CRC Press
Taylor & Francis Group

國防工業出版社
National Defense Industry Press

需要全本请访问 www.ertongbook.com

装备科技译著出版基金

空中及地面雷达目标电磁波散射特性

Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects

[乌克兰] 奥列格 I·苏克哈雷夫斯基(Oleg I. Sukharevsky) 著
尚 社 李小军 宋大伟 李 栋 等译
李 立 徐 进 审校

国防工业出版社
·北京·

著作权合同登记　图字:军-2016-082 号

图书在版编目(CIP)数据

空中及地面雷达目标电磁波散射特性/(乌克兰)奥列格Ⅰ·苏克哈雷夫斯基(Oleg I. Sukharevsky)著;尚社等译. —北京:国防工业出版社,2018.7

书名原文:Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects

ISBN 978-7-118-11466-9

Ⅰ.①空… Ⅱ.①奥… ②尚… Ⅲ.①雷达目标—电磁波散射—特性 Ⅳ.①TN951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 322247 号

Translation from the English language edition:
Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects
ISBN 978-1-4665-7678-0

Copyright © 2015 by Taylor & Francis Group, LLC
All Rights Reserved.
Authorized translation from the English language edition published by CRC Press, a member of the Taylor & Francis Group, LLC.
本书简体中文版由 Taylor & Francis Group, LLC.授权国防工业出版社独家出版发行。
所售图书若无 Taylor & Francis 的防伪标签,则为非授权的非法出版物。
版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号　邮政编码 100048)
三河市腾飞印务有限公司印刷
新华书店经售
*
开本 710×1000　1/16　印张 20¼　字数 340 千字
2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷　印数 1—2000 册　定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777　　发行邮购:(010)88540776
发行传真:(010)88540755　　发行业务:(010)88540717

译者序

雷达探测的目的是为了获取目标的信息，包括运动参数以及目标几何形状等特征信息。早期的雷达都将目标作为点目标处理，随着高分辨雷达技术的发展，我们可以获取目标更多的细节信息。雷达散射截面积(RCS)是度量雷达目标对入射电磁波散射特征的物理量，也是雷达目标信息中最重要的参数之一。因为其重要性，雷达目标电磁散射特性分析已经发展成雷达技术研究领域的一个独立分支，是雷达系统设计的重要依据。

对于几何形状简单的目标，如球体、无限长圆柱、锥体等，我们可以获得其电磁散射的精确解。但是复杂形状目标，如飞机、坦克等，构成目标的材料可能是金属，也可能是介质或磁性材料，或是有雷达吸波材料(RAM)涂敷，这种外形和材料的组合为目标RCS缩减提供了更多的自由度，但也增加了解析或数值计算的复杂度，这也是译者翻译本书的原因。

本书作者Oleg I. Sukharevsky博士是乌克兰哈尔科夫阔日杜布空军大学研究中心的教授和首席研究员。他主要的研究领域之一便是雷达目标的衍射和散射特性数学理论分析。同时他也是IEEE高级会员、乌克兰荣誉科研人员，出版了5本著作，发表了150多篇学术论文。Sukharevsky博士和他的同事通过大量真实雷达目标窄带和宽带电磁散射仿真计算，获得了宝贵的经验。本书是Sukharevsky博士最新的著作，书中既有电磁学理论分析，也有实际目标的计算实例，为读者掌握复杂目标电磁散射特性计算方法提供了指导。

本书共分为3章。第1章由尚社、宋大伟、温媛媛和王建晓翻译，本章详述了雷达散射电磁学理论的基础，总结了电动力学中洛伦兹互易原理等问题，并将其扩展至各种不规则体或不同填充材料的电磁表面。第2章由李小军、孙文锋、罗熹、范晓彦翻译，本章介绍了复杂形状物体的散射特性分析方法，包括复杂目标的建模与计算方法等。第3章由尚社、李栋翻译，本章基于前面所介绍的理论及计算方法，给出了大量典型空中及地面雷达目标的散射特性和脉冲响应的计算结果。尚社完成了全书的统稿工作。李立、徐进对全书进行了校审，提出了许多宝贵的意见。此外，在本书的翻译过程中，得到了中国空间技术研究院西安分院和空间微波技术重点实验室各位领导和同事的帮助，以及南京理工大学陈如山教授和西安电子科技大学陶海红教授的指导，在此深表感谢。

本书的译者长期从事雷达目标探测技术的研究，具有丰富的理论和实践经验。在翻译本书的过程中，译者力求忠实于原著，但由于时间和翻译水平有限，翻译疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正，以便日后继续完善，不胜感激。

译　者

2018 年 1 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前言

这本书适用于从事雷达及计算电动力学的科研人员和工程技术人员。

本书的内容是作者们工作的编撰，他们工作于由 Sukharevsky 教授于 20 世纪 60 年代在乌克兰戈沃罗夫军事无线电技术学院建立的应用电动力学系。该系的主要科研人员在哈尔科夫军事大学、乌克兰国防联合科学研究所和哈尔科夫阔日杜布空军大学研究中心从事了多种类型目标电磁波散射特性的研究。

空中及地面目标的雷达散射特性研究在整个雷达领域中占有重要的地位，并构成了本书的主要内容。首先，引入了经典电动力学理论的假设，为随后的雷达目标的电磁散射计算方法提供了理论依据。电动力学理论和数值计算方法推广的基本结果是原创的，并在本书的第 1 章和第 2 章中进行了介绍。

本书的第 3 章，为从事雷达探测和识别算法的工程技术人员提供了参考。这一章中包含了大量计算得到的结果：雷达后向散射圆图；不同目标的 RCS 平均值和中间值；不同入射参数，不同下垫面（针对地面目标）时回波信号幅度的概率分布；各种带宽下空中及地面目标的脉冲响应。

本书具有广泛的读者，可供电磁散射理论研究人员、计算电动力学专业人员，以及从事雷达探测与识别算法的无线电物理工程师使用。

本书作者的具体分工：第 1 章由 Oleg I. Sukharevsky 完成；2.1 节 ~2.3 节和 2.5 节由 Vitaly A. Vasilets 和 Oleg I. Sukharevsky 共同完成；2.4 节由 Sergey V. Nechitaylo 和 Oleg I. Sukharevsky 完成（其中 2.4.2 小节由 Vitaly A. Vasilets 和 Oleg I. Sukharevsky 完成）；第 3 章是由 Vitaly A. Vasilets、Sergey V. Nechitaylo、Oleg I.Sukharevsky 和 Valery M. Orlenko 共同完成的。

致谢

Sergey Aleksandrovich Masalov 教授、Yuri Konstantinovich Sirenko 教授、Sergey Petrovich Leshchenko 教授对本书提出了意见和宝贵的建议，使本书内容得到改进，作者在此表示衷心感谢。

作者简介



Oleg I. Sukharevsky 教授 1972 年获得哈尔科夫高尔基大学计算数学学士学位，并作为工程师加入了乌克兰哈尔科夫阔日杜布空军大学，之后一直从事应用数学和计算电动力学领域的研究。Sukharevsky 博士从 1977 年开始研究和开发基于二维积分方程的数值计算方法，用于计算非闭合表面和带天线罩天线的散射特性。1983 年，Sukharevsky 博士获得联合无线技术研究所技术科学学位候选人（准博士），并成为高级研究员。从那时起，开始从事雷达散射现象研究，并针对计算复杂目标，特别是有尖锐棱角和吸波材料覆盖目标的雷达散射截面积，发展了相关的散射理论。1993 年，他获得了乌克兰哈尔科夫阔日杜布空军大学科学博士学位。

1991 年苏联解体后，Sukharevsky 博士从事了各种学术和科研岗位。他先后在戈沃罗夫学院、哈尔科夫军事大学（1993 年）和哈尔科夫阔日杜布空军大学（2004 年）教授应用数学和计算电动力学。1996—2001 年和 2004—2008 年，他作为资深研究员受聘于乌克兰国家科学院乌西科夫（Usikov）无线电物理和电磁学研究所。在苏联解体后的动荡时代，他创办了一所科学学校，培养了众多乌克兰潜在的工程师和科学家。在这一时期，随着计算机技术的爆炸式发展，使得理论电动力学计算方法在计算机上获得了长足进展。个人计算机的出现帮助空中、地面和地下目标散射建模的发展。Sukharevsky 博士和他的同事从事了大量真实雷达目标窄带和宽带电磁散射仿真计算，获得了宝贵的经验。他出版了 5 本英文及俄文著作，发表了 150 多篇学术论文。Sukharevsky 是电气电子工程师学会（IEEE）的高级会员，乌克兰荣誉科研人员。

Sukharevsky 现为乌克兰哈尔科夫阔日杜布空军大学研究中心的教授和首席研究员，他主要的研究领域之一便是雷达目标的衍射和散射特性数学理论分析。

其他作者

Sergey V. Nechitaylo

1996 年毕业于哈尔科夫军事大学无线电子设备和系统专业，2004 年获得雷达专业博士学位。

目前，Nechitaylo 博士是哈尔科夫阔日杜布空军大学空军研究中心的首席研究员和高级科学家。他所感兴趣的领域包括天线理论和各种物体的雷达散射特性。

Valery M. Orlenko

1992 年毕业于日托米尔高等军事学校无线电工程专业，1998 年获得雷达专业博士学位。

目前，Orlenko 博士是哈尔科夫阔日杜布空军大学空军研究中心的首席研究员。他所研究的领域是宽带雷达信号处理方法。

Oleg I. Sukharevsky

1972 年获得哈尔科夫高尔基大学计算数学学士学位，1983 年获得联合无线技术研究所无线电技术科学博士学位，1993 年获得乌克兰哈尔科夫阔日杜布空军大学科学博士学位。

目前，Sukharevsky 博士是哈尔科夫阔日杜布空军大学空军研究中心的首席研究员和教授。他所研究的领域是雷达目标衍射和散射特性数学理论分析。同时他也是 IEEE 的高级会员。

Vitaly A. Vasilets

1991 年毕业于日托米尔高等军事学校防空无线电子系无线电工程专业，1994 年获得雷达专业博士学位。2006 年获得雷达科学博士学位。

目前，Vasilets 博士是哈尔科夫阔日杜布空军大学空军研究中心的首席研究员。他所研究的领域是雷达目标散射特性分析。

缩略语

ADC　Analog-to-Digit Converter 模拟数字转化器
AFR　Amplitude - Frequency Response 幅频响应
ALCM　Air Launch Cruise Missile 空射巡航导弹
AnC　Anechoic Chamber 暗室
AS　Antenna System 天线系统
DFT　Discrete Fourier Transform 离散傅里叶变换
ED　Envelope Detector 包络检波器
EM　Electro-Magnetic 电磁
FFT　Fast Fourier Transform 快速傅里叶变换
GDT　Geometrical Diffraction Theory 几何衍射理论
GO　Geometrical Optics 几何光学
HFA　High-Frequency Amplifier 高频放大器
HRRP　High-Range Resolution Profile 高分辨距离像
IR　Impulse Responses 脉冲响应
LFA　Low-Frequency Amplifier 低频放大器
LFM　Linear Frequency Modulation 线性调频
PDT　Physical Diffraction Theory 物理衍射理论
PO　Physical Optics 物理光学
RA　Reflector Antenna 反射面天线
RAM　Radar Absorbent Material 雷达吸波材料
RCS　Radar Cross Section 雷达散射截面积
RecA　Receive Antenna 接收天线
RV　Radar Visibility 雷达可视性
TPG　Timing Pulse Generator 定时脉冲发生器
TrA　Transmit Antenna 发射天线
TSG　Transmit Signal Generator 发射信号产生器

引言

无论是对于目前以及未来的武器系统分析，还是科学研究或科研规划（如隐身技术规划），亦或是局部战争经验总结，各种空中目标（飞机、巡航导弹等）及地面军事目标（坦克、装甲车等）的散射（二次辐射）特性研究在武器装备发展中具有极其重要的意义。有时，使用雷达可见度一词描述这些目标。值得一提的是，在对空搜索军事雷达中，民用客机和军事目标的散射特性分析同样重要。

一种主流的新型武器装备设计理念是降低巡航导弹、飞机、地面目标（装甲车辆）等的 RCS。

空中及地面目标降低雷达可见度的通常做法是外形的流线化设计及在强散射部位涂覆 RAM。局部强散射通常由几何光学镜面反射和表面缝隙散射所引起。但降低雷达可见度的措施不仅仅是减小散射信号回波功率，还有改变散射特性参数，特别是电磁波的极化特性改变，使得雷达很难探测及识别目标。一个重要的理论及实际的问题是，探测并解释双站及多站情况下雷达目标的散射特性，而这对于研究雷达目标识别提供了帮助。

因此，为了实现目标的探测及识别，现代雷达需要获得目标散射特性的先验信息，如目标表面不规则性、RAM 的涂敷和多站雷达架构。

考虑到获得精确且一致性较好的散射特性实验十分困难，并且造价昂贵，开发基于各种复杂因素的目标散射特性理论计算及数值仿真方法变得十分重要。

可以说明，多站收/发及其他复杂背景的雷达目标散射信号数值模拟仿真在未来雷达目标识别分析时非常有用。仿真可以确定雷达站点的最优化布局和雷达本身参数。

著名的短波衍射方法-几何光学法（GO）、几何绕射理论（GDT）、物理光学法（PO）以及物理绕射理论（PDT）-已经成为经典的理论。但是它们不能在没有修正和推广的情况下直接用于解决雷达散射问题。

本书的主要目的就是开发修正的方法以适用于雷达散射问题的求解。这些方法及大量基于这些方法的研究，反过来，需要进一步发展针对不同散射体结构的雷达散射电动力学理论。

第 1 章介绍了电磁场的基本理论，包括洛伦兹互易定理，对应领域的成像原理分别应用于同一空间中填充不同材料及包含介质、导体、磁铁的空间。总结这些理

需要全本请访问 www.ertongbook.com

论用于获得场的积分公式。通过这些公式,可以计算隐藏面雷达吸波和隔热材料,以及其他多层结构经雷达目标散射的电磁散射场。

在第1章介绍的这些理论中,包含应用在非平整区域(相应的固定相点有椭圆形的,也有双曲型的)二维稳态相位法中的由M.I. Kontorovich(M. I. 康托罗维奇)提出的著名公式。结合非稳态模拟,这个公式对物理光学法做了较大改进以使其适用于计算单站及多站雷达的二次辐射。具体应用时,书中介绍了基于消除终端不连续性的规范解,以及在物理光学近似中,基于消除边界表面电流密度的规范解。

雷达目标重要参数如RCS的计算一般需要大量的理论分析和复杂的数值计算。本书中,RCS计算在严格的物理光学理论和近似计算的范围内被多次描述。除此之外,对于某些类的目标,可以使用实际有效的RCS估算方法,通过在相应的二维问题里两个正交极化入射波单位长度RCS大小计算其三维问题的解。

第1章里讨论的一个重要理论问题是:洛伦兹互易定理是否在某些近似法中,特别是物理光学近似法中也适用。已经证明的是在单站雷达中,洛伦兹互易定理仍然适用,但在多站雷达里,互易定理一般情况下并不适用,这就需要在实际的计算中解释。

第1章中还包括了怎样使用物理光学法在多站雷达中计算平滑目标的脉冲响应(IR)和消除脉冲响应。值得一提的是,脉冲响应的物理光学近似法在已知的研究中约束因素很少,这其中包括了:①只考虑了单基地雷达;②边界是平滑的曲线并且垂直于入射方向,但对非平滑终端的简单平滑(甚至凸的)闭合曲面依然适用。此外,在椭球体的散射中,对来自任意入射方向 $\boldsymbol{R}^0$ 的电磁波,在入射方向 $\boldsymbol{R}^0$ 与椭球的某个半轴平行时,其终端平面与 $\boldsymbol{R}^0$ 正交。

若上述两个条件均满足,则在物理光学近似法中,可以挑选出有效的和部件作为终端表面电流中段的脉冲响应,代入高频近似法中。值得一提的是,上述提到的研究方法都是基于①、②两个条件的,当且仅当两个条件都成立时才可以使用。

书中介绍的基于多站雷达的方法对与入射波方向成任意角度的终端平面都适用(原理上也适用于非平面终端)。书中同样考虑了平滑凸状目标的散射特性及在其多站雷达中的脉冲响应结构特性。从脉冲响应中挑选和排除了终端表面电流密度中段的渐进解。而后者使得脉冲响应方法规范化,并在时域上的衍射"爬行"波的物理光学近似计算精确度。

第2章介绍了计算表面不连续结构及RAM涂覆结构目标的散射特性。

在这一章中,使用渐进法解决表面涂覆RAM的理想电导体在任意多元雷达架构中的散射问题。这种方法基于Stratton-Chu方程的积分形式及其在远区场的渐进解。平面电磁波对有吸波材料涂覆的理想电导体的倾斜入射问题的解用来简化上述方法。这种方法,与棱波法不同,可以很好地适应谐振尺寸的非理想导电散射体和普遍的多站雷达架构。

为了精确估算多元静态雷达系统的椭圆形理想导体反射点对整个散射场的贡献,获得场上两组渐近波束并估计局部散射对整个场的贡献,也包括吸波材料的涂覆的情形。

本书提出的计算目标散射特性的方法已经通过圆柱体、圆锥体等简单物体进行了验证。对一个有限尺寸的圆柱体的散射特性计算,其结果与 FEKO 软件计算结果及暗室(Anechoic Chamber,AnC)实测结果做了对比。

通过本书提出的方法计算巡航导弹模型的 RCS 并与实验数据进行了比较。

空中目标的电磁散射特性计算方法应用到地面目标。考虑"四射线"传播散射波用积分表示。后来产生的四射线表示形式是由于目标及同性质的半空间边界的单一映射。

需要注意的是,反射器天线的散射占整个飞机的总散射场的很大比重,本书的 2.4 节就研究了反射器天线系统(包括机头雷达罩里的天线系统)散射特性的计算方法。

基于第 2 章介绍的方法,计算了目标表面断裂及吸波材料涂覆的复杂目标的散射特性,另外还提出计算表面涂覆的环形电大尺寸反射天线的电磁散射特性的方法。

书中还提出带有尖头屏蔽器的三维反射天线模型的场散射计算的工程方法。这种方法基于几何物理光学估计,并考虑了经过屏蔽器的电磁波及屏蔽器内表面一次反射的电磁波产生的电流密度。

第 2 章包括定义雷达目标的平稳脉冲响应估计(即矩形谱的探测信号的非稳定响应),并举例说明如圆柱体、圆锥体等简单目标的瞬时散射特性计算方法。

第 3 章作为参考,包含了几乎所有空中目标(包括军用或民航,巡航导弹)及陆地装甲装备目标的全方位 RCS 图表(包括光滑的或非不相干的),图表给出不同的入射角对应的极化。这些地面目标的全方位 RCS 图表也考虑了不同的下垫面类型。

当设计雷达目标检测与识别系统时,需要知道目标在不同方位角的 RCS 概率分布。基于此,第 3 章介绍了不同目标对应的 RCS 概率分布、平均值及中间值。

书中还介绍了各种辐射条件下的空中、地面目标的平稳脉冲响应的例子。雷达脉冲响应的重要性在于能显示度量目标随雷达视线变化的反射能力,具有目标的附加信息,为雷达成像与识别提供依据。这种脉冲响应体制也应用在高距离分辨上。

总之,本书集空中和地面目标的散射特性的理论基础、原始计算方法及大量计算结果于一体。

目录

第 1 章　散射电动力学详述——雷达目标二次散射介绍 …… 001

1.1　不同材料填充区域的洛伦兹互易原理概述 …… 001
1.2　基于洛伦兹互易理论获取被无线电射线和雷达吸波涂覆结构干扰的散射区域积分表示的应用 …… 002
1.3　广义图像原理及其应用于解决一些电磁波散射问题 …… 007
1.3.1　广义图像原理 …… 007
1.3.2　目标下底面的散射特性的影响 …… 009
1.3.3　通过辐射口径实现任意系统中散射体的激励场计算 …… 011
1.4　双站雷达中物理光学近似法对非稳定散射问题的规范解 …… 016
1.4.1　给定任意类型非奇异驻点及边缘轮廓奇异幅度函数 …… 017
1.4.2　双站雷达中理想导体平滑凸体的脉冲响应(物理光学法)及消除终端不连续性 …… 026
1.5　物理光学近似法中散射场的互易定理 …… 030
1.6　三维目标的 RCS 及其与二维结构的关系 …… 032

第 2 章　计算散射特性的方法 …… 041

2.1　复杂目标的表面几何模型 …… 042
2.2　非理想反射面空中目标的电磁散射特性计算方法 …… 048
2.2.1　目标表面光滑部分的雷达散射 …… 049
2.2.2　快速振荡方程的表面积分的含量计算 …… 052
2.2.3　渐进法计算双站雷达平滑表面散射特性 …… 055
2.2.4　涂敷吸波材料的局部边沿裂缝的雷达散射 …… 061
2.2.5　简单形状目标散射特性计算方法验证 …… 065
2.2.6　巡航导弹模型的 RCS 计算 …… 068
2.2.7　通过对用于目标表面有限的 RAM 进行最佳分配来减少复杂形状目标的 RCS …… 076
2.2.8　通过优化局部边缘散射体形状减少雷达散射水平 …… 081

2.3 地面复杂形状目标散射特性的计算方法 …… 085
2.3.1 放置在均匀半空间附近的良导体目标的平面电磁波散射 …… 086
2.3.2 地面目标的良导体模型的散射特性 …… 091
2.3.3 不完全反射地面目标 RCS 的计算方法 …… 095
2.3.4 地面目标非理想反射模型的散射特性 …… 101
2.4 反射面天线的散射特性 …… 105
2.4.1 电大尺寸天线的散射特性计算和雷达可视性弱化的方法 …… 106
2.4.2 锥形天线罩下的机载反射面天线三维模型的雷达散射 …… 117
2.5 特定频带信号照射目标的平滑脉冲响应估计 …… 124
第 3 章 空中及地面目标散射特性分析 …… 133
3.1 空中目标的散射特性 …… 133
3.1.1 B-2 战略轰炸机的散射特性 …… 134
3.1.2 B-2 战略轰炸机的脉冲响应 …… 144
3.1.3 图-22M3 远距离轰炸机的散射特性 …… 147
3.1.4 图-22M3 远距离轰炸机的脉冲响应 …… 156
3.1.5 波音 737-400 客机的散射特性 …… 158
3.1.6 波音 737-400 客机的脉冲响应 …… 167
3.1.7 安-26 多用途运输机的散射特性 …… 170
3.1.8 安-26 多用途运输机的脉冲响应 …… 179
3.1.9 米格-29 战斗机的散射特性 …… 182
3.1.10 米格-29 飞机的脉冲响应 …… 193
3.1.11 F-16 多用途战机的散射特性 …… 196
3.1.12 F-16 多用途战斗机的脉冲响应 …… 205
3.1.13 AGM-86 巡航导弹的散射特性 …… 207
3.1.14 AGM-86 巡航导弹的脉冲响应 …… 217
3.2 地面目标的散射特性 …… 219
3.2.1 T-90 主战坦克的散射特性 …… 220
3.2.2 T-90 主战坦克的脉冲响应 …… 236
3.2.3 Leopard-2 主战坦克的散射特性 …… 240
3.2.4 Leopard-2 主战坦克的脉冲响应 …… 256
3.2.5 M1A1 艾布拉姆斯主战坦克的散射特性 …… 260
3.2.6 M1A1 艾布拉姆斯主战坦克的脉冲响应 …… 276
参考文献 …… 280

第1章
散射电动力学详述——雷达目标二次散射介绍

空中和地面目标雷达散射(二次辐射)的解析计算首先需要了解应用电动力学的一系列原理和方法。应用电动力学理论可以很好地解释电磁波散射问题,分析诸多因素,例如,双基地雷达结构下吸波材料涂覆的影响,脉冲雷达特别是超宽带雷达探测,下伏面的影响等。

本章概括总结了电动力学中洛伦兹互易原理和成像方法等问题,并将其扩展至各种不规则体或不同填充材料的电磁表面。基于上述概论可以获得吸波材料涂覆及多层结构(包括下伏面)对于目标雷达信号散射影响的积分方程。

为了更好地分析瞬态目标辐照和双基地雷达等问题,本章进一步研究了驻相法和物理光学方法。

另外,本章还给出了多种基于易于计算的二维目标模型的三维雷达散射截面积(RCS)分析结果。

1.1 不同材料填充区域的洛伦兹互易原理概述

积分表示是定量研究和解决应用电力学和雷达实际问题的有效手段。在这些表达式中,基本和辅助的电磁场一般对应空间不同的非均匀的填充物区域。后者为利用适当的广义洛伦兹互易原理形成这样的表示提供了便利。

本节将给出洛伦兹互易原理的概述,利用定理,以金属散射系统为例,形成或研究由于电介质和雷达吸波材料不规则而影响整个衍射场的修正的积分场表达式(1.2节)。

定义空间区域 V 填充了各向同性但非均匀介质,其介电常数为 $\varepsilon_1(\boldsymbol{x})$,磁导率为 $\mu_1(\boldsymbol{x})$,该区域存在外加电流密度为 $\boldsymbol{J}_1^e(\boldsymbol{x})$ 的电流和强度为 $\boldsymbol{E}_1(\boldsymbol{x})$、$\boldsymbol{H}_1(\boldsymbol{x})$ 的电磁场,另外存在强度为 $\boldsymbol{E}_2(\boldsymbol{x})$、$\boldsymbol{H}_2(\boldsymbol{x})$ 的电磁场,其介电常数为 $\varepsilon_2(\boldsymbol{x})$,磁导率为 $\mu_2(\boldsymbol{x})$,其外加电流密度为 $\boldsymbol{J}_2^e(\boldsymbol{x})$。因此对于空间区域 V:

$$\begin{cases} \mathrm{rot}\boldsymbol{E}_\alpha = \mathrm{j}\omega\mu_\alpha \boldsymbol{H}_\alpha \text{①} \\ \mathrm{rot}\boldsymbol{H}_\alpha = -\mathrm{j}\omega\varepsilon_\alpha \boldsymbol{E}_\alpha + \boldsymbol{J}_\alpha^e \end{cases} \quad (\alpha = 1,2) \tag{1.1}$$

对于式(1.1),通常假设区域 V 直到其边缘表面 L 都是光滑的,因此可以得到

$$\begin{aligned} \mathrm{div}[-(\boldsymbol{E}_1 \times \mu_2\boldsymbol{H}_2) + (\boldsymbol{E}_2 \times \mu_1\boldsymbol{H}_1)] &= \mathrm{j}\omega(\varepsilon_1\mu_1 - \varepsilon_2\mu_2)\boldsymbol{E}_1 \cdot \boldsymbol{E}_2 \\ &+ [\mu_2\boldsymbol{J}_2^e + (\nabla\mu_2 \times \boldsymbol{H}_2)] \cdot \boldsymbol{E}_1 \\ &- [\mu_1\boldsymbol{J}_1^e + (\nabla\mu_1 \times \boldsymbol{H}_1)] \cdot \boldsymbol{E}_2 \end{aligned} \tag{1.2}$$

根据奥-高理论[10],可以得到以下公式:

$$\begin{aligned} \int_L [\mu_2\boldsymbol{E}_1^T \cdot \boldsymbol{H}_2^\perp - \mu_1\boldsymbol{E}_2^T \cdot \boldsymbol{H}_1^\perp]\mathrm{d}s &= \mathrm{j}\omega\int_V (\varepsilon_1\mu_1 - \varepsilon_2\mu_2)\boldsymbol{E}_1 \cdot \boldsymbol{E}_2 \mathrm{d}V \\ &+ \int_V \{[\mu_2\boldsymbol{J}_2^e + (\nabla\mu_2 \times \boldsymbol{H}_2)] \cdot \boldsymbol{E}_1 \\ &- [\mu_1\boldsymbol{J}_1^e + (\nabla\mu_1 \times \boldsymbol{H}_1)] \cdot \boldsymbol{E}_1\} \mathrm{d}V \end{aligned} \tag{1.3}$$

其中,符号 $\boldsymbol{A}^T$ 和 $\boldsymbol{B}^\perp$ 的计算方法如下:

$$\boldsymbol{A}^T = \boldsymbol{A} - \boldsymbol{n}(\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{A}), \qquad \boldsymbol{B}^\perp = \boldsymbol{n} \times \boldsymbol{B} \tag{1.4}$$

式中:$\boldsymbol{n}$ 为从外部指向 V 的单位法线矢量。

这里需要指出的是,当 $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 = \mathrm{const}$,$\mu_2 = \mu_1 = \mathrm{const}$,式(1.3)变成常规的洛伦兹积分。对式(1.3)进行如下变换:

$$\boldsymbol{E}_\alpha \leftrightarrow \boldsymbol{H}_\alpha, \qquad \boldsymbol{J}_\alpha^e \leftrightarrow \boldsymbol{J}_\alpha^m, \qquad \varepsilon_\alpha \leftrightarrow -\mu_\alpha \quad (\alpha = 1,2)$$

即可表示电磁电流激励的磁场等式的表达式:

$$\begin{aligned} \int_L [\varepsilon_2\boldsymbol{E}_2^T \cdot \boldsymbol{H}_1^\perp - \varepsilon_1\boldsymbol{E}_1^T \cdot \boldsymbol{H}_2^\perp]\mathrm{d}s &= \mathrm{j}\omega\int_V (\varepsilon_1\mu_1 - \varepsilon_2\mu_2)\boldsymbol{H}_1 \cdot \boldsymbol{H}_2 \mathrm{d}V \\ + \int_V \{[\varepsilon_2\boldsymbol{J}_2^m - (\nabla\varepsilon_2 \times \boldsymbol{E}_2)] \cdot \boldsymbol{H}_1 - [\varepsilon_1\boldsymbol{J}_1^m - (\nabla\varepsilon_1 \times \boldsymbol{E}_1)] \cdot \boldsymbol{H}_2\} \mathrm{d}V \end{aligned} \tag{1.3'}$$

式(1.3)是在非均匀介质的空间 V 内填充了不同材料的条件下的洛伦兹互易理论[4,11]的归纳。

如果空间 V 是无界的,为了确保式(1.3)的有效性,式(1.3′)必须在有限区域外加电流以满足辐射条件[4,11]。

洛伦兹互易理论其他形式的表达式将在后续章节中给出。

1.2 基于洛伦兹互易理论获取被无线电射线和雷达吸波涂覆结构干扰的散射区域积分表示的应用

假设 L 是一系列理想导电体 $V_1^+, V_2^+, \cdots, V_M^+$ 的边界面,并且在外部区域 V,定义

①全书中散射场的时域相关性假设为 $\exp(-\mathrm{j}\omega t)$ 的形式。

需要全本请访问 www.ertongbook.com