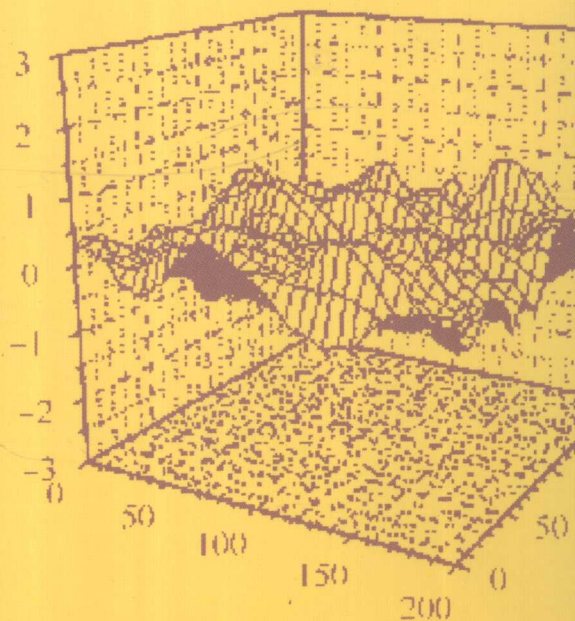


随机粗糙面散射的 基本理论与方法

郭立新 王蕊 吴振森 编著



科学出版社

www.sciencep.com

随机粗糙面散射的 基本理论与方法

郭立新 王 蕊 吴振森 编著

科学出版社

北 京

0441.4
G817

内 容 简 介

本书介绍了随机粗糙面散射的基本理论与方法,内容主要包括随机粗糙面的建模及其电磁散射的计算方法、随机粗糙面与目标的复合电磁散射以及相关逆问题。

本书可供微波遥感、计算电磁学、电磁成像及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,也可供相关专业高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

随机粗糙面散射的基本理论与方法/郭立新,王蕊,吴振森编著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-026124-3

I. 随… II. ①郭…②王…③吴… III. 电磁波散射-研究 IV. 0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 217379 号

责任编辑:任 静 王,志欣 杨 然/责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博/封面设计:陈 敬

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 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张:19 1/4

印数:1—2 000 字数:378 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电磁问题,按照特点可以分为散射、辐射和传播三类,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,而波的传播问题,在许多情况下,依赖于对传播介质散射特性的研究。自然界中地面、海面均可以看成是满足某种特定概率密度分布的粗糙表面。随机粗糙表面的电磁散射特性研究在国防军事领域和民用技术领域都具有显著的学术价值和广泛的应用前景。随机粗糙表面的电磁散射研究之所以受到越来越多的关注,最主要的原因在于随机粗糙表面的电磁散射特性与确定性目标的电磁散射特性有着诸多的区别。对于确定性目标的散射问题而言,由于目标的轮廓和介电特性已经确定,所以特定的人射角和散射角对应的电磁散射系数也就随之确定。然而,对于随机粗糙表面而言,粗糙表面的轮廓随着时间或者空间随机地发生变化,所以其表面轮廓的主要特点是“随机性”。这一点有别于确定性目标的电磁散射问题,所以,随机粗糙表面的电磁散射问题专注于研究概率密度分布、统计参数等对粗糙表面的电磁散射特性的影响。

鉴于随机粗糙表面的电磁散射问题在军事及民用领域有着广泛的应用,近年来,各个国家都投入大量的人力、物力开展相关的研究工作。例如,美国麻省理工学院的辐射实验室、美国喷气推进实验室和美国海军实验室都曾设计出各种遥感雷达系统,这些系统能够比较精确地测量各种复杂背景表面的电磁散射系数。然而,随机粗糙表面背景的散射特性通常是随时间、空间而变化的,并且是与多种参数(土壤湿度、海水盐分、密度、温度及几何尺度等)有关的多元函数,因此,必须长期进行大范围的测量以得到可靠的实测数据。而随着计算机与计算技术的发展,计算机仿真模拟为我们提供了研究随机粗糙背景散射的一个有效、便捷的途径。同时,对随机粗糙面电磁散射机理和物理本质的深入研究,又为随机粗糙背景电磁散射的实际应用,如复杂背景下目标特征的提取等提供了必要的理论指导。

本书是作者及其所在的项目组对随机粗糙面散射的基本理论与方法进行完整的搜集与整理,总结了自 2001 年起项目组开展的相关科学研究计划的科研成果,主要包括随机粗糙面的建模及其电磁散射计算方法、随机粗糙面与目标的复合电磁散射以及相关逆问题等一系列随机背景电磁散射热点问题。

全书共分 7 章,包括随机粗糙面建模、粗糙面电磁散射近似方法、粗糙(海)面电磁散射数值方法、分层粗糙面的电磁散射、动态海面散射杂波特征研究、粗糙面与目标的复合电磁散射、粗糙面电磁散射的相关逆问题。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、硕士研究生共同辛勤劳动的结晶,没有他们的努力,就不可能有本书的完成。本书同时得到国家自然科学基金(60571058)、高等学校博士学科点专项科研基金(20070701010)等项目的资助与支持。

本书是作者近十年来从事随机粗糙面电磁散射特性研究工作的初步总结,由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,欢迎读者不吝指正。

作 者

2009年7月于西安电子科技大学

目 录

前言

第 1 章 随机粗糙面建模	1
1.1 随机粗糙面相关基本知识	1
1.2 随机粗糙面建模的蒙特卡罗方法	4
1.2.1 一维粗糙面建模的蒙特卡罗方法	4
1.2.2 二维粗糙面建模的蒙特卡罗方法	6
1.3 实际动态粗糙海面及其建模	8
1.3.1 实际粗糙海面的基本知识	9
1.3.2 实际动态粗糙海面的功率谱及蒙特卡罗方法建模	10
1.3.3 实际动态粗糙海面的分形模型	16
1.3.4 海浪波方程	29
参考文献	30
第 2 章 粗糙面电磁散射近似方法	32
2.1 积分方程方法	33
2.1.1 散射场和散射功率	33
2.1.2 散射系数	35
2.1.3 数值结果及其分析	38
2.2 Kirchhoff 近似方法	40
2.2.1 求解切向场 $\hat{n} \times E$ 和 $\hat{n} \times H$	40
2.2.2 驻留相位法	41
2.2.3 标量近似法	44
2.2.4 数值结果及其分析	46
2.3 微扰法	47
2.3.1 散射问题公式	47
2.3.2 场强幅值的确定	48
2.3.3 极化系数的确定	50
2.3.4 散射系数的推导	51
2.3.5 数值结果及其分析	52
2.4 小斜率近似方法	53
2.4.1 小斜率近似的散射振幅	53

2.4.2	小斜率近似的双站散射系数	54
2.4.3	数值结果及其分析	55
2.5	双尺度方法	56
2.5.1	粗糙面电磁散射的双尺度方法	56
2.5.2	双尺度法计算实际粗糙海面的电磁散射系数	59
	参考文献	61
第3章	粗糙(海)面电磁散射数值方法	62
3.1	矩量法在一维粗糙面电磁散射中的应用	63
3.1.1	矩量法的基本原理	64
3.1.2	矩量法在一维导体粗糙面电磁散射中的应用	66
3.1.3	矩量法在一维介质粗糙面散射中的应用	72
3.1.4	数值计算及结果分析	73
3.2	快速多极子方法在一维大尺度海面掠入射电磁散射中的应用	75
3.2.1	快速多极子方法	76
3.2.2	快速多极子方法在导体粗糙面电磁散射中的应用	78
3.2.3	快速多极子方法在介质粗糙面电磁散射中的应用	84
3.3	FDTD 研究一维粗糙面的电磁散射	85
3.3.1	FDTD 的基本原理	85
3.3.2	FDTD 在一维粗糙面电磁散射中的应用	86
3.4	TDIE 研究一维粗糙面瞬态散射特性	92
3.4.1	TDIE 的基本原理	93
3.4.2	TDIE 在一维粗糙面瞬态电磁散射中的应用	98
3.5	粗糙面电磁散射并行数值计算方法	101
3.5.1	并行计算基本知识	101
3.5.2	基于消息传递的并行计算	104
3.5.3	并行矩量法在二维导体粗糙面电磁散射中的应用	106
3.5.4	并行 FDTD 在二维粗糙面电磁散射中的应用	113
	参考文献	119
第4章	分层粗糙面的电磁散射	121
4.1	锥形波入射下 Kirchhoff 近似求解一维分层粗糙面电磁散射	121
4.1.1	锥形波入射下 Kirchhoff 近似求解单层粗糙面的电磁散射	121
4.1.2	Kirchhoff 近似求解分层粗糙面的电磁散射	125
4.2	Kirchhoff 近似结合矩量法求解一维分层粗糙面电磁散射	131
4.2.1	基本理论	132
4.2.2	数值计算结果及讨论	133

4.3 时域有限差分法在分层粗糙面电磁散射中的应用	135
4.3.1 一维分层粗糙面的 FDTD 方法研究	135
4.3.2 二维分层粗糙面的 FDTD 方法研究	137
参考文献	139
第 5 章 动态海面散射杂波特征分析	141
5.1 动态海面散射杂波的幅值分布	141
5.1.1 最大似然估计法	141
5.1.2 分布模型及其参数估计	142
5.1.3 一维动态粗糙海面的杂波模拟及统计分析	147
5.1.4 二维动态海面杂波特性分析	150
5.2 动态海面散射杂波的多普勒谱特性	152
5.2.1 二维线性海面模型	152
5.2.2 海面回波多普勒谱频移	153
5.2.3 海面回波多普勒谱展宽	156
5.2.4 数值计算结果与讨论	157
5.3 动态海面散射杂波的混沌特性	162
5.3.1 一维动态粗糙海面后向散射杂波的混沌分析	163
5.3.2 二维动态海面后向散射杂波的混沌分析	169
5.4 分形在动态海面散射杂波研究中的应用	171
5.4.1 豪斯多夫测度和豪斯多夫维数	171
5.4.2 维数的几种计算方法	172
5.4.3 海面回波的分维数	177
参考文献	179
第 6 章 粗糙面与目标的复合电磁散射	181
6.1 矩量法在粗糙面与目标复合电磁散射中的应用	182
6.1.1 矩量法计算粗糙海面及其上方目标复合电磁散射	182
6.1.2 矩量法计算粗糙海面与其上方漂浮目标复合电磁散射	187
6.1.3 矩量法计算粗糙地面与其下方目标复合电磁散射	191
6.2 Kirchhoff 近似与矩量法的混合算法在粗糙面与目标复合散射中的 应用	198
6.3 时域有限差分方法在粗糙面与目标复合电磁散射中的应用	205
6.3.1 FDTD 在一维粗糙海面与二维目标复合电磁散射中的应用	205
6.3.2 FDTD 在一维分层高斯粗糙面与二维目标复合电磁散射中的应用 ...	208
6.3.3 FDTD 在二维高斯粗糙面与三维目标复合电磁散射中的应用	210
6.4 双尺度方法在粗糙海面及其与上方泡沫层复合散射中的应用	212

6.5	互易性定理在粗糙海面与目标复合电磁散射中的应用	219
6.5.1	互易性定理用于求解粗糙海面与其上方平板目标的复合电磁散射 ...	219
6.5.2	互易性定理用于求解粗糙海面与其上方尖锥目标的复合电磁散射 ...	241
	参考文献	250
第7章	粗糙面电磁散射的相关逆问题	253
7.1	基于空间场重构理论的粗糙面逆散射算法	253
7.1.1	频域逆散射算法	254
7.1.2	超宽带脉冲电磁波逆散射算法	261
7.2	粗糙面统计参数的反演与重构	267
7.2.1	分数布朗运动粗糙面的分维数重构算法	267
7.2.2	高斯粗糙面的相关长度和均方根高度的重构算法	280
7.3	基于遗传算法和粒子群优化的粗糙面参数反演	285
7.3.1	遗传算法在粗糙面参数反演方面的应用	285
7.3.2	粒子群优化在海上风速反演方面的应用	288
7.4	神经网络在粗糙面与目标复合散射模型建立中的应用	293
7.4.1	神经网络的基本理论	293
7.4.2	基于 RBF 神经网络的粗糙面与目标复合散射模型建立	295
	参考文献	299

第 1 章 随机粗糙面建模

1.1 随机粗糙面相关基本知识

实际的自然背景,如地面、海面、雪地、沙漠,以及各类人造表面等,均可以看成是二维随机粗糙面模型。对于一个给定的二维随机粗糙面,对光波来说可能呈现得很粗糙,而对微波来说却可能呈现得很光滑,这主要是因为随机粗糙面的粗糙度是以波长为度量单位的统计参数来表征的。描述随机粗糙面的统计量除功率谱密度外,还有高度起伏的概率密度函数和均方根高度、相关函数和相关长度、结构函数、特征函数、均方根斜率与曲率半径等。而在各种实际随机粗糙面模型中,有一类二维粗糙表面模型只沿着正交坐标系中的一个方向发生变化,而在另一个方向几乎不发生变化。为了便于研究,国内外的学者将这类实际粗糙表面简化成一维粗糙表面模型^[1~3]。尽管一维粗糙表面是最简单的粗糙表面模型,但是研究一维粗糙表面模型的电磁散射特性仍然具有重要的实际意义和广泛的应用价值。本节通过介绍一维随机粗糙面的各个相关统计概念来对随机粗糙面的特性进行详细说明。

1. 高度起伏概率密度函数

以一维情况为例,设随机粗糙面的高度起伏为 $z=f(x)$,如图 1.1 所示。它的概率密度函数反映了高度起伏的分布情况,用 $p(f)$ 表示,则 $p(f)df$ 为相对于平均平面高度为 $z \sim z+dz$ 的概率。获得了高度分布的概率密度函数 $p(f)$,就可以求出粗糙面的其他一些统计参量,如高度起伏的均值、高度起伏的均方根等。

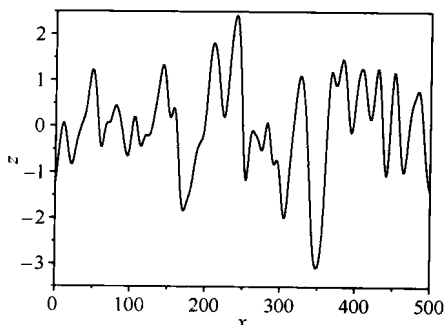


图 1.1 一维随机粗糙面示意图

高度起伏的均值定义为

$$\bar{f} = E[f(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} fp(f)df \quad (1.1)$$

$E[\cdot]$ 表示沿整个粗糙面求平均,通常都选取适当的参考面(一般取 $z=0$ 平面),使得相对于此参考面的高度 $f(x)$ 的均值为零,这会给计算带来很大的方便。

2. 高度起伏均方根

粗糙面的高度起伏均方根 δ 是反映粗糙面粗糙程度的一个基本量,它的最原始定义为

$$\delta = \sqrt{E[f^2(x)] - \{E[f(x)]\}^2} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 p(f)df - \left[\int_{-\infty}^{\infty} fp(f)df\right]^2} \quad (1.2)$$

通常可以通过数值计算得到:若以适当间隔对粗糙面进行离散,设采样点数为 N ,采样间隔为 Δx ,根据经验, Δx 一般选择为 $\Delta x \leq 0.1\lambda$ (λ 为入射波波长),然后对离散值 $f(x_i)$ 进行数值计算,计算公式为

$$\delta^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=1}^N (f_i)^2 - N \cdot (\bar{f})^2 \right] \quad (1.3)$$

其中, $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i$ 。

3. 相关函数

对于特定分布的粗糙表面,单一的均方根 δ 并不能唯一地描述粗糙面的特性,相关函数表明随机表面上任意两点间的关联程度,定义自相关函数为

$$G(R) = E[f(x)f(x+R)] \quad (1.4)$$

式(1.4)中当 $R=0$ 时, $G(0)=\delta^2$ 。进一步定义归一化自相关函数,即相关系数为

$$\rho(R) = \frac{G(R)}{\delta^2} = \frac{E[f(x)f(x+R)]}{\delta^2} \quad (1.5)$$

其中, δ^2 是表面的高度起伏均方差。一般随机粗糙面上的两点距离 R 增大,自相关函数减小。相关函数的形状取决于表面的类型,减小的快慢取决于表面两点不相关的距离。

高斯分布的相关函数

$$G(R) = \delta^2 \exp\left(\frac{-R^2}{l^2}\right) \quad (1.6)$$

其中, l 为相关长度, $R = |x_1 - x_2|$ 。

指数分布相关函数可以定义为

$$G(R) = \delta^2 \exp\left(\frac{-|R|}{l}\right) \quad (1.7)$$

相关系数 $\rho(R)$ 在 $R=0$ 时具有最大值 1, 随着 R 的增大, $\rho(R)$ 逐渐减小, 当 $R \rightarrow \infty$ 时, $\rho(R) \rightarrow 0$ 。把 $\rho(R)$ 降至 $1/e$ 时的 R 值称为表面相关长度, 记为 l , 即 $\rho(l) = 1/e$ 。

表面相关长度是描述随机粗糙面各统计参量中的一个最基本量, 它提供了估计表面上两点相互独立的一种基准, 即如果表面上两点在水平距离上相隔距离大于 l , 那么该两点的高度值从统计意义上说是近似独立的。在极限情况下, 即当表面为光滑表面(镜面)时, 面上每一点与其他各点都是相关的, 相关系数 $\rho(R) = 1$, 相关长度 $l \rightarrow \infty$ 。

4. 功率谱密度

将非归一化的 $G(R)$ 相关函数进行 Fourier 变换, 就可以得到高度起伏的功率谱密度 $S(k)$, 即

$$S(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(R) \exp(ikR) dR \quad (1.8)$$

同样, 相关函数也可以表示为 $S(k)$ 的逆 Fourier 变换

$$G(R) = \int_{-\infty}^{\infty} S(k) \exp(-ikR) dk \quad (1.9)$$

高斯分布随机粗糙面的功率谱密度为

$$S(k) = \frac{\delta^2 l}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{k^2 l^2}{4}\right) \quad (1.10)$$

指数分布的随机粗糙面的功率谱密度为

$$S(k) = \frac{\delta^2 l}{\pi(1 + k^2 l^2)} \quad (1.11)$$

5. 结构函数

对于具有分形特征的随机粗糙面^[4], 如分数布朗运动(fractal Brown motion, FBM)随机粗糙面和 Weierstrass 分形函数所描述的随机粗糙面, 其高度起伏的导数不连续, 方差发散。而结构函数是一个平稳随机过程, 因此, 研究其特性常选用结构函数, 结构函数定义为表面上两点高度差的均值, 即

$$D(R) = E[\{f(x) - f(x+R)\}^2] \quad (1.12)$$

它与相关函数实际是等效的, 对于平稳随机过程, 结构函数与相关函数的关系为

$$D(R) = 2\delta^2[1 - G(R)] \quad (1.13)$$

采用结构函数的一个优点是它与测量表面高度所选取的参考面无关, 从而给计算带来了方便。

6. 特征函数

特征函数定义为粗糙面高度起伏的概率密度函数的 Fourier 变换。这样一维特征函数的定义式为

$$\chi(s) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p(f) \exp(-isf) df \quad (1.14)$$

它提供了粗糙表面对波的相位调制的测度,同样包含了高度起伏概率密度的信息。

7. 均方根斜率

均方根斜率定义为表面上每一点的斜率的均方根值,即

$$\delta_s = \sqrt{E\left[\left(\frac{df}{dx}\right)^2\right]} \quad (1.15)$$

它与谱函数之间的关系为

$$\delta_s = \{E[S^2]\}^{1/2} = \left[\int k^2 S(k) dk\right]^{1/2} \quad (1.16)$$

1.2 随机粗糙面建模的蒙特卡罗方法

研究随机粗糙面的电磁散射特性,首先必须对粗糙表面进行建模。通过 1.1 节的简单介绍,了解了随机粗糙面功率谱的概念,利用功率谱函数,随机粗糙面可以采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法^[5]来模拟生成。蒙特卡罗方法又称线性滤波法,其基本思想是在频域用功率谱对其进行滤波,再作逆快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform,IFFT)得到粗糙面的高度起伏。

1.2.1 一维粗糙面建模的蒙特卡罗方法

由于粗糙表面被认为是由大量的谐波叠加而成,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^[5],即

$$f(x_n) = \frac{1}{L} \sum_{j=-N/2+1}^{N/2} F(k_j) e^{ik_j x_n} \quad (1.17)$$

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

$$F(k_j) = \frac{2\pi}{\sqrt{2\Delta k}} \sqrt{S(k_j)} \cdot \begin{cases} [N(0,1) + iN(0,1)], & j = -N/2+1, \dots, -1 \\ N(0,1), & j = 0, N/2 \end{cases} \quad (1.18)$$

其中,定义离散波数 k_j 的表达式为 $k_j = 2\pi j/L$, Δk 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 Fourier 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 Fourier 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。利用式(1.10)、式(1.17)和式(1.18),就可以模拟一维高斯随机粗糙面。

图 1.2 给出了不同均方根高度、相关长度的一维高斯粗糙面样本数值模拟图形。高斯粗糙面是一种最为典型的粗糙面,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极其重要的两个参数,它们的变化对粗糙面的起伏高度、起伏频繁程度都有很大的影响。从图 1.2 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。

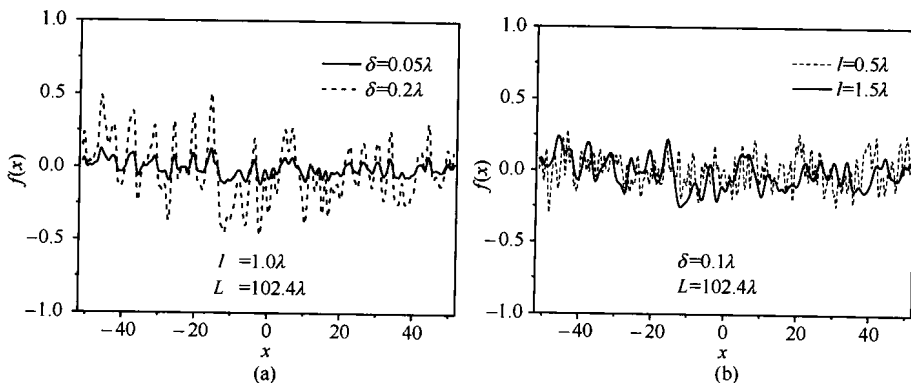


图 1.2 一维高斯随机粗糙面模型

同样,利用式(1.11)、式(1.17)和式(1.18),就可以模拟一维指数随机粗糙面,图 1.3 给出了不同均方根高度、相关长度的一维指数粗糙面样本数值模拟图形。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。

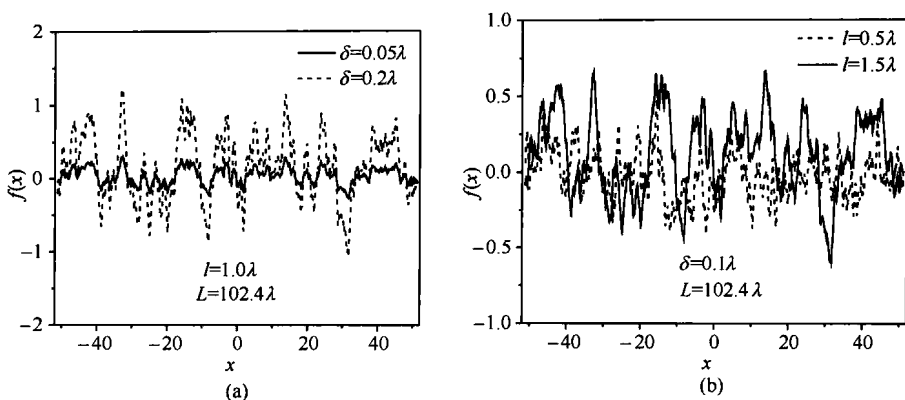


图 1.3 一维指数随机粗糙面模型

1.2.2 二维粗糙面建模的蒙特卡罗方法

与一维随机粗糙面的蒙特卡罗方法建模类似,假设要产生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 ,等间隔离散点数分别为 M 和 N ,相邻两点间的距离分别为 Δx 和 Δy ,即有 $L_x \approx M\Delta x, L_y \approx N\Delta y$,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^[6]

$$f(x_m, y_n) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m_k = -M/2+1}^{M/2} \sum_{n_k = -N/2+1}^{N/2} F(k_{m_k}, k_{n_k}) \exp[i(k_{m_k} x_m + k_{n_k} y_n)] \quad (1.19)$$

其中,

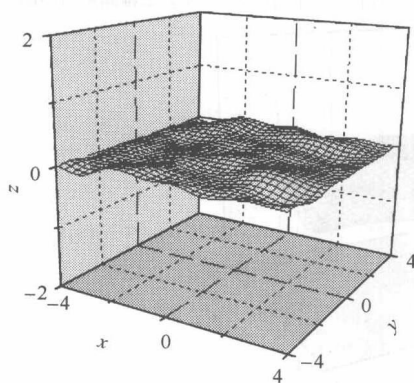
$$F(k_{m_k}, k_{n_k}) = 2\pi [L_x L_y S(k_{m_k}, k_{n_k})]^{1/2} \times \begin{cases} \frac{[N(0,1) + iN(0,1)]}{\sqrt{2}}, & m_k \neq 0, M/2 \text{ 且 } n_k \neq 0, N/2 \\ N(0,1), & m_k = 0, M/2 \text{ 或 } n_k = 0, N/2 \end{cases} \quad (1.20)$$

同样, $S(k_x, k_y)$ 为二维随机粗糙面的功率谱密度,其中, $k_{m_k} = 2\pi m_k / L_x, k_{n_k} = 2\pi n_k / L_y$ 。与一维粗糙面的蒙特卡罗方法建模一样,为了使 $f(x_m, y_n)$ 为实数,其 Fourier 系数必须满足条件 $F(k_{m_k}, k_{n_k}) = F^*(-k_{m_k}, -k_{n_k}), F(k_{m_k}, -k_{n_k}) = F^*(-k_{m_k}, k_{n_k})$ 。在具体计算式(1.20)时,通常是利用二维 IFFT 来实现的。

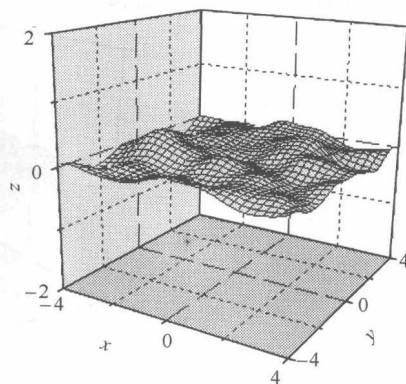
二维高斯粗糙面^[5,6]对应的功率谱为

$$S(k_x, k_y) = \delta^2 \frac{L_x L_y}{4\pi} \exp\left(-\frac{k_x^2 l_x^2 + k_y^2 l_y^2}{4}\right) \quad (1.21)$$

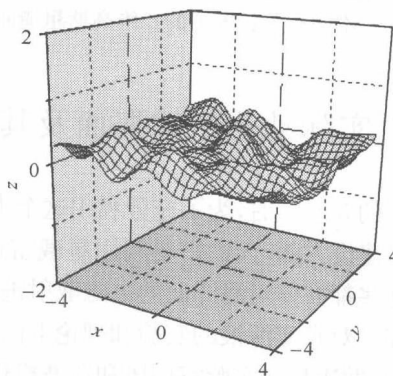
图 1.4 给出了均方根高度 δ 分别为 0.05λ , 0.1λ , 0.2λ 的二维高斯粗糙面模型, 其中, 相关长度 $l_x=l_y=1.0\lambda$, x 方向和 y 方向长度 $L_x=L_y=8.0\lambda$, 每个波长采样 8 个点。可以发现, 在相关长度相同的前提下, 均方根高度越大, 粗糙面的高度起伏变化就越大, 粗糙面的轮廓所能达到的峰值和谷值就越大, 这与前面一维高斯粗糙面的高度起伏变化特点是相同的。图 1.5 给出了相关长度 $l_x=l_y$ 分别为 0.5λ , 1.0λ , 1.5λ 的二维高斯粗糙面模型, 其中, 均方根高度 $\delta=0.1\lambda$, 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, 粗糙面变化就越频繁, 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。



(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 不同均方根高度下的二维高斯粗糙面模型

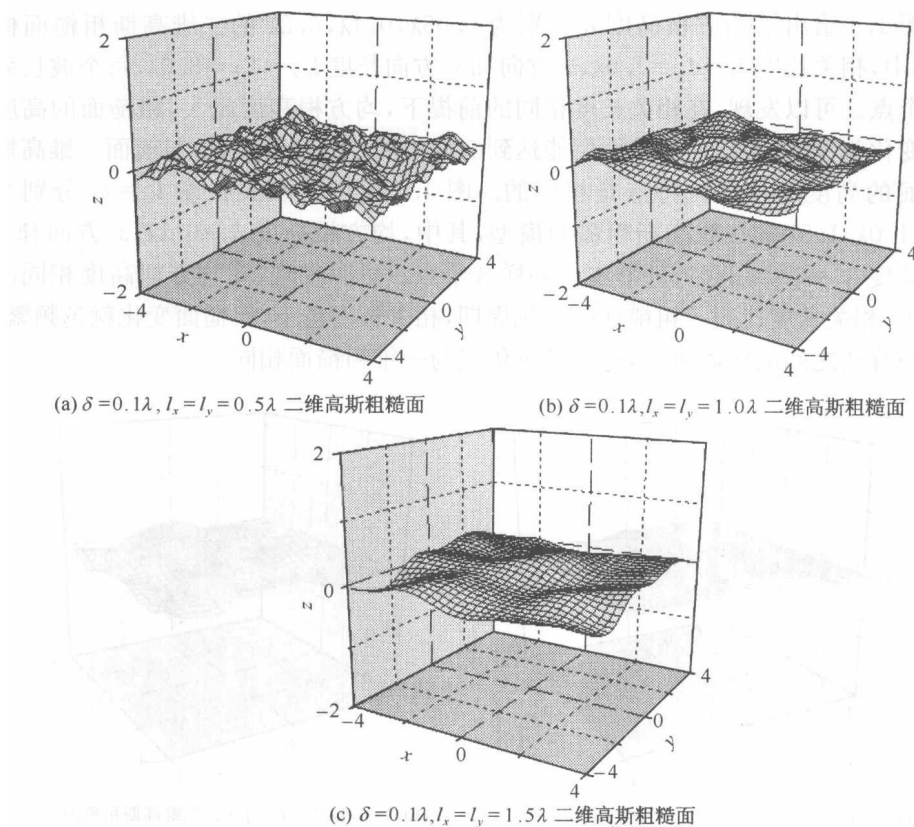


图 1.5 不同相关长度下的二维高斯粗糙面模型

1.3 实际动态粗糙海面及其建模

海洋面积占全球面积的 $3/4$ 左右,为了充分利用这个丰富的天然资源,人们需要对海洋进行遥感。在国防建设方面,人们需要利用星载雷达和机载雷达等在海洋背景下检测和识别目标。这些都需要对海洋面的电磁散射进行研究。早在 19 世纪,人们就开始了对海浪的研究。对真实海浪的实验和理论上的研究自然引发了人们对海浪进行模拟的想法,早期的做法是在实验室用风和造波机进行物理模拟,这在一定条件下具有可控性,方便了对海浪的测量和研究^[7]。随着计算机技术的发展,数值模拟显示了更大的灵活性和可控性,更由于它的低成本使得数值模拟海面得到了广泛应用。国内外许多实验室都已建立模拟池来模拟实际海面进行实验测量或者外场测量,提出了各种各样的海谱模型和经验公式。海浪是空域和时域上高度不规则和不重复的物理现象,其变化形势是事先无法预知的。从定性的角度来说,海面是在大尺