



陕西出版资金资助项目



西电学术文库

典型地面环境 雷达散射特性与电磁成像

*Radar Scattering Features and Electromagnetic
Imaging for Typical Terrain Environments*

张 民 魏鹏博 著
江旺强 王 超

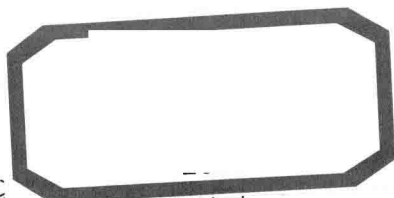


西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

西安电子科技大学



陕西出版集团
西电学术文库



典型地面环境雷达散射特性 与电磁成像

张 民 魏鹏博
江旺强 王 超



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书比较系统和完整地阐述了从典型地面环境的几何建模、雷达散射特性到电磁成像仿真的过程中所涉及的相关理论与方法。全书内容主要包括沥青、水泥、裸土、草地和沙地五种典型地面环境的几何建模方法、典型地面环境电磁散射的基本模型和相关快速算法、典型地面场景电磁散射的分布特性研究、典型地面场景电磁散射分布的统计方法模拟、典型地面场景的电磁成像模拟以及较为系统的典型地面电磁散射结果汇总等。本书力求从典型地面环境雷达散射模型出发,通过统计方法,获得快速模拟地面环境的雷达回波(杂波)的预估模型,应用于地面环境的电磁成像仿真中,并将地面目标雷达散射特性和电磁成像仿真中的新模型及算法介绍给读者,使读者能够掌握地面环境雷达目标特性和电磁成像的本质,灵活解决实际工程问题。

本书可作为从事雷达设计与评估、地面微波遥感、雷达目标与环境特性、电磁成像算法与图像理解等相关研究的科研人员的参考书,也可作为高等学校相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

典型地面环境雷达散射特性与电磁成像/张民等著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2016.5
ISBN 978 - 7 - 5606 - 3942 - 0

I. ①典… II. ①张… III. ①地面雷达—雷达目标—散射—特性—研究
②地面雷达—电磁波散射—雷达成像—研究 IV. ①TN959.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 078837 号

策 划 马乐惠

责任编辑 许青青 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2016年5月第1版 2016年5月第1次印刷

开 本 787毫米×960毫米 1/16 印 张 18

字 数 371千字

印 数 1~3000册

定 价 38.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3942 - 0/TN

XDUP 4234001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

典型地面环境的雷达散射特性和电磁成像技术,是地面环境中复杂目标(建筑物、机车等)的特征提取和识别的关键所在,广泛应用于地面遥感、目标分类识别和环境监测等领域,也是对地高分辨雷达观测研究中急需解决的共性基础课题和学科前沿。

这一切技术的实现和发展都离不开对于电磁波特性以及电磁波与外界环境作用等问题的研究。就地物电磁散射的问题而言,自20世纪40年代有关地物波谱特性研究的书籍出版以来,人们在与此相关的观测和研究方面做了大量的工作。经过几十年的理论和实验研究,到目前为止,有关地物电磁散射的实际观测和理论研究基本上覆盖了遥感所使用的各个波段,获得了大量的实测数据和针对各种地物(土壤、沙地、植被、岩石、水体、冰雪及人工建筑等)的相对完善的理论模型,基本上满足了实际应用(如通信、遥感、目标识别、环境监测等)的要求,人们对于解释地面电磁散射现象的基本模型已经达成了广泛的共识。然而,对于一些更高要求的实际应用,现有的理论还有待进一步的修改和完善,地面环境的电磁散射特性的研究无疑成为了众多科研人员共同感兴趣的课题。例如,在雷达识别陆地目标时,地面环境背景噪声的影响会降低目标识别的精度,增加虚警概率。目前人们面临的难题是,如何建立雷达特征信号与被测目标之间的对应关系和如何消除杂波干扰。要解决这些难题,迫切要求对地面环境所引起的背景噪声规律进行深入了解。可通过建立地面环境电磁散射的理论模型来研究其电磁散射特性,再利用所获得的散射特性有效地估算雷达背景噪声,去除杂波,达到有效辨认和识别目标的目的。此外,虽然国内外同类论著也给出了一些传统的电磁散射建模和杂波分析方法以及部分典型地面环境电磁散射的测量数据与结果分析,但都各有所专,未能对地面电磁散射的相关问题及其之间所存在的联系进行系统阐述,并且具体散射数据与地面环境特征对应不清,研究结果难以借鉴。

鉴于此,形成一套系统和完整的地面环境电磁散射问题分析手段无疑是必要且紧迫的,本书即是在这一主旨下进行的一次探索和实践。立足于典型地面环境电磁散射的相关具体问题,本书力求能够较为全面地将与典型地面电磁散射问题相关的模型、方法和具体结果为读者作一介绍。在实际的电磁散射问题中,所涉及的环境往往是某个具体的场景样本,如某个确定的粗糙面样本或某个体分布场景,本书首先对沥青、水泥、裸土、草地和沙地五种典型地面场景的几何建模进行了介绍,包括单一尺度随机粗糙面、双尺度随机粗糙面以及植被的几何建模等。接着对与地面环境电磁散射问题相关的理论模型做了探讨和示例性的说明,具体包括关于粗糙面电磁散射的微扰法、积分方程方法和小斜率近似方法,以及关于植被电磁散射的矢量辐射传输理论和蒙特卡罗数值模拟方法。而针对植被电磁散

射问题计算中出现的计算量大和耗时巨大的问题,还利用了通用并行计算架构(CUDA)技术在计算领域的显著优势将植被电磁散射的上述两种模型与 CUDA 并行技术相结合,以实现植被电磁散射问题的快速计算。继而,为了解决传统基于实测数据的杂波分析所存在的成本巨大和数据种类单一等问题,在以上电磁散射模型的基础上,结合统计学中的估计分析和检验方法,以较小的地面场景为对象,对典型地面环境场景电磁散射的统计特征进行了较为系统的整理和归纳。进一步,为了获得典型地面环境大场景的散射分布情况,以小面积散射的统计特性结果为基础,利用二维相关杂波的模拟方法,对典型地面大场景的散射分布进行了模拟,并与之前的小面积情形下的结果进行了比较。在以上内容所奠定的基础上,典型地面环境散射的成像模拟便呼之欲出了,于是接下来介绍了合成孔径雷达成像的基本原理并结合上述电磁散射计算结果对典型地面环境进行了电磁成像模拟。最后,较为完整和系统地给出了五种典型地面环境电磁散射问题的散射系数及统计特性计算结果,以便读者比照和查阅。

本书总共包括五章,涵盖典型地面环境的几何建模、典型地面环境的电磁散射模型、典型地面环境场景电磁散射统计特征、典型地面环境电磁散射的场景分布模拟、基于模型的典型地面环境的电磁成像模拟等内容。书中采用 $e^{j\omega t}$ 来表示时谐场中的时间因子。

本书的编写凝结了复杂环境中目标电磁散射与雷达成像团队老师及研究生的辛劳和汗水。这里特别感谢团队中的罗伟博士、赵言伟博士、聂丁博士、陈琿博士、孙荣庆博士、罗根博士、王成博士、王欣博士、张锐博士、李宁博士、赵晔博士、王佳坤博士和陈俊龙博士,以及各届博士和硕士研究生。本书同时得到了西安电子科技大学文库专项基金、国家自然科学基金(61372004、41306188、60871070)、中央高校基本科研业务费专项资金、特别是目标与环境电磁散射辐射重点实验室基金的资助。此外,中国航天科工集团二院 207 研究所、北京电子工程总体研究所、中国兵器工业集团 212 所、中国电子科技集团 22 所和西安卫星测控中心对本书的相关研究也给予了大力支持,在此深表感谢。

本书是作者及所在团队近年来对地面电磁散射特性研究工作所作的初步总结,也是作者多年来带领诸多研究生在该问题探索之路上的记录和沉淀。鉴于问题的复杂性和作者水平所限,书中之不足及纰漏在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 1 月于西安

目 录

绪论	1
第 1 章 典型地面环境的几何建模	5
1.1 随机粗糙面特性描述	5
1.1.1 高度概率分布	5
1.1.2 粗糙面相关性描述	7
1.2 单一尺度地面的几何建模	9
1.2.1 沥青粗糙面	11
1.2.2 水泥粗糙面	12
1.2.3 裸土粗糙面	13
1.3 草地地面的几何建模	14
1.4 双尺度地面的几何建模——沙地	15
1.5 本章小结	18
参考文献	19
第 2 章 典型地面环境的电磁散射模型	20
2.1 微扰法	20
2.2 积分方程方法	23
2.3 小斜率近似方法	32
2.3.1 锥形波	33
2.3.2 小斜率近似方法理论	35
2.3.3 小斜率近似方法算例及检验	39
2.4 植被电磁散射的矢量辐射传输理论	45
2.4.1 矢量辐射传输方程	46
2.4.2 矢量辐射传输方程的迭代解	48
2.4.3 农作物电磁散射算例	52
2.5 植被电磁散射的蒙特卡罗数值模拟方法	55
2.5.1 电磁散射模型	56
2.5.2 蒙特卡罗模拟及数值结果	59
2.6 植被电磁散射的 CUDA 加速算法	62
2.6.1 矢量辐射传输理论 CUDA 并行方法	62
2.6.2 蒙特卡罗四路径方法 CUDA 并行方法	66
2.7 本章小结	71
参考文献	72

第 3 章 典型地面环境场景电磁散射统计特征	75
3.1 统计意义下的概率分布模型	75
3.1.1 标准模型——相干斑杂波理论	76
3.1.2 经验分布模型	78
3.2 统计分布中的参数估计	80
3.2.1 矩估计	80
3.2.2 最大似然估计	81
3.2.3 一些特殊分布的参数估计	82
3.3 统计分布的检验	84
3.3.1 χ^2 拟合检验法	84
3.3.2 K-S 拟合检验法	85
3.4 典型地面单元散射的统计特征	86
3.4.1 沥青地面统计结果	87
3.4.2 水泥地面统计结果	99
3.4.3 裸土地面统计结果	111
3.4.4 草地地面统计结果	123
3.4.5 沙地地面统计结果	135
3.5 本章小结	148
参考文献	148
第 4 章 典型地面环境电磁散射的场景分布模拟	150
4.1 二维相关杂波模拟及特殊随机数生成	150
4.2 典型地面场景电磁散射分布模拟	153
4.2.1 沥青地面	153
4.2.2 水泥地面	159
4.2.3 裸土地面	164
4.2.4 草地地面	169
4.2.5 沙地地面	174
4.3 本章小结	182
参考文献	183
第 5 章 基于模型的典型地面环境的电磁成像模拟	184
5.1 典型地面环境 SAR 成像的 RD 算法	185
5.1.1 合成孔径雷达基本原理	185
5.1.2 地面场景的条带 SAR 距离多普勒(RD)算法	189
5.2 典型地面环境 SAR 图像仿真与分析	197
5.2.1 载频为 8 GHz 时单一场景 SAR 成像结果	197
5.2.2 载频为 17 GHz 时单一场景 SAR 成像结果	200
5.2.3 载频为 17 GHz 时组合场景 SAR 成像结果	204

5.3 本章小结	207
参考文献	208
附录 A 典型地面不同参数情形下电磁散射结果	209
A.1 不同电磁波频率结果比较	210
A.2 不同地面参数结果比较	216
附录 B 典型地面场景散射单元散射场值结果统计	228
B.1 沥青地面	228
B.2 水泥地面	239
B.3 裸土地面	250
B.4 草地地面	261
B.5 沙地地面	271

绪 论

自 20 世纪 40 年代有关地物波谱特性研究的书籍出版以来,人们在地物电磁散射特性的观测和研究方面展开了大量的工作。60 年代美国发射了地球资源卫星,从而全面展开了地物电磁散射特性的研究。到 70~80 年代,这一方面的研究进入了一个高潮。到目前为止,有关地物电磁散射的实际观测和理论研究基本上覆盖了遥感所使用的各个波段,获得了大量的实测数据和针对各种地物(植被、土壤、沙地、沥青、水泥、岩石、水体、冰雪及人工建筑等)的相对完善的理论模型,基本上满足了实际应用(如通信、遥感、目标识别、环境监测等)的要求。然而,对于一些更高要求的实际应用,如对地高分辨观测,现有的理论还有待进一步的修改和完善,地物电磁散射特性的研究无疑成为了众多的研究人员共同感兴趣的课题。众所周知,在雷达识别陆地目标时,地物背景噪声的影响会降低目标识别的精度,增加虚警概率。目前人们面临的难题是:如何建立雷达特征信号与被测目标之间的对应关系和如何消除杂波干扰。要解决这些难题,迫切需要对地物背景的散射特性及其引起的背景噪声规律进行深入了解。可通过建立典型地物、植被背景的理论模型来研究其电磁散射特性,再利用所获得的散射特性有效地估算雷达背景噪声,去除杂波,达到有效辨认和识别目标的目的。

在本书所讨论的五种典型地面的电磁散射特性研究中,按照所应用的电磁模型理论,可将其分为两类:一种是粗糙面的电磁散射问题;另一种是植被的电磁散射问题。鉴于它们各自的建模方法差异较大,下面对这两类电磁散射问题作一简单叙述。

随机粗糙表面电磁散射理论的研究方法大致可以分为两种:一种是理论近似方法,如基尔霍夫近似方法(KA)、微扰法(SPM)、双尺度方法(TSM)、小斜率近似方法(SSA)、积分方程方法(IEM)等;另一种是数值方法,如矩量法(MoM)、有限差分方法(FDTD)、有限元方法(FEM)及迭代方法。对于数值方法,它是在严格的物理意义下通过严密的数学推导得到的,计算精度高,但由于其计算复杂、耗时严重且实现难度大,一般只被应用于电小尺寸的电磁散射问题;理论近似方法则是根据具体的某一类问题采用不同的物理近似来获得散射场或散射截面,可很大程度上简化问题的复杂度。对于一般的大粗糙面场景和高频电磁散射问题,一般首选的就是理论近似方法。基尔霍夫近似方法基于切平面近似,要求粗糙面的曲率半径远远大于入射波波长,这时就可以假设入射波好像照射到与该点相切

的一个无限大平面上,因此只适用于大曲率半径或局部光滑表面。微扰法适用于表面高度起伏小于入射波波长的情况,即粗糙度较小的表面,而且一般要求粗糙面的均方根斜率远小于1。双尺度方法虽然拓展了粗糙面散射的使用范围,但这种方法的缺点在于计算时引入了截止波数的概念来区分大尺度和小尺度粗糙面,而截止波数的确定方法目前尚无定论,因此就需要一种简单易行、适用范围广、计算精度高的电磁散射模型。近年来被广泛使用的小斜率近似方法是一种有效的电磁散射计算方法,在地面和海面的电磁散射领域均有重要的应用。该方法适用于任意波长和高度起伏的粗糙面,而只需要粗糙面有较小的均方根斜率,它是基于表面斜率级数展开的较为精确的近似方法,特别是在大散射角时比较准确,通过保留级数展开的项数可以得到各阶近似,在一定条件下可以退化到基尔霍夫近似和微扰法的结果,因此在一定程度上是粗糙面电磁散射的一种统一理论。鉴于以上原因,本书中对于大多数粗糙面电磁散射的问题应用了小斜率近似方法的电磁模型。此外,积分方程方法也是一种有效计算粗糙面电磁散射问题的方法,由于是在基尔霍夫近似方法的基础上增加了修正项,所以计算精度较高。但由于它是基于统计意义上的电磁模型,所以只能给出随角度变化的平均意义上的散射系数值,而不能给出某一确定粗糙面轮廓下的局部散射场,因此只应用于特定的实际问题或作为其它电磁散射模型的参考。

对于植被散射问题,实际植被情况是丰富多彩而又非常复杂的,各种生物量随季节、气候、生长期的不同而不同,实验的结果总是带有一定的局限性,因此从理论上研究植被散射特性与其各种参数之间的定量关系具有更大的潜力。理论上研究电磁波与植被之间相互作用时,通常将植被模拟成随机介质,研究的理论基础为电磁波的随机介质理论。植被的电磁散射问题主要基于随机介质中波传播和散射的电磁理论,其主要方法可归结为两类:解析波理论和辐射传输理论(RT)。解析波理论从Maxwell方程出发,建立场的方差或相关函数等统计量的微分和积分方程。原则上,这种理论考虑了波在传播过程中的多次散射、衍射、干涉等效应,在数学上是严格的。但是,实际上难以得到包括这些效应的完全解。因此,各种近似模型和数值方法获得了迅速发展,如广义Born近似、重正则方法等。辐射传输理论则根据波在介质中传播时的能量守恒,建立辐射强度满足的微积分方程,即辐射传输方程,考虑了散射、吸收、多次散射及源的贡献。但辐射传输理论采用的是强度的叠加,忽略了场之间的相干性,从而具有一定的局限性。近年来,随着计算机技术的发展,Monte-Carlo(蒙特卡罗)数值模拟技术在随机介质的波散射研究中得到了广泛的应用。本书的草地地面的电磁散射特性问题中便使用到了这一方法,草地被看成了一层尺寸、空间取向等随机分布的散射体。此模型有如下优点:①该模型考虑了植被与地面散射场的相互作用;②该模型考虑了草叶的尺寸和方向取向;③该模型是一种场模型;④该模型是一种全极化模型。

进一步地,在目标的探测和识别过程中,由于目标存在于周围的自然环境中,环境对雷达电磁波也会产生散射,从而对目标信号的检测产生干扰,这些干扰就称为雷达杂波。

通过研究雷达杂波的信号特征,可以为雷达杂波对消设计提供理论依据和支持。雷达杂波历来是雷达科技工作者和观测者十分关注的课题,很多情况下,限制雷达探测能力的不是接收机的内部噪声,而是环境杂波。研究杂波的形成机理、杂波的反射强度与雷达参数的关系,讨论杂波的分布特性等都可以为制订雷达方案、选择雷达参数、压制杂波的干扰、模拟仿真杂波等工作提供理论依据,指明技术方向,避免雷达的设计研究工作一定程度上的盲目性。

近几十年来,人们对雷达杂波问题进行了大量的理论研究和试验测定,对雷达杂波的特性认识已经逐渐深入,先后建立了几种雷达杂波统计模型,包括瑞利分布、对数正态分布、韦布尔分布和 K 分布等。对杂波进行分析,建立准确的杂波统计模型以及相应的仿真方法,一方面可以为雷达模拟器提供逼真的杂波环境模型;另一方面也有助于雷达杂波对消器的设计和实现,从而提高雷达抑制杂波能力,提高探测性能。所以,研究雷达环境特性,对提高雷达性能有着十分重要的意义。

雷达环境杂波的建模主要有两种方式:第一种方式为杂波的散射机理建模;第二种方式为杂波的统计建模。杂波散射机理模型的研究属于地物电磁散射的理论分析范畴。杂波的理论分析就是根据电磁散射理论对特定的地物场景进行电磁建模,并利用各种计算方法和计算机技术对电磁模型的结果进行定量预估,从而获得杂波的空间及时间分布特性。一般地,求解电磁散射问题的方法主要有数值方法和理论近似方法两种。数值方法是对建立好的电磁散射模型(微分方程或积分方程等)应用数值方法求解问题的一种方式。应用数值方法所得的结果具有较高的精度,但其耗时严重,而且不易于实现,虽然现在有很多基于计算机并行加速的方法,但其还是无法满足实际中对于电大尺寸场景及高频情况计算的要求,因此该方法也仅仅被应用于一些电小尺寸和低频的情形。理论近似方法则是对于电磁散射问题根据具体的情况在理论上做一些近似处理的方法。理论近似方法具有耗时短、易于实现及应用范围广等优点,因此成为了实际场景下杂波散射机理建模的第一选择。值得注意的是,尽管理论近似方法与数值计算方法相比已经大大降低了计算的复杂度和计算时间,但对于实际的仿真需要来说还是远远不能满足要求,特别是对于一些大场景的杂波建模。此时,杂波的统计建模便成了较好的选择。雷达杂波是雷达波束范围内许多散射体回波的矢量和。由于雷达波束内包含许多随机分布的散射体,它们的介电常数和几何特性都是随机的,同时散射体或雷达的运动也会引起回波振幅和相位的变化,因此杂波的雷达散射截面积具有起伏特性。根据概率和数理统计相关理论,可以将杂波散射现象理解为与散射背景形态相关的随机过程,即采用杂波幅度的概率分布模型和杂波相关模型来描述。

自 20 世纪 70 年代起,国外的众多学者就致力于雷达统计模型的研究。一开始人们把杂波当成高斯噪声,后来通过对窄脉冲雷达回波的测量,发现用 Gaussian 分布来描述杂波是不够的,杂波分布函数表现出一个较长、较大的拖尾。20 世纪 80 年代人们发现 Log-Normal 分布和 Weibull 分布可以较好地对数据进行拟合。随着研究的深入,很多其它种类的分布也

被应用到杂波分布的描述中,如 Gamma 分布、Rice 分布、极值分布等。到 20 世纪 90 年代中后期,K 分布杂波模型逐渐成熟起来,迄今为止它是一种模拟海杂波的最好模型。值得注意的是,对于各种类型杂波数据分布的描述,似乎不存在这样一个综合的表达式:它能够概括所有现有的和常用的分布密度函数。但是,对于上述几种概括化的杂波分布模型,由于对各种分布模型的选用具备了灵活性,并且能够在特定条件下更精确地逼近真实的数据特性,因此杂波幅度用概率密度函数建模还是具备很强的理论和实际意义的。杂波回波信号间的相关性一般用相关函数来描述,包括时域相关函数和空间相关函数。杂波的时域相关性(功率谱)是指来自同一区域杂波回波信号间的相关性。杂波空间相关性是指径向的两块分离区域杂波回波信号间的相关性,即来自不同分辨单元的雷达散射截面均值的相关性。有了某种特定环境下杂波的概率分布特性及杂波信号间的时间相关性或空间相关性,就可以方便、快速地生成该环境下时间上或空间上的杂波序列。

然而,由于实测成本较高,要得到不同环境条件下的杂波样本是十分困难的。为此,本书结合杂波的电磁理论建模和杂波的统计建模,由电磁理论建模生成满足杂波统计建模的样本集,然后在该样本集的基础上对该条件下的杂波进行统计建模。至此,一幅大场景的杂波模拟便可由该统计模型快速而高效地实现。此外,对于具有相关性的杂波进行仿真时,应用最多的有两种方法:一种是零记忆非线性变换方法(ZMNL),另一种是球不变随机过程法(SIRP)。用 SIRP 建立的模型属于外生模型,能够独立控制杂波序列的概率密度函数和协方差矩阵,它的缺点是受所需仿真序列的阶数和自相关函数的限制,且当所需的仿真序列较长时计算量很大,不易实现快速算法。相比于 SIRP,ZMNL 易于实现,并且在相关 Gaussian 序列产生后仿真速度较快,是目前在相关雷达杂波仿真中最受瞩目的方法,并在实际工程中得到了广泛应用,因此也为本书所采用。

进一步地,近年来由于超大规模数字集成电路的发展、高速数字芯片的出现以及先进的数字信号处理算法的发展,合成孔径雷达(SAR)已经具备了全天候、全天时工作和实时处理信号的能力。它在不同频段、不同极化下可得到目标的高分辨率雷达图像,为人们提供非常有用的目标信息,已经被广泛应用于军事、经济和科技等众多领域,有着广泛的应用前景和发展潜力。在应用本书的模型和方法得到地面场景散射场幅度和强度分布的基础上,结合 SAR 系统的成像原理,就可以对典型地面环境场景进行 SAR 成像模拟仿真,从而在 SAR 系统的预研和设计阶段为方案的实施提供积极的参考和指导。

第1章 典型地面环境的几何建模

在实际的电磁散射问题中,所涉及的环境往往是某个具体的场景样本,如某个确定的粗糙面样本或某个体分布场景。为此,在地面环境的电磁散射计算问题中,就需要先对地面环境的场景进行几何建模。对于某个粗糙面样本或体分布场景,其面上各点的高度或体元的分布和姿态都是随机的,无法用函数或其它数学方法进行具体表述,而只能在统计意义上给予分析和研究,即随机场问题。本章首先讨论随机场所具有的一些基本性质及对其进行分析和描述时所用的一些数学方法^[1];其次具体给出几种典型的地面粗糙面的建模方法,包括单一尺度随机粗糙面和双尺度随机粗糙面;最后描述具有随机体分布形式的草地场景的几何建模方法。

1.1 随机粗糙面特性描述

对于一个随机粗糙面,其各点的高度是随机变化的,而在高度描述时所参考的标准一般是一个光滑的表面。对该参考光滑表面的选择往往是根据随机粗糙面的大尺度结构特征而确定的。例如,一个粗糙圆柱面的高度描述是以一个光滑柱面为参考的,而一个随机地面则是以光滑水平面为参考平面的。对随机粗糙面的描述有两个方面,即垂直于参考面和沿参考面的各点高度变化。对于这两个方面,可以用很多统计参量进行描述,而它们之间有很多参量是相互等价的,这里主要讨论随机粗糙面的高度概率分布函数和相关函数,这些函数也将会在电磁散射理论中的统计模型部分用到。

1.1.1 高度概率分布

设以光滑参考面为标准的随机粗糙面的高度分布函数可以表示为 $z(\mathbf{r})$, 其中 z 为距离参考面的高度, $\mathbf{r}$ 为参考面上一点的位置矢量, 这里随机粗糙面可以被看做连续的随机场 z 。设该粗糙面高度的概率密度函数(PDF)为 $p(z)$, 则 $p(z)dz$ 表示在均值参考面参考下粗糙面上各点高度在 z 和 $z+dz$ 之间的概率。一般地, 设

$$\langle z \rangle_s = \int_{-\infty}^{\infty} zp(z)dz = 0 \quad (1.1)$$

其中, $\langle \dots \rangle_s$ 表示空间意义上的平均, 即对各粗糙面上的点做平均。该定义可以有效简化后续粗糙面电磁散射问题的计算, 而实际中对于粗糙面高度的测量也会通过参考面的选择而保证式(1.1)的条件。粗糙面的均方根高度(RMS)是在随机粗糙面生成过程中用到的一个重要参数, 即空间统计意义上的标准差。鉴于式(1.1)中的定义, 粗糙面的均方根高度可以表示为

$$\sigma = \sqrt{\langle z^2 \rangle_s} \quad (1.2)$$

除此之外, 还有其它一些用于描述粗糙面高度分布特性的参数, 如中心线平均或算术平均, 可定义为

$$R_{\text{cla}} = \int_{-\infty}^{\infty} |z| p(z) dz \quad (1.3)$$

对于已知的概率密度函数 $p(z)$, 参数 R_{cla} 与均方根高度 σ 有着确定的联系。例如, 对于具有高斯分布的粗糙面, 有如下关系:

$$R_{\text{cla}} = \sigma \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} \approx 0.8\sigma \quad (1.4)$$

还有一些参数, 如粗糙面最大高度、粗糙面最小高度及最大高度与最小高度差等, 都是与粗糙面特性有关的参数。然而这些参数在以后粗糙面的生成过程中及电磁散射问题中没有特别涉及, 这里也不对它们做详细讨论。

多数有关随机粗糙面的文献中都假设其高度分布服从高斯分布(正态分布)^[2-4], 则对于某一满足式(1.1)的随机粗糙面, 其高度概率密度函数可表示为

$$p(z) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (-\infty < z < +\infty) \quad (1.5)$$

图 1.1 给出了均值为 0、均方根值为 σ 的高斯分布曲线图。其中, 高度分布在以 0 值为中心、长度为 2σ 的区间内的概率为 68.26%。此外, 对于高斯分布粗糙面, 其分布于参考

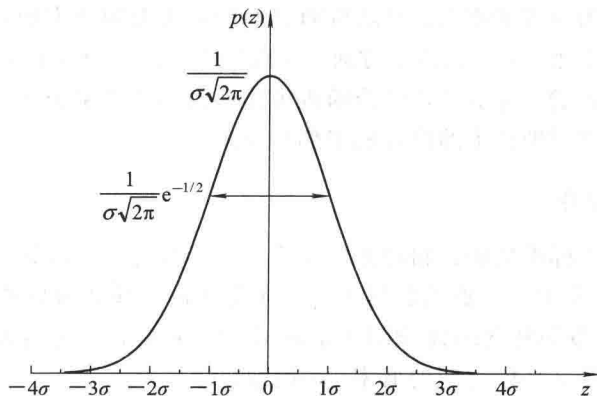


图 1.1 均值为 0、均方根为 σ 的高斯分布曲线

面以上与分布于参考面以下的点数的数量是相等的,且随机高度值 z 的奇数阶矩为0。这里需要指出的是,一般地,对于由工程手段加工而成的人工粗糙面,如车削加工表面,其高度分布容易偏离高斯分布,而由自然过程产生的自然界中的粗糙面,其高度分布则通常是满足高斯分布的^[5]。考虑到后面章节所研究的对象为典型地面,后续所涉及的粗糙面皆认为其服从高斯分布。

1.1.2 粗糙面相关性描述

只有高度概率分布函数和均方根高度这两个参数还不能确定以及区分不同的随机粗糙面,如图1.2所示的两个随机粗糙面。从图1.2中可以看出,虽然两个粗糙面有相同的高度概率分布及均方根高度(高度概率分布为高斯分布,RMS为0.2 m),但两种粗糙面表现出显著的纹理差异,即纹理变化的尺度不同。

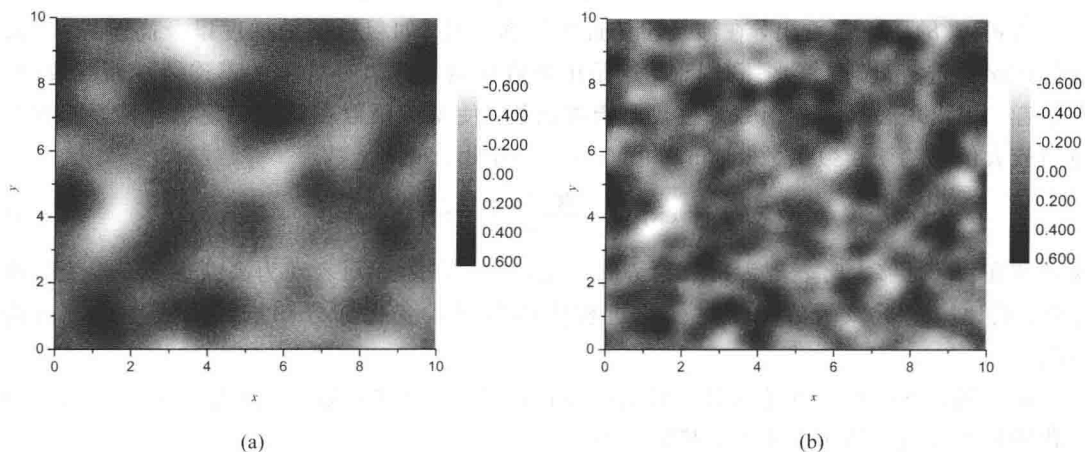


图 1.2 RMS 相同而相关长度不同的高斯随机粗糙面

以上两个粗糙面可以由粗糙面的另一特性(相关函数)来加以区别,其定义如下:

$$C(\mathbf{R}) = \frac{\langle z(\mathbf{r})z(\mathbf{r} + \mathbf{R}) \rangle}{\sigma^2} \quad (1.6)$$

另一类似的定义为自相关函数 $C_0(\mathbf{R})$,其实际为非归一化的相关函数,即 $C_0(\mathbf{R}) = \sigma^2 C(\mathbf{R})$ 。相关函数具有 $C(0)=1$ 的性质,随着两点之间距离的增加,其两点之间的相关性会逐渐消失,即 $C(\mathbf{R}) \xrightarrow{R \rightarrow \infty} 0$ 。相关性退化的方式取决于该随机粗糙面自身的性质, $C(\mathbf{R})$ 趋于零过程的快慢则依赖于两点不相关的距离。但对于非真正的随机粗糙面,以上性质不一定成立。例如,一维正弦曲面的相关函数为余弦函数,这反映了正弦曲面的周期性。只有对于随机粗糙面,且两点之间的距离超过两点的完全不相关距离时,相关函数才会真正趋于零。

在随机粗糙面的波散射理论中, 具有高斯相关函数的粗糙面是经常被用到的。二维高斯相关函数的定义为

$$C(\mathbf{R}) = \exp\left[-\left(\frac{x^2}{l_x^2} + \frac{y^2}{l_y^2}\right)\right] \quad (1.7)$$

式中, l_x 和 l_y 分别为 x 方向和 y 方向上的相关长度, 其定义为相关函数值趋于 $1/e$ 时的两点距离。值得注意的是, 当 l_x 与 l_y 相等时, 随机粗糙面上两点之间的相关性与该两点所确定的方向无关, 而只取决于两者之间的距离, 这种随机粗糙面被称为各向同性随机粗糙面。

此外, 还有一种典型的相关函数, 即指数相关函数。事实表明, 指数粗糙面更加符合实际中所测量得到的粗糙面数据^[6-8]。其函数表达式为

$$C(\mathbf{R}) = \exp\left[-\left(\frac{|x|}{l_x} + \frac{|y|}{l_y}\right)\right] \quad (1.8)$$

从式(1.8)中可以看出, 在涉及粗糙面的高阶特性(如粗糙面的梯度以及高阶导数)而需对该函数进行处理时会遇到困难, 这是由指数函数在原点处梯度的不连续性而导致的。有学者^[9]提出用另外一种函数来替代原指数函数, 使得该函数在原点处足够光滑, 而在变量为较大值时趋于指数函数。Fung 和 Moore^[10]给出了一个函数

$$C(\mathbf{R}) = \exp\left\{-\frac{|\mathbf{R}|}{l_1}\left[1 - \exp\left(\frac{|\mathbf{R}|}{l_2}\right)\right]\right\} \quad (1.9)$$

该函数在 $|\mathbf{R}|$ 足够大时表现为指数趋势的变化, 在原点附近则表现为高斯形式, 相关长度 l_1 和 l_2 的比决定了该函数随变量变化过程中高斯形式变化部分和指数形式变化部分的界限。

随机粗糙面的相关性还有另一种表述形式, 即其功率谱(或功率谱密度函数), 为非归一化的相关函数的傅里叶变换, 其定义如下:

$$P(\mathbf{k}) = \frac{\sigma^2}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} C(\mathbf{R}) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{R}) d\mathbf{R} \quad (1.10)$$

式中, 通过对 $C(\mathbf{R})$ 的变换, 功率谱可以与粗糙面起伏的傅里叶变换联系起来。其中, 无限大粗糙表面的相关函数可以表示为

$$C(\mathbf{R}) = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{1}{A\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} z(\mathbf{r}) z(\mathbf{r} + \mathbf{R}) d\mathbf{r} \quad (1.11)$$

式中, A 为粗糙面的面积。将式(1.11)代入式(1.10)并进行变量代换可得功率谱的表达式:

$$P(\mathbf{k}) = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{1}{A(2\pi)^2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} z(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2 \quad (1.12)$$

功率谱不同于以上所定义的粗糙面函数, 因为它描述了随机粗糙面两方面的特征: 粗糙面高度的起伏程度和粗糙面高度在均值平面的变化特性。功率谱函数下的总面积表示了

粗糙面的方差(或粗糙面的功率),即

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(k) dk = \sigma^2 \quad (1.13)$$

所以, $P(k)dk$ 表示波数在 k 至 $k+dk$ 之间部分对粗糙面方差的贡献。

高斯相关函数下非各向同性随机粗糙面(x 方向与 y 方向相关性存在差异)的功率谱可表示为

$$\begin{aligned} P(k_1, k_2) &= \frac{\sigma^2}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{x^2}{l_x^2} + \frac{y^2}{l_y^2}\right)\right] \exp[i(k_1 x + k_2 y)] dx dy \\ &= \frac{\sigma^2 l_x l_y}{4\pi} \exp\left(-\frac{k_1^2 \lambda_1^2}{4}\right) \exp\left(-\frac{k_2^2 \lambda_2^2}{4}\right) \end{aligned} \quad (1.14)$$

其中, l_x 和 l_y 分别为 x 方向和 y 方向上的相关长度, $P(k_1, k_2)$ 也为高斯函数形式。此外, 对于指数相关函数下的非各向同性随机粗糙面, 其功率谱的表达式为

$$\begin{aligned} P(k_1, k_2) &= \frac{\sigma^2}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{|x|}{l_x} + \frac{|y|}{l_y}\right)\right] \exp[i(k_1 x + k_2 y)] dx dy \\ &= \frac{\sigma^2}{l_x l_y \pi^2} \frac{1}{(1/l_x^2 + k_1^2)} \frac{1}{(1/l_y^2 + k_2^2)} \end{aligned} \quad (1.15)$$

同样, l_x 和 l_y 分别为 x 方向和 y 方向上的相关长度。值得注意的是, 对于具有同样相关长度和均方根高度的高斯和指数随机粗糙面, 指数随机粗糙面的功率谱具有较高斯粗糙面更长的拖尾, 即指数粗糙面具有更高的频率分量。

需要指出的是, 式(1.15)中所给出的指数谱粗糙面为非各向同性随机粗糙面, 尽管当式中 $l_x = l_y$ 时, 该随机粗糙面的相关性也只在 x 轴方向和 y 轴方向上相同, 而其它方向上则不全相同。对于二维指数谱随机粗糙面, 还有另外一种形式的指数谱:

$$P(k_1, k_2) = \frac{1}{2\pi} \sigma^2 l^2 [1 + (k_1^2 + k_2^2) l^2]^{-1.5} \quad (1.16)$$

该指数谱所给出的随机粗糙面为各向同性随机粗糙面。从式(1.16)中可以看出, 空间谱域的两个变量 k_1 和 k_2 具有互易性, l 为相关长度(各个方向上的相关长度相同)。

1.2 单一尺度地面的几何建模

对于一般类型的粗糙面地面, 如裸土、沥青路面以及水泥地面等, 在不考虑较大地势起伏的情形下, 其表面粗糙面轮廓往往只有一个尺度下的高度随机变化, 即单一尺度随机粗糙面。对于该类型的随机粗糙面, 由 1.1 节的内容可知, 在对其进行描述时一般需要获悉其在该尺度下的高度概率随机分布特性以及其在延展平面内各点处高度的相关特性, 而其高度概率随机分布特性对应于高度的概率密度函数, 各点处高度的相关性则对应于延展