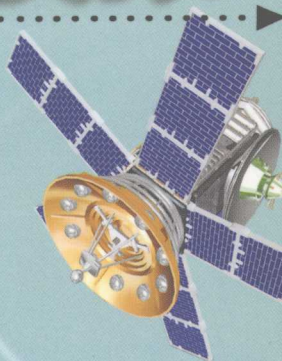


粗糙海面电磁散射 的 数值模拟

CUCAOHAIMIAN
DIANCISANSHEDE
SHUZHIMONI

姚纪欢 编著



粗糙海面电磁散射的数值模拟

姚纪欢 编著

中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目(CIP)数据

粗糙海面电磁散射的数值模拟/姚纪欢编著. —北京:
中国科学技术出版社, 2004. 7

ISBN 7-5046-3827-7

I. 粗... II. 姚... III. 海面-电磁波散射-数值
模拟 IV. P733.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 058852 号

中国科学技术出版社出版

北京海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话: 010-62103210 传真: 010-62183872

科学普及出版社发行部发行

北京长宁印刷有限公司印刷

开本: 850 毫米 × 1168 毫米 1/32 印张: 4.625 字数: 112 千字

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

定价: 16.00 元

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页
脱页者, 本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书从海面模拟、电磁散射计算、雷达回波分析和海面参数反演等方面对粗糙海面的电磁散射进行了数值模拟和理论分析。

本书可供无线电物理专业、电磁场微波技术专业的研究生,以及从事海洋微波遥感和海面背景下目标识别和检测的工程技术人员参考。

责任编辑：张楠

封面设计：谢成

责任校对：孟华英

责任印制：安利平

前 言

粗糙海面是在海面风、海水的重力和海水表面的张力的相互作用下形成的,这种相互作用是非线性的;电磁波照射到海面后,电磁波与海面的相互作用也是非线性的,因此采用非线性的理论和方法研究电磁波与海面的相互作用更能反映其物理本质。随着计算机技术的飞速发展,各种数值计算方法和智能化的分析理论和方法在科学研究和工程技术中越来越显示出其重要性和优越性,尝试它们在海面电磁散射中的应用也是很有意义的。

本书从海面模型的建立、海面电磁散射的数值计算、散射回波分析和海面参数的反演三个方面、分七章对粗糙海面的电磁散射进行了研究讨论。

第 1 章 绪论。

第 2 章 海面模拟。要对海面的电磁散射进行理论研究,首先就要建立合理的海面模型,包括其几何形状模型和介电常数模型。第一节给出了本书将要使用的计算海水介电常数的经验公式;第二节给出并比较了几种常见的海谱;第三节简述了描述海面的几个常用统计参量以及由海谱求这些参量的方法;第四、五和六节介绍了从海谱出发分别用统计模型和分形模型模拟粗糙海面的方法,同时给出一种用统计模型和分形模型混合模拟海面的新方法,并通过数值计算验证了它的正确性。

第 3 章 基本方程。由 Maxwell 方程导出了在计算粗糙面散射时常用的关于电磁场或边界上的面电流和面磁流积分方程形式。第一节是 Maxwell 方程和相应的 Helmholtz 方程的介绍;第二节通过矢量 Green 定理得到了散射体内外总场的积分表达;第三节列出

了常用的边界条件;第四节利用电磁场的积分表达和边界条件导出了在三维和二维的各种边界条件下的关于边界上面电流和面磁流的积分方程。

第4章 计算粗糙面散射的近似方法。Kirchhoff 近似(KA)、微扰法(SPM)和双尺度理论(TS)在海面的电磁散射中起着非常重要的作用,已有很多研究者对此进行了广泛的讨论。本章在总结现有成果的基础上,着重讨论如何提高这三种方法的精确度和用这三种方法计算分形粗糙面的电磁散射。第一节给出了 Kirchhoff 近似结果的矢量形式,并着重讨论了如何提高其精确性和用其计算时域电磁散射问题;第二节和第三节分别讨论了如何用这两种方法计算分形粗糙面的散射以及用粗糙面的曲率修正这两种方法提高其精度的问题。

第5章 计算海面电磁散射的数值方法。主要讨论两种数值方法 FDTD 和 MM。第一和第二节分别讨论了用 FDTD 和 MM 计算粗糙面散射的关键问题和具体步骤,用它们计算了一些粗糙面的散射并将计算结果和近似方法做了比较。但由于限于计算机的容量,这两种方法都不适合求解大尺度的问题,作为对这两种方法的一种改进,第三节给出了波束模拟法(Beam Simulation)。

第6章 回波分析。当电磁波照射到粗糙面后,其散射回波中包含着粗糙面的各种信息,因此对来自粗糙面的散射回波进行分析非常必要。本章着重分析来自分形粗糙面的电磁散射回波的各种特征。第一节分析散射系数随角度的变化规律;第二节分析散射系数幅值的概率分布特征;第三节讨论散射回波的分形特征;第四节分析其混沌特征。

第7章 参数反演。参数反演对于微波遥感等非接触测量是非常重要的。对于参数反演,人们已经进行了许多研究。传统的方法大多依赖于经验模型或针对不同的具体问题采用不同的技

巧。由于传统方法复杂性和缺乏通用性,近年来神经网络的出现,使人们有了进行参数反演的通用的简单方法。本章介绍了如何用神经网络和遗传算法进行参数反演。

感谢西安电子科技大学肖景明教授在百忙中对全书进行了认真的审阅。

由于作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2004年3月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 研究背景和意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(4)
第2章 海面描述	(8)
2.1 海水的介电常数	(8)
2.2 海谱	(11)
2.3 描述海面的统计参量	(18)
2.4 统计模拟	(22)
2.5 分形模拟	(25)
2.6 混合模拟	(29)
第3章 粗糙面电磁散射的基本方程	(32)
3.1 Maxwell 方程	(32)
3.2 积分表示	(36)
3.3 边界条件	(41)
3.4 积分方程	(42)
3.5 粗糙面电磁散射问题的解法	(46)
第4章 计算海面电磁散射的近似方法	(48)
4.1 Kirchhoff 近似	(48)
4.2 微扰法	(59)

4.3 双尺度法	(66)
第5章 计算海面电磁散射的数值方法	(71)
5.1 矩量法	(71)
5.2 时域有限差分方法	(77)
5.3 波束模拟法	(89)
第6章 散射回波特征分析	(96)
6.1 基本特征	(96)
6.2 幅值的概率分布特征	(100)
6.3 分形特征	(102)
6.4 混沌特征	(106)
第7章 参数反演	(109)
7.1 从高频雷达海面回波多谱勒谱反演海面参数	(109)
7.2 神经网络方法	(114)
7.3 用遗传算法反演参数	(122)
结束语	(126)
参考文献	(128)

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

雷达在现代科学技术、生活和军事等领域都得到了广泛的应用。其目的主要有两种,第一是遥感大气、陆地和海洋等,第二是在战争环境中检测和识别目标。这两种不同的应用都基于相同的电磁学原理:当电磁波照射到物体表面上时,表面上的正电子中心向负电子中心发生相对位移,形成电偶极矩,产生感应电流,随着入射波的极性交变,电偶极矩也发生交变,这种交变的电偶极矩产生二次辐射,从而发射交变电磁场,物体表面上所有电偶极矩辐射场的干涉迭加构成了空间场,即散射场。可见散射场是电磁波与被照射物体相互作用的结果,对于一定的入射场,它照射在有确定形状和介电特性的物体表面上所产生的辐射场是唯一确定的,因此物体的电磁散射回波中包含着被照射物体的几何形状和电磁特性信息。

在陆地和海洋等的遥感中,雷达波照射到地、海表面后所产生的散射回波中包含了地、海表面的有关信息,如土壤的含水量、农作物的成熟情况、海水的介电常数和浪高等。在利用雷达检测和识别处于地、海背景中的目标时,雷达波照射到目标后,其散射回波中包含了目标的信息,人们可以据此检测和识别目标。但是,与此同时雷达波也照射到了地、海背景,来自地、海背景的散射回波也进入了雷达的接收系统。在这种情况下,来自地、海表面的雷达回波是人们所不希望的,称之为雷达杂波。要有效地在地、海背景

下检测目标就要首先掌握地、海杂波的各种特征,以便消除或减小杂波的影响。由此可见,不论是利用雷达遥感地、海表面还是利用雷达在地、海背景下检测和识别目标,都必须研究电磁波与地、海表面的相互作用,也就是研究地、海表面的电磁散射。

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,人们对海洋进行遥感。在国防建设方面,人们需要利用星载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。国外对海洋面的电磁散射开展得早,也投入了大量的人力物力,对此进行了大量的实验和理论研究。国内在这方面的实测和理论研究都较少,严重影响着海洋遥感和军事技术的发展。本书正是在这种情况下结合我们所从事的国防科技预研基金项目进行的。

海面大多数情况下是一个不规则的时变的粗糙面,再加上它上面还可能还有泡沫和浪花等,因此研究实际海面的电磁散射需要考虑粗糙海面的面散射,还需要考虑其上泡沫和浪花的体散射。本书的讨论仅限于粗糙海面的面散射,没有考虑泡沫和浪花的体散射。海浪包括风浪、涌浪和涟漪等,从气象学和海洋学的角度来分析,海浪是气-水交互作用和波-波交互作用的产物,在此作用过程中,跨过界面出现了动量、能量和其他物理量的交换。其计算涉及了力学、数学,其自变量包括海水的密度、含盐度、温度、风的特性、重力常数、大气特性等。从定性的角度来看,海面是在大尺度的近似周期性的波浪上叠加波纹,大尺度用涌浪和风浪来描述,涌浪和风浪分别由远处风和当地风产生。海洋波按波的周期可分为重力波和表面张力波。重力波的时间标度为 $0.1 \sim 25\text{s}$,波长为 $2\text{cm} \sim 500\text{m}$,高度达 30m ;表面张力波的时间标度为 $0.1 \sim 0.01\text{s}$,波长为 $0.5 \sim 2\text{cm}$,高度小于 1cm 。

另外,粗糙面的电磁散射问题除了在电磁波与陆地和海面的

相互作用中可以遇到,还在其他许多情况下都能遇到,如电磁波与雨云湍流、冰雪、生物体组织和复合工程材料等的相互作用,这些都已成为现代电磁波传播、通信、遥感、材料几何、辐射、目标识别分类、环境系统监测、生物医学诊断、工程材料测试等众多不同学科共同感兴趣的课题。还有粗糙面的声波段和光波段的散射问题在很多情况下也能遇到。这些问题虽然使用的波段和研究的粗糙面有所不同,但应用的方法可以互相借鉴。因此,本文的研究可以借鉴声波段和光波段的散射以及电磁波在其他类型粗糙面上散射的计算方法,反之亦然。

海面具有非线性的几何结构,电磁波与海面的相互作用也是非线性的,因此采用非线性的理论和方法研究电磁波与海面的相互作用更能反映其物理本质。分形是不能用通常的长度、面积、体积表示的几何形状,其内部存在着无穷层次,具有见微知著、由点及面的自相似结构。自相似即局部与整体的相似性。适当放大或缩小几何尺寸,分形的整个结构分布改变,这就是标度不变性。换言之,分形是局部以某种方式与整体相似的形态。分形可以有多种类型,如简单分形、自仿射分形、复分形、随机分形、胖分形和复平面上的分形等。描述分形特征参数叫分维数或分维。花菜、海岸线、闪电、松花蛋、树枝以及海面在一定的空间波数范围内都是分形的,因此分形所刻画的海面最接近自然海面。另外,小波和混沌也是研究非线性问题的有力工具。

随着计算机技术的飞速发展,各种数值计算方法和智能化的非线性分析理论和方法在科学研究和工程技术中越来越显示出其重要性和优越性。矩量法和时域有限差分方法是计算粗糙面电磁散射的两种重要的数值方法,利用它们可以研究各种近似方法的有效性,也可以用来直接计算工程中的电磁散射问题。人工神经网络和遗传算法是两种智能化的非线性分析工具,尝试它们在海

面电磁散射中的应用也是很有意义的。

1.2 国内外研究现状

粗糙海面的电磁散射研究包括三个方面:建立海面模型、计算电磁散射以及分析回波和反演参数。

建立海面模型一定要基于实验测量。由于海谱已足以用来研究一部分有关的理论与应用问题,还有海谱最容易由观测得到,因此人们总是先由实验得到海面的功率谱,然后再在此基础上利用谱理论提取各种海面参数或重构海面。海谱可分为重力波谱和张力波谱。最早重力波谱是 Neumann 谱^[1,2],它是半理论半经验的适用于充分成长风浪的重力波谱。此谱所根据的观测资料较粗糙,推导过程的一些假定也引起人们的争论,这连 Neumann 本人也承认,但谱的形状、随风速变化的特征以及由它计算出来的海浪要素,在一定范围内与实际是符合的。此谱在 20 世纪 50 ~ 60 年代初应用最广。接下来的重力波谱是 PM 谱,它是 Moscowitz^[3]在 1964 年对北大西洋上 1955 ~ 1960 年的观测资料进行分析总结,并由 Pierson 和 Moscowitz^[4]对其进行无因次化得到的。它也代表充分发展的海浪,但与 Neumann 谱相比,它具有较充分的观测资料,分析方法也较为有效,故自 60 年代中期后,PM 谱在海浪研究及有关工程问题中得到广泛应用,逐渐取代了 Neumann 谱。再后来的是 JONSWAP 谱^[5],它是英、荷、美、德等国为了适应北海开发的需要于 1968 ~ 1969 年在丹麦、德国边境西海岸对海浪进行系统观测得到的。它是当时为止对海浪最为系统的观测,其合理性也被后来的许多研究所证实。它在高频部分与 PM 谱相同,但在峰值附近显著地高。Phillips^[6,7]也基于实验并结合流体动力学得到了对充分发展的海浪在频率约大于 PM 谱和 JONSWAP 谱峰值频率 2

倍以上的重力波谱。在其适用的范围内,它与 PM 谱和 JONSWAP 谱基本上是一致的。后来 Pierson 又得到了张力波谱^[8]。1982 年 Fung^[9]等人为了研究海面的电磁散射将 PM 谱与 Pierson 的张力波谱相结合,得到了一种既包括重力波谱又包括张力波谱的完全海谱,我们称其为 Fung 的半经验海谱。1994 年 Apel^[10]在 Donelan^[11,12]、Banner^[13]和 Jähne^[14]等人工作的基础上总结出了一种完全海谱被称为 D-B-J 谱。它是迄今为止比较好的一种海谱。

从海谱出发人们可以重构海面。Pierson^[15]最早提出用正弦或余弦函数的迭加来重构海面,这样所重构的海面可以是二维的也可以是时变的。Borgman^[16]、Fung^[17]、Thorsors^[18]等用所谓的线性滤波方法或称为 Monte Carlo 重构海面。这种方法是一种数值方法,且只能重构某一时刻的海面,也即用此法不能产生随时间变化的海面。以上两种方法都属于统计方法。分形是 Mandelbort^[19]在 1975 年提出的一种适合描述自然粗糙面的一种非线性理论,后来许多人对用分形重构海面进行了研究。用分形函数重构的海面能很好地反映海面的非线性,它既能显示大尺度的周期有序又能体现小尺度的随机性,是描述海面的一种很好的方法。不过因为分形函数具有负幂律谱,所以只有在海面功率谱呈负幂律谱空间波数范围内才能用分形模拟^[20]。

自 20 世纪 40 年代雷达用于海洋环境检测以来,海面的电磁散射就引起了人们的兴趣^[21]。到现在为止,海面的电磁散射研究已取得了丰富的成果,计算海面电磁散射的方法已有许多种,它们可以分为解析的近似方法和精确的数值方法两大类。近似方法以 Kirchhoff 近似 (Kirchhoff Approximation, KA)^[22~26]、微扰法 (Small Perturbation Method, SPM)^[28~30,23,26]和双尺度方法 (Two Scale, TS)或称为复合面模型 (Composite Surface Model, CSM)^[23,27,31~35]。

应用最为广泛。TS 是人为地把海面分为大尺度和小尺度两部分,大尺度应用 Kirchhoff 近似,而小尺度应用 SPM,最后的结果是小尺度的 SPM 的结果按大尺度的斜率的平均。这种方法在解释海面的小入射角电磁散射上已取得了成功,但该方法仍存在一些问题。一是大尺度和小尺度的分界限问题,二是该方法本身依据的两个方法 KA 和 SPM 都是近似方法。近年来,也出现了一些新的解析方法^[36~42],但都还没有获得广泛的认可和应用。随着电子计算机的出现,产生许多计算海面电磁散射的数值方法^[17,43~57]。数值法中应用最为广泛的是矩量法(Moment Method, MM, 或称为 Method Of Moment, MOM)^[58,17]。MM 直接求解的是由 Maxwell 方程和边界条件导出的关于粗糙面上的面电流和面磁流的积分方程,因此它把电磁波与粗糙面的各种相互作用(如多次散射和遮挡效应等)都包括在其中,是一种精确的方法。但当随着计算区域增大,应用 MM 时的未知变量个数急剧增加,即使使用现在的高档计算机也难以求解,因此近年来出现了许多基于 MM 的修正的数值方法^[49,52,59,60],但这些方法一般都较 MM 复杂得多。时域有限差分方法(Finite Difference Time Domain Method, FDTD)^[61,62]是计算有限目标散射一种数值方法,也能用来计算粗糙面的电磁散射^[63,64]。FDTD 是直接求解时域的 Maxwell 方程,因此它不仅用来计算频域问题也能用来计算时域问题,并且粗糙面是否可看作导体对计算量影响不大。FDTD 也有与 MM 同样的问题,即计算区域不能太大。

关于散射回波,开始人们基于 Rayleigh 分布、K 分布^[65~70]等统计模型对其进行分析。虽然这些模型对分析散射回波是非常有用的,但它并未揭示其物理本质,因为选择这些模型更多地是出于数学上的方便,而非物理机制的考虑。近年来人们尝试用分形^[71~73]、混沌^[74~77]等非线性工具分析散射回波并应用于目标检

测和识别^[78~80],取得了一定的成果,显示了诱人的前景。

利用雷达散射回波反演海面参数是人们在海上应用雷达的最终目的,为此人们研究了许多方法^[78~80]。由于由回波参数到海面参数一般是一对多的或多对多的,因此应用传统数学工具由回波参数反演海面参数是复杂的和困难的。新兴的神经网络(Artificial Neural Network, ANN)是一种适合于解决非线性问题的智能化工具,近年来人们对 ANN 在参数反演方面的应用也作了一些探讨^[81~83]。国外 Frate^[81]用 ANN 反演了大气中的水汽含量, Ishimura^[82]用 ANN 反演了高斯粗糙面的均方高和相关长度,国内金亚秋^[83]用 ANN 反演了植被的生物量参数。研究结果都表明,用神经网络由粗糙面的散射回波反演粗糙面参数是一种有效的方法。