

随机粗糙面与目标复合电磁散射的 基本理论和方法

郭立新 张 民 吴振森 著



科学出版社

随机粗糙面与目标复合电磁散射的 基本理论和方法

郭立新 张 民 吴振森 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了随机粗糙面与目标复合电磁散射的基本理论和方法,对粗糙面与目标复合模型电磁散射的物理机理、理论模型和计算方法作了全面的阐述。

书中分析了粗糙面与目标复合电磁散射、掠入射下分层粗糙面与目标的复合电磁散射、色散粗糙面与目标复合模型的宽带电磁散射等。计算方法包括基于积分方程的低频数值方法、基于微分方程的低频数值方法、基于表面电流和射线跟踪的高频近似方法,以及保留了高频近似方法计算速度和低频数值方法计算精度的高低频混合方法。

本书可供微波遥感、计算电磁学、电磁成像和复杂环境下雷达目标特征提取领域的广大科技工作者阅读,也可作为相关专业的教师和研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

随机粗糙面与目标复合电磁散射的基本理论和方法 / 郭立新, 张民, 吴振森著. —北京: 科学出版社, 2014.10

ISBN 978-7-03-042039-8

I. ①随… II. ①郭…②张…③吴… III. ①电磁波—散射—研究
IV. ①TN011

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 225637 号

责任编辑: 任 静 / 责任校对: 蒋 萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2014 年 10 月第 一 版

开本: 720×1 000 1/16

2014 年 10 月第一次印刷

印张: 21 1/4

字数: 412 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

自 1873 年麦克斯韦建立电磁场基本方程以来,电磁波理论和应用的发展已经有一百多年的历史。目前,电磁问题的研究已深入各个领域,例如,无线电波传播、光纤通信和移动通信、环境遥感、雷达探测、目标识别、医学成像、电磁成像等。电磁问题可分为三类:散射、辐射和传播。其中散射问题是最基本的问题,在一定程度上,辐射问题和散射问题是相互融合的,而电波传播问题在许多情况下与传播媒质的散射特性密切相关。

随机粗糙面是真实、复杂自然环境的一种典型写照,一般具有电大、非均匀、各向异性、多尺度、随机和可统计等特点,这些特点使得随机背景的存在影响着人类所处的各种电磁环境。从数学的角度出发,随机粗糙面背景的存在增加了求解麦克斯韦方程组的难度,因为几何模型变得极其复杂,超过了人类已经解决的任何问题。从电磁波传播角度出发,随机背景的存在增加了描述电磁波传播和散射特性的难度,可以说这种随机背景导致了现有的经验,以及建立的自由空间模型偏离了实际情况。从信号角度出发,随机背景造成了更多的误差来源,随机背景的存在使得人类使用的接收系统接收到了更多的噪声。

现代高科技战争是在复杂多变的电磁环境中展开的信息化战争,其中军事目标与复杂自然环境的复合电磁散射特性是一体化战场感知信息的重要组成部分。在对处于地海环境中的目标进行监测时,实际自然背景的散射往往是干扰目标识别的杂波信号,研究实际地海环境中目标的散射除考虑环境和目标各自独立的散射外,还必须考虑到目标与环境间相互耦合的多次散射。而寻找到一种快速、精确计算实际地海环境及其与军事目标复合电磁散射的方法对雷达预警和侦察,特别是掠入射下实际地物背景(包括裸土、沙漠、植被和丛林等)、海面及其处于其中的军事目标(如近地海飞机,超低空飞行导弹,海上舰船,地面、沙漠、植被和丛林中的战车等)的雷达探测和遥感都具有重要的意义。在民用技术方面,开展地面、海面、植被和沙漠等复杂自然背景,以及处于其中的目标散射特性的研究在环境检测、煤层勘测、农业技术和海洋渔业等领域都有重要的应用价值,还可用于界面上目标的探测和识别,材料粗糙表面上异质粒子的检测等。

在对实际地海环境及其与目标复合电磁散射特性研究中,通常将地物背景(裸土、植被、雪地、沙漠等)、海面的高度起伏看成特定范围内的随机过程即用随机粗糙面来表征实际的地海环境。当实际地面上有雨雪、落叶等覆盖时其电磁散射模型也是不同的;实际海面的电磁散射模型则与海面的风速、风向、海浪的生长期、海水的盐度、

温度和位置(深海、近海、陆海交界区域)等有关,且当海面上方有泡沫、浮冰、油污等覆盖时其电磁散射模型也会有所改变。对于确定性目标来说,其几何形状、电磁参数和运动状态均是确定的,当入射条件固定时,相应的电磁散射模型也是确定的。而对于地海面这类随机粗糙面来说,由于其高度起伏是用统计参量描述的随机过程,且高度起伏随时间和空间均有一定的变化,所以地海面电磁散射模型与确定性目标电磁散射模型的研究方法存在一定的差异。因此,粗糙面与目标复合电磁散射特性的实验与理论研究一直是计算电磁学领域中的难点问题和重点研究方向之一。

从 20 世纪八九十年代开始,粗糙面与目标复合电磁散射特性研究即引起了国内外学者的广泛兴趣,其复合电磁散射建模同时涉及复杂目标散射理论和粗糙面散射理论,求解单纯粗糙面电磁散射的解析方法不再适用于目标和粗糙面复合电磁散射,因为目标形状和位置的不规则性以及不确定性使得人们很难找到解析形式的解。传统粗糙面与目标复合散射的研究中,对粗糙面和目标的散射问题往往是独立分析,因而忽略了目标与粗糙面之间的耦合作用。事实证明,耦合场在某些情况下对复合散射的贡献会接近甚至大于一次散射场的贡献。然而,由于粗糙面具有很强的随机性,且目标也通常具有十分复杂的精细结构,它们之间的耦合散射作用必然也十分复杂。粗糙面与目标复合散射问题的难点在于表面结构的随机性和电大尺寸特性,这要求电磁模型必须具有可观的计算效率,才能处理由此所带来的巨大计算负担。基于上述难点,目前关于粗糙面与目标复合电磁散射算法的研究,主要围绕三个方面展开,即数值加速算法、高频近似方法以及高低频混合方法。

基于各种积分/微分方程的电磁场数值方法以其计算精度高、能够包含随机粗糙面与目标之间的多次复杂耦合作用等优点而被广泛地用于随机粗糙面与目标的复合电磁散射求解。然而由于数值算法本身的缺陷,尤其是求解低掠角入射情况下的复合电磁散射问题时,数值算法对计算机内存的需求是普通个人计算机无法满足的,计算时间也是无法忍受的,这促进了数值加速算法的发展。高频近似方法具有计算速度快、需要计算机内存较少等优点,将数值算法与高频近似方法相结合的高低频混合方法用于求解随机粗糙面与目标的复合电磁散射是目前的一个热门研究方向。就发展趋势来看,随着计算机技术的飞速发展,数值加速算法和高低频混合算法日益成熟,可行性逐渐增强,并因其精确性较高而越来越受到学者的重视。然而,根据已有文献报道,目前基于数值加速或高低频混合算法的解决方案一般将粗糙面假设成理想导体或者简化成沿单一方向分布的一维情况,并且受到计算能力的限制,难以实现大范围动态海面及复杂目标的复合散射建模,离实际问题的工程应用还有很大差距。

本书建立了随机粗糙面与目标复合电磁散射的理论模型,为实际地海环境中典型军事目标复合电磁散射特性的提取、控制、识别和数据库的建立提供理论依据。本书用 $e^{-i\omega t}$ 来表示时谐场中的时间因子。

本书是西安电子科技大学无线电物理实验室近年来各届博士、硕士研究生共同辛此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

勤劳的结晶，没有他们的努力，就不可能有本书的完成。本书同时得到国家杰出青年科学基金(61225002)、国家自然科学基金(60971067)、中央高校基本科研业务费专项资金等项目的资助与支持。

本书是作者及所在项目组近年来在随机粗糙面与目标复合电磁散射的基本理论和方法的研究工作阶段总结，主要成果均先后在国内外学术刊物上发表，也在国家若干工程技术工作中得到有意义的应用。由于作者水平所限，书中不妥之处在所难免，欢迎读者不吝指正。

作 者

2014 年 6 月于西安电子科技大学

目 录

前言

第 1 章	一维粗糙面与上方二维目标复合电磁散射的矩量法研究	1
1.1	一维粗糙面与上方二维目标复合电磁散射的 MOM 研究	2
1.1.1	随机粗糙面建模的蒙特卡罗方法	2
1.1.2	入射波与散射系数的定义	7
1.1.3	一维理想导体粗糙面与上方二维理想导体目标复合电磁散射的 MOM 研究	11
1.1.4	一维介质粗糙面与上方二维理想导体目标复合电磁散射的 MOM 研究	15
1.1.5	一维介质粗糙面与上方或下方二维介质目标复合电磁散射的 MOM 研究	19
1.2	一维理想导体粗糙面与上方二维理想导体目标复合电磁散射的多区域 MOM 研究	25
1.2.1	理论分析	25
1.2.2	数值结果与讨论分析	28
1.3	一维介质粗糙面与上方二维理想导体目标复合电磁散射的多区域 MOM 研究	32
1.3.1	理论分析	32
1.3.2	数值结果与讨论分析	36
1.4	一维介质粗糙面与二维介质目标复合电磁散射的多区域 MOM 研究	40
1.4.1	理论分析	40
1.4.2	数值结果与讨论分析	45
	参考文献	49
第 2 章	一维分层介质粗糙面及其与二维目标复合电磁散射的并行 FMM 研究	51
2.1	一维分层介质粗糙面与二维目标复合电磁散射的 MOM 研究	52
2.1.1	一维分层介质粗糙面电磁散射的理论分析	52
2.1.2	一维分层介质粗糙面与二维目标复合电磁散射的理论分析	56
2.1.3	数值计算结果与讨论	60
2.2	一维分层介质粗糙面电磁散射的并行 FMM 研究	66
2.2.1	FMM 的基本原理	67
2.2.2	一维理想导体粗糙面电磁散射的并行 FMM 研究	69
2.2.3	一维分层介质粗糙面电磁散射的并行 FMM 研究	73
2.2.4	数值结果与讨论分析	74

2.3 一维分层介质粗糙面与二维目标复合电磁散射的并行 FMM 研究	77
2.3.1 理论分析	77
2.3.2 数值结果与讨论	78
参考文献	82
第 3 章 粗糙面与多目标复合散射的 EPIL+FBM 研究	84
3.1 一维导体粗糙面与上方及漂浮二维导体目标复合电磁散射	84
3.1.1 复合场景的建模及复合散射的推导	84
3.1.2 EPIL 研究复合散射的公式推导	87
3.1.3 FBM 与 GFBM 的公式推导	90
3.1.4 相对误差与计算复杂度	92
3.1.5 数值计算结果及讨论	93
3.2 一维介质粗糙面与上下方二维导体目标的复合散射	101
3.2.1 复合场景的建模及复合散射的推导	102
3.2.2 EPIL+FBM 研究复合散射的公式推导	107
3.2.3 相对误差与计算复杂度	111
3.2.4 数值计算结果及讨论	112
3.3 一维介质粗糙面与上下方二维介质目标复合散射研究	118
3.3.1 复合场景的建模及复合散射的推导	119
3.3.2 EPIL+FBM 研究复合散射的公式推导	125
3.3.3 相对误差与计算复杂度	128
3.3.4 数值计算结果及讨论	129
参考文献	134
第 4 章 一维粗糙面和二维目标电磁散射的 FE-BI 研究	137
4.1 二维目标电磁散射的 FE-BI 研究	138
4.1.1 FE-BI 混合方法的推导	138
4.1.2 验证和算例	141
4.2 一维粗糙面的有限元区域建模和矩阵重排策略	143
4.2.1 有限元区域建模	143
4.2.2 矩阵重排策略	144
4.3 一维导体粗糙面电磁散射的 FE-BI 研究	146
4.3.1 边值问题构建	146
4.3.2 数值算例	147
4.4 一维介质粗糙面电磁散射的 FE-BI 研究	150
4.4.1 一维介质粗糙面电磁散射问题模型	150
4.4.2 一维介质粗糙面电磁散射理论推导	150

4.4.3 数值算例	152
4.5 一维粗糙面与二维目标的复合散射的 FE-BI 研究	153
4.5.1 一维导体粗糙面与上方单个目标电磁散射问题模型	153
4.5.2 一维导体粗糙面与上方多个二维导体目标的复合散射模型和理论推导	155
4.5.3 一维介质粗糙面与上方二维介质目标的复合电磁散射	158
4.5.4 一维介质粗糙面与下方多个二维介质目标的复合散射模型和理论推导	160
参考文献	162
第 5 章 粗糙面与目标复合散射的 FDTD 方法研究	164
5.1 粗糙面与目标复合模型的电磁散射研究	164
5.1.1 FDTD 方法的基本原理	164
5.1.2 FDTD 方法在一维粗糙面与二维目标复合模型双站散射中的应用	166
5.1.3 基于 GPU 的 FDTD 并行方法在一维粗糙面与二维目标复合模型双站散射中的 应用	174
5.1.4 FDTD 方法在二维粗糙面与三维目标复合模型双站散射中的应用	179
5.2 粗糙面与目标复合模型的宽带散射研究	189
5.2.1 FDTD 方法在二维粗糙面与三维目标复合模型宽带散射中的应用	189
5.2.2 FDTD 方法在一维粗糙面与二维目标复合模型宽带散射中的应用	194
5.3 色散粗糙面与目标复合模型的宽带散射研究	198
5.3.1 色散媒质的 ADE-FDTD 公式	198
5.3.2 CPML 吸收边界条件	199
5.3.3 ADE-FDTD 在一维色散海面与二维目标复合模型宽带散射中的应用	202
5.3.4 ADE-FDTD 在一维色散土壤与二维目标复合模型宽带散射中的应用	205
参考文献	208
第 6 章 粗糙面与目标复合散射的 TDIE 方法研究	211
6.1 时域积分方程及建模方法	211
6.2 电流基函数及时间步进方程	212
6.3 数值算例	215
6.3.1 TDIE 在二维导体目标瞬态电磁散射中的应用	215
6.3.2 TDIE 在一维导体粗糙面瞬态电磁散射中的应用	217
6.3.3 TDIE 在一维粗糙面与上方二维导体目标瞬态复合电磁散射研究	220
参考文献	227
第 7 章 粗糙面与目标复合散射的解析近似方法	228
7.1 互易性定理在粗糙面与目标耦合散射中的应用	228
7.1.1 互易性定理	228

7.1.2	相邻目标之间的耦合场	230
7.1.3	粗糙面与目标之间的耦合场	232
7.1.4	应用示例与结果分析	234
7.2	粗糙面与目标耦合散射的四路径模型	238
7.2.1	粗糙面与目标耦合散射的修正四路径模型	238
7.2.2	粗糙面与目标复合散射的复反射系数修正多路径模型	245
7.2.3	时变粗糙面与目标复合散射的加权多路径模型	249
7.3	粗糙面与目标角结构耦合散射的 IPO 与 TDIPO 分析	253
7.3.1	粗糙面与目标角结构耦合散射的 IPO 方法	253
7.3.2	粗糙面与目标角结构耦合散射的 TDIPO 方法	262
7.4	弹跳射线方法及其在复合电磁散射中的应用	266
7.4.1	弹跳射线方法的原理	267
7.4.2	弹跳射线方法的应用	270
	参考文献	277
第 8 章	粗糙面与目标复合散射高低频混合方法	279
8.1	一维粗糙面和二维目标的多重混合 FE-BI-KA 方法	279
8.1.1	FE-BI-KA 多重混合算法	279
8.1.2	算法验证和数值算例	283
8.1.3	介质粗糙面与分层目标复合电磁散射的 FE-BI-KA 研究	287
8.1.4	导体海面与介质目标复合电磁散射的多区域 FE-BI-KA 研究	290
8.2	二维粗糙面与目标频域复合散射的 MOM-KA 法	291
8.2.1	三维导体目标分析的矩量法	292
8.2.2	MOM-PO 混合法	299
8.2.3	粗糙面与目标复合单站散射的快速算法	304
8.3	二维粗糙面与目标时域复合散射的 TDIE-TDKA 法	314
8.3.1	电流基函数与时域电场积分方程	314
8.3.2	显式格式步进方程	316
8.3.3	瞬态远场	320
8.3.4	数值算例	322
	参考文献	326

第 1 章 一维粗糙面与上方二维目标复合 电磁散射的矩量法研究

粗糙地面、海面背景下的目标电磁散射在雷达探测、资源勘探和环境遥感遥测等实际应用中具有重要的作用。粗糙面与目标复合电磁散射特性研究从 20 世纪 80 年代开始就引起了国内外学者的广泛兴趣，其中不乏有开创性的研究工作，最典型的就是 Johnson 提出的利用“四路径”模型计算无限大介质平板与上方介质目标的复合电磁散射^[1]，将电磁波在平板上方自由空间、平板和目标间的传播路径分为电磁波照射平板后的直接散射、电磁波照射目标后的直接散射、平板的散射波作为次级入射源与目标作用后产生的散射，以及目标的散射波与平板作用这四类最基本的散射波，这一求解思路在早期随机粗糙面与目标复合电磁散射求解中占据主导地位。近似方法的优点为计算快捷、耗费计算资源极少，缺点为计算结果不是很精确，并且目标的特性有时需满足近似条件。

近年来发展较快的数值算法，通常将粗糙面和目标当作一个整体，并通过数值加速方案处理复合散射场的计算。数值方法的四大主流算法为矩量法(MOM)、有限元法(FEM)、时域有限差分法(FDTD)，以及时域积分方程法(TDIE)。为提高数值方法的计算效率，许多学者在数值求解过程中进行合理的近似，从而发展出一批快速数值算法。早期 Wang 等利用矩量法(Method of Moment, MOM)数值实现了二维理想导体圆柱目标分别放置在高斯介质粗糙面的上方、下方或半掩埋情况下电磁散射的求解^[2-5]，详细给出了复合电磁散射矩量法求解的积分方程的数学表达式、矩阵方程的阻抗矩阵元素，以及远区双站散射系数的定义式。

然而因计算机内存的限制，对于一维粗糙面而言，通常模拟粗糙面的长度是被限制在 $[-L/2, L/2]$ ，即当 $|x| > L/2$ 时无入射波照射，粗糙面表面感应电流不存在，因此在粗糙面的边界处电流会突变为零，这必然会导致粗糙面边界处的人为反射，即出现截断效应。因此为避免边界处的电流突变，入射波不能再简单地认为是均匀能量分布的平面波，而应该采用具有一定宽度能量分布的锥形波^[6]，以保证边界处入射波的感应电流尽量小。分析锥形波能量分布图时可以发现入射波能量集中在粗糙面的中间区域，这导致粗糙面中间区域部分的表面感应电流强度大于边缘区域，入射锥形波的这一特点促进了多区域分解技术^[7,8]在粗糙面及其与目标复合电磁散射快速求解中的应用^[9,10]。

1.1 一维粗糙面与上方二维目标复合电磁散射的 MOM 研究

1.1.1 随机粗糙面建模的蒙特卡罗方法

蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法^[11,12] 又称线性滤波法, 其基本思想是在频域用功率谱对其进行滤波, 再进行傅里叶逆变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) 得到粗糙面的高度起伏。本书中粗糙面的建模均是从随机粗糙面功率谱的概念出发, 采用蒙特卡罗方法^[11,12] 来模拟生成。

1. 一维粗糙面生成的蒙特卡罗方法

由于粗糙表面被认为是由大量的谐波叠加而成的, 谐波的振幅是独立的高斯随机变量, 其方差正比于特定波数的功率谱 $S(k_j)$ 。按照这种思路, 可以由下列函数生成长度为 L 的一维粗糙表面样本^[11,12], 即

$$f(x_n) = \frac{1}{L} \sum_{j=-N/2+1}^{N/2} F(k_j) e^{ik_j x_n} \quad (1.1)$$

式中, $x_n = n\Delta x (n = -N/2+1, \dots, N/2)$ 表示粗糙表面上第 n 个采样点; $F(k_j)$ 与 $f(x_n)$ 称为傅里叶变换对, 定义为

$$F(k_j) = \frac{2\pi}{\sqrt{2\Delta k}} \sqrt{S(k_j)} \cdot \begin{cases} [N(0,1) + iN(0,1)], & j = -N/2+1, \dots, -1 \\ N(0,1), & j = 0, N/2 \end{cases} \quad (1.2)$$

式中, 定义离散波数 k_j 的表达式为 $k_j = 2\pi j / L$; Δk 定义为谱域相邻的谐波样本的空间波数差; $S(k_j)$ 为粗糙表面的功率谱密度。 $N(0,1)$ 表示均值为 0, 方差为 1 的正态分布的随机数。当 $j > 0$ 时, $F(k_j)$ 满足共轭对称关系 $F(k_j) = F(k_{-j})^*$ 。这样可以保证进行傅里叶逆变换后所得到的粗糙表面的轮廓 $f(x_n)$ 是实数。此外, 在利用傅里叶逆变换实现粗糙表面时, 表面总长度 L 至少应当有 5 个相关长度, 这样可以减少谱的重叠。由于合成过程的表面长度是有限的, 表面自相关函数并不完全衰减到零, 所以会有某种振荡存在。因此, 为了反变换重新得到功率谱, 需要对实数序列进行加窗处理, 以避免边缘效应和谱的重叠问题。

文献[12]中给出了两类常用的粗糙表面的功率谱密度, 如高斯粗糙面的功率谱密度表达式为

$$S(k) = \frac{\delta^2 l}{2\sqrt{\pi}} \exp(-k^2 l^2 / 4) \quad (1.3)$$

式中, δ 和 l 分别表示高斯粗糙面的均方根高度和相关长度。利用式 (1.1)、式 (1.2) 和式 (1.3) 可以模拟一维高斯随机粗糙面。

图 1.1(a)与图 1.1(b)给出了不同均方根高度、相关长度(以波长 λ 为单位)的一维高斯粗糙面样本数值模拟图形。高斯粗糙面是一种较为典型的粗糙面。从模拟图形可以看出,均方根高度和相关长度是粗糙面模拟中最基本而且非常重要的两个参数,它们的变化对于粗糙面的起伏高度、起伏频繁程度都有很大的影响。从图 1.1(a)和图 1.1(b)可以看出,当相关长度相同时,均方根高度越大,粗糙面的起伏程度就越大;而均方根高度固定时,相关长度越小,粗糙面变换就越剧烈,即变化的周期就越小。可见,均方根高度决定着粗糙面的“纵向”变化特性,相关长度决定着粗糙面的“横向”变化特性。

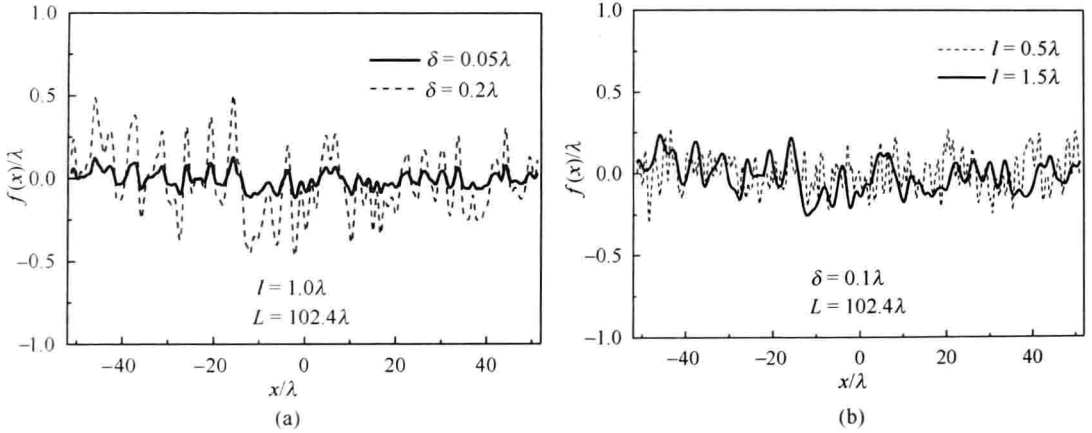


图 1.1 一维高斯随机粗糙面模型

指数粗糙面的功率谱密度表达式为^[12]

$$S(k) = \frac{\delta^2 l}{\pi(1 + k^2 l^2)} \quad (1.4)$$

式中, δ 和 l 分别表示指数粗糙面的均方根高度和相关长度。利用式(1.1)、式(1.2)和式(1.4)可以模拟一维指数随机粗糙面。

图 1.2(a)与图 1.2(b)给出了不同均方根高度、相关长度下的一维指数粗糙面样本

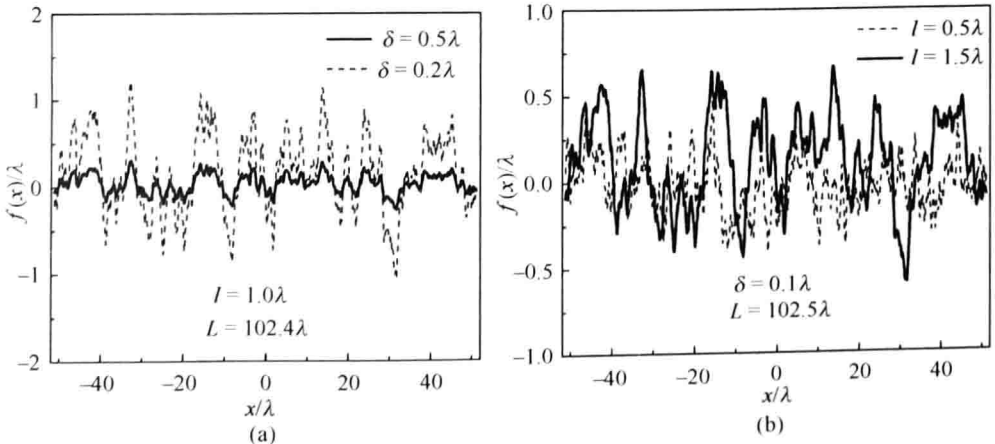


图 1.2 一维指数随机粗糙面模型

数值模拟图形。可以看出,指数粗糙面与高斯粗糙面起伏随均方根高度和相关长度的变化有着相同的特点。

与高斯粗糙面类似,海谱定义为海面高度相关函数的傅里叶变换,它作为随机过程的二阶统计特性之一,直接给出了构成海面各谐波分量相对于空间频率和方位的分布,可以说是描述海面最基本的方法之一。采用统计方法模拟海面时,都是从海谱出发的,因此有必要对其进行简单的介绍。到目前为止众多学者已经提出了各种形式的海谱模型。

PM 海谱^[13]是由 Pierson 和 Moskowitz 提出的,其表达式为

$$S_1(k) = \begin{cases} \frac{\alpha}{4|k|^3} \exp\left(-\frac{\beta g_c^2}{k^2 U_{19.5}^4}\right), & k \geq 0 \\ 0, & k < 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

式中, α 和 β 是无量纲经验常数, $\alpha = 8.10 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$; g_c 是重力加速度, $g_c = 9.81 \text{ m/s}^2$; $U_{19.5}$ 是海面 19.5m 高度处的风速。有了海面的功率谱以后,同样可以利用蒙特卡罗方法模拟一维动态粗糙海面模型,只不过是式(1.1)改写为

$$f(x_n, t) = \frac{1}{L} \sum_{j=-N/2+1}^{N/2} F(k_j) e^{ik_j x_n} e^{i\omega(k_j)t} \quad (1.6)$$

式中

$$\omega(k_j) = \{g_c |k_j| [1 + (k_j / 363.2)^2]\}^{1/2} \quad (1.7)$$

利用式(1.2)、式(1.5)和式(1.6)可以模拟一维 PM 谱粗糙海面。图 1.3(a)给出了 PM 谱分布。可以看出,不论风速的取值大小如何,PM 谱中总有一个峰值,其对应的频率为 k_p , 风速越大, k_p 越小,这表明海表面受两种波谱共同影响,当 $k < k_p$ 时,功率谱满足正幂律谱,而当 $k > k_p$ 时,功率谱满足负幂律谱。从图 1.3(a)中还可以很明

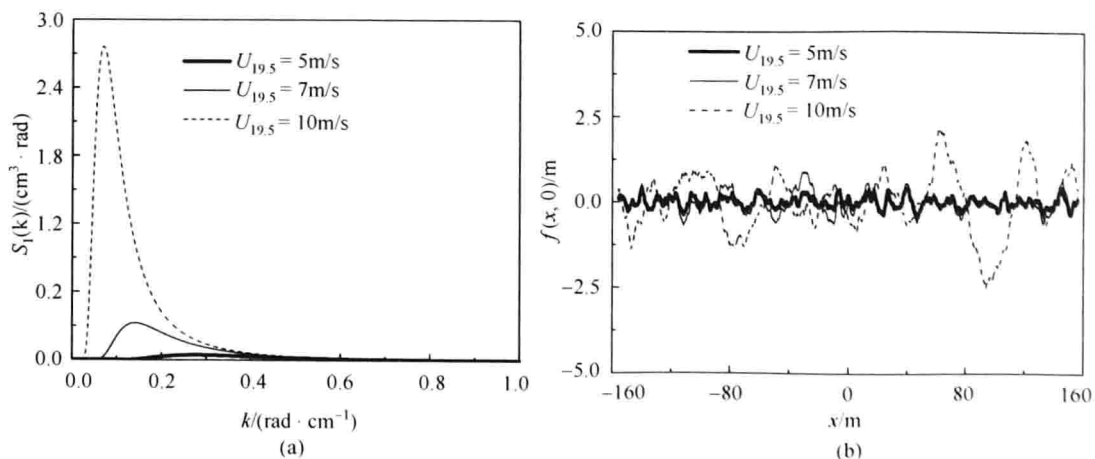


图 1.3 不同风速下的 PM 海谱及粗糙海面模型

显地看出,随着风速的增大,PM 谱的峰值增大。图 1.3(b)中分别给出了 $t=0$ 时刻,海面长度为 320m,风速分别为 5m/s、7m/s 和 10m/s 时的 PM 海面模型。从图中可以看出,随着风速的增大,海面的起伏增大,海浪的峰值增高,这与现实情况是相符合的。

2. 二维粗糙面生成的蒙特卡罗方法

与一维随机粗糙面建模的蒙特卡罗方法类似,假设要生成的二维随机粗糙面在 x 和 y 方向的长度分别为 L_x 和 L_y , 等间隔离散点数为 M 和 N , 相邻两点间的距离分别为 Δx 和 Δy , 有 $L_x=M \cdot \Delta x$, $L_y=N \cdot \Delta y$, 则粗糙面上每一点 $(x_m=m \Delta x, y_n=n \Delta y)$, $(m=-M/2+1, \dots, M/2; n=-N/2+1, \dots, N/2)$ 处的高度可表示为^[12]

$$f(x_m, y_n) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m_k=-M/2+1}^{M/2} \sum_{n_k=-N/2+1}^{N/2} F(k_{m_k}, k_{n_k}) \exp[i(k_{m_k} x_m + k_{n_k} y_n)] \quad (1.8)$$

式中

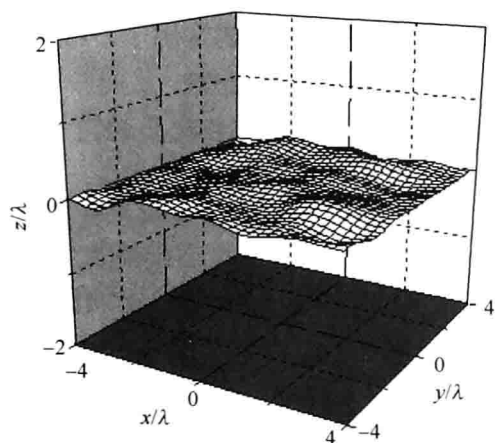
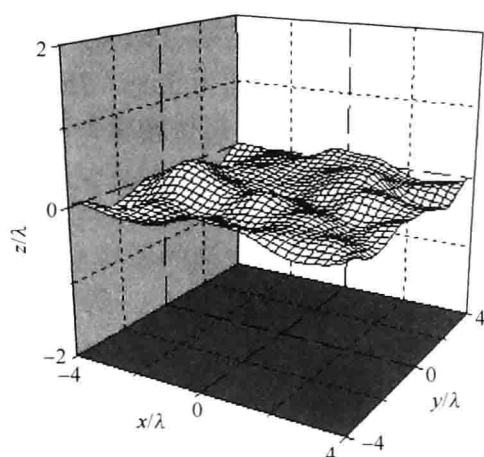
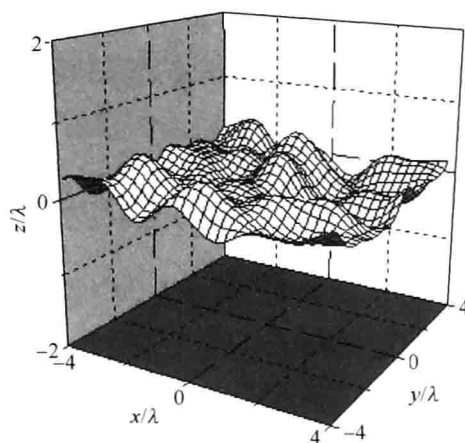
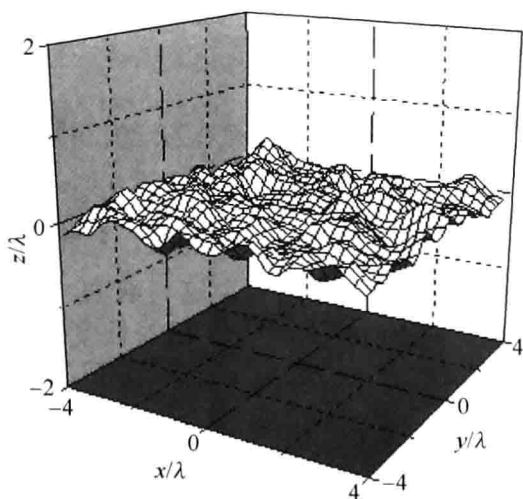
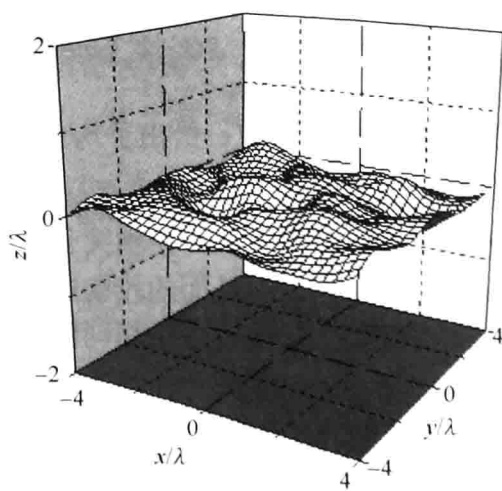
$$F(k_{m_k}, k_{n_k}) = 2\pi \left[L_x L_y S(k_{m_k}, k_{n_k}) \right]^{1/2} \cdot \begin{cases} \frac{[N(0,1) + iN(0,1)]}{\sqrt{2}}, & m_k \neq 0, M/2, \text{ 且 } n_k \neq 0, N/2 \\ N(0,1), & m_k = 0, M/2, \text{ 或 } n_k = 0, N/2 \end{cases} \quad (1.9)$$

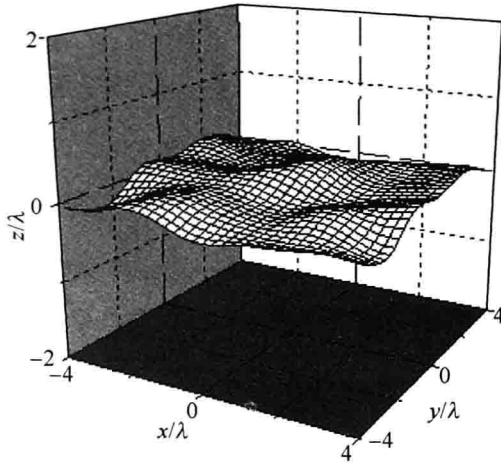
同样 $S(k_x, k_y)$ 为二维随机粗糙面的功率谱密度, 其中 $k_{m_k} = 2\pi m_k / L_x$, $k_{n_k} = 2\pi n_k / L_y$ 。与一维粗糙面建模的蒙特卡罗方法一样, 为了使 $f(x_m, y_n)$ 为实数, 其傅里叶系数的相位必须满足条件: $F(k_{m_k}, k_{n_k}) = F^*(-k_{m_k}, -k_{n_k})$, $F(k_{m_k}, -k_{n_k}) = F^*(-k_{m_k}, k_{n_k})$ 。在具体计算式(1.8)时通常是利用二维 IFFT 来实现的。

二维高斯粗糙面对应的功率谱为^[12,14]

$$S(k_x, k_y) = \delta^2 \frac{l_x l_y}{4\pi} \exp\left(-\frac{k_x^2 l_x^2 + k_y^2 l_y^2}{4}\right) \quad (1.10)$$

图 1.4(a)~图 1.4(c)给出了均方根高度分别为 $\delta = 0.05\lambda, 0.1\lambda, 0.2\lambda$ 的二维高斯粗糙面模型。其中相关长度 $l_x = l_y = 1.0\lambda$, x 方向和 y 方向长度 $L_x = L_y = 8.0\lambda$, 每个波长采样 8 个点。可以发现,在相关长度相同的前提下,均方根高度越大,粗糙面的高度起伏变化就越大,粗糙面的轮廓所能达到的峰值和谷值就越大,这与前面一维高斯粗糙面的高度起伏变化特点是相同的。图 1.5(a)~图 1.5(c)给出了相关长度 $l_x = l_y$ 分别为 $0.5\lambda, 1.0\lambda, 1.5\lambda$ 的二维高斯粗糙面模型。其中均方根高度 $\delta = 0.1\lambda$, x 方向和 y 方向长度 $L_x = L_y = 8.0\lambda$, 每个波长采样 8 个点。可以发现,在均方根高度相同的条件下,相关长度代表了粗糙面的变化周期,相关长度越小,粗糙面变化越频繁,峰值与峰值之间的距离越小,这一结论仍然与一维粗糙面相同。关于二维海谱模型及动态粗糙海面的模拟可参见文献[12]和文献[15]。

(a) $\delta = 0.05\lambda$, $l_x = l_y = 1.0\lambda$ 二维高斯粗糙面(b) $\delta = 0.1\lambda$, $l_x = l_y = 1.0\lambda$ 二维高斯粗糙面(c) $\delta = 0.2\lambda$, $l_x = l_y = 1.0\lambda$ 二维高斯粗糙面图 1.4 $\delta = 0.05\lambda, 0.1\lambda, 0.2\lambda$ 的二维高斯粗糙面模型(a) $\delta = 0.1\lambda$, $l_x = l_y = 0.5\lambda$ 二维高斯粗糙面(b) $\delta = 0.1\lambda$, $l_x = l_y = 1.0\lambda$ 二维高斯粗糙面



(c) $\delta = 0.1\lambda, l_x = l_y = 1.5\lambda$ 二维高斯粗糙面

图 1.5 $l_x = l_y = 0.5\lambda, 1.0\lambda, 1.5\lambda$ 的二维高斯粗糙面模型

1.1.2 入射波与散射系数的定义

图 1.6 所示为一维粗糙面与上方二维目标复合电磁散射的几何示意图，其中 θ_i 和 θ_s 分别表示入射角和散射角， ψ^{inc} 和 ψ^{sca} 分别代表入射波和散射波， k_i 和 k_s 分别为入射波矢量和散射波矢量。粗糙面的轮廓函数为 $z = f(x)$ ，且满足 $\langle f(x) \rangle = 0$ 。目标的几何中心为 $(0, h)$ ，目标的轮廓函数为 $z = Z_o(x)$ 。空间被分为图示的 Ω_0 和 Ω_1 两个子空间， Ω_0 空间定义为上半空间，一般为自由空间，介电常数和磁导率为 ϵ_0, μ_0 ， Ω_1 空间为下半空间，其介电常数和磁导率与下半空间的媒质参数有关。定义位置矢量为 $r = \hat{x}x + \hat{z}z$ (下同)。

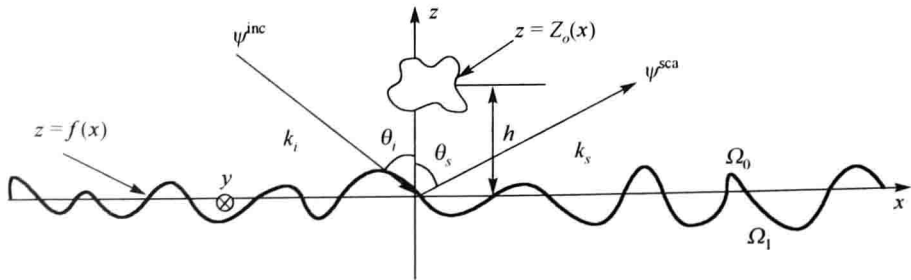


图 1.6 一维粗糙面与上方二维目标复合电磁散射的几何示意图

1. 入射波

通常模拟粗糙面的长度被限制在 $[-L/2, L/2]$ ，即当 $|x| > L/2$ 时无入射波照射，粗糙面表面感应电流不存在，因此在粗糙面的边界处电流会突变为零，这必然导致粗糙面边界处的人为反射，即截断效应。因此为避免边界处的电流突变，入射波不能再