

Radar Phenomenological Models
for Ships on Time-evolving Sea Surface

时变海面雷达目标 散射现象学模型

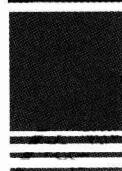
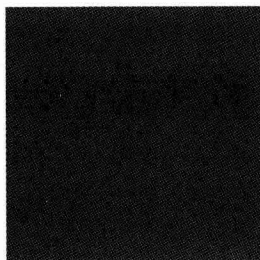
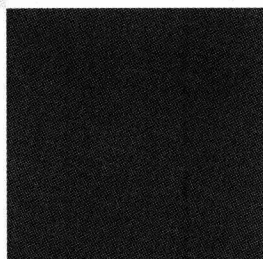
许小剑 李晓飞 刁桂杰 姜丹 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

许小剑 李晓飞 刁桂杰 姜丹 著



Phenomenological Models for
Time-evolving Sea Surface

时变海面雷达目标 散射现象学模型

国防工业出版社



00000000000000000000



尽管从第一部雷达的发明至今已有 100 多年的历史，合成孔径雷达（SAR）成像概念的出现也将近 60 年，高分辨率成像雷达广泛用于对海洋的遥感则是最近 30 年~40 年的事情，大体上可追溯到 1978 年美国发射第一颗海洋遥感合成孔径雷达卫星 SeaSat 前后。随着最近 10 多年来世界各国相继发射了越来越多且分辨率越来越高的 SAR 成像雷达卫星，星载高分辨率 SAR 成像已开始海洋环境监测、航海安全、渔业管理以及海面目标的检测、监视与识别等方面发挥着越来越重要的作用。在这些民事或军事应用中，为了达到对海面物理参数的精确反演以及对海面目标的健壮检测与识别，不但要求成像雷达系统本身具有很高的距离和方位分辨率，同时也离不开对雷达波同随时间演进的海面以及海面目标之间的相互作用所产生物理现象的深刻理解。掌握关于目标（海面舰船）及其所处背景（海杂波）电磁散射特性的精确知识，是海洋微波遥感参数反演和目标检测与识别处理算法设计及优化的必要前提。

海面状况受到诸多因素影响，包括天气状况、地理位置、风速等，而且是随时间演进变化的。复杂的海表面几何结构、粗糙面散射元间复杂的相互作用、海浪的时变特性和随机特性等均对海面的雷达散射构成重要影响。

经过几十年来的理论和实验研究，人们对于解释海面电磁散射现象的宏观模型已经达成了广泛的共识。大体上，海面的动态特性可由海水温度、盐度、海况和海浪方向等主要参数来描述。温度和盐度决定了海水的介电常数，海况条件决定了海浪的振幅（起伏程度）和波长（起伏频度）。海面的起伏特性主要由 2 种不同机理的波——重力波和毛细波——所决定。重力波主要由各种重力对海水的影响汇聚而成，它最初也可能是由于受到风吹、风暴或温度突变等其他气象条件的影响而产生的，具有较大的振幅和较长的波长（大于 2cm），在海面上表现为沿大片的海域扩散，因而具有较长的相关距离。重力波携带了海洋的主要能量，其特性决定了海况特性，是影响海面目标运动特性的主要因素。毛细波是叠加在重力波之上的，主要由风生而成，反映了海水的表面张力，一般具有较小的振幅和较短的波长（小于 2cm），但数量众多。事实上，

即便在几乎完全无风的气象条件下,也能看到海表面连续而随机的运动,这种运动既无所不在又具有显著的局部性。此外,尽管毛细波所携带的能量很小,但毛细波的上述特性可以在海面的雷达散射回波中明显表现出来。重力波和毛细波相互叠加,大尺度的重力波受到小尺度毛细波的调制,在海面的雷达散射现象学研究中把这一现象归结为海面散射的“双尺度模型”。

另外,舰船目标本身属于超电大尺寸、超复杂结构目标,其电磁散射的准确计算和预估十分困难;驻泊或航行于海面的舰船受到动态海面水动力的驱动产生6自由度运动,对舰船的雷达回波形成调制作用;此外,舰船目标与海面之间还存在复杂的电磁散射耦合现象。上述3个方面的共同作用,使得时变海面与目标的雷达散射建模问题变得异常复杂,制约了这一重要课题的研究进展。

“时变海面雷达目标散射现象学模型”这一选题正是应对上述技术挑战而提出来的。本书试图基于最基本的物理现象和简化的数学模型,从时变海面电磁散射基本理论、海面后向散射调制特性及其统计模型、海面目标的电磁散射建模与散射机理分析以及海面与目标的高分辨率成像特性建模等4个方面,对时变海面雷达目标散射现象进行建模、仿真和分析。全书共分为12章,按照以上思路大致分成4个模块,分别介绍如下:

模块1:时变海面电磁散射基本理论和方法,由第1~3章组成。其中:

第1章讨论用于海面电磁散射研究的各种海谱模型及其基本特性,包括PM、JON-SWAP、Fung、DV、Apel以及NRL海谱模型,对各种海谱模型的功率谱密度分布和高度自相关特性进行了对比研究,并在此基础上对二维方向海谱中的方向扩展函数做了进一步的讨论。本章所给出的海谱模型为后续的海面生成和电磁散射现象分析提供必要的理论模型准备。

第2章讨论时变粗糙海面生成方法。首先讨论一维和二维线性与非线性时变粗糙海面生成的技术与仿真方法,然后对不同海谱模型所生成的海面特性进行对比分析,并对线性与非线性海面的统计特性差异进行深入的分析。本章的内容为后续各章节的仿真和分析提供时变粗糙海面生成的基本方法。

第3章讨论粗糙海面电磁散射计算方法。首先介绍归一化雷达散射截面(NRCS)的概念,然后讨论粗糙面散射的几种常用方法,包括双尺度复合散射模型、小斜率近似方法(SSA)和快速迭代法(MOMI)。基于双尺度模型求解粗糙海面的后向散射系数,比较了不同海谱模型计算的后向散射系数随雷达频率、入射角、入射方位以及风速等因素的变化特性。采用SSA和MOMI方法计算单帧“冻结的”海面散射场,并在此基础上综合分析不同电磁散射计算方法、不同海水介电特性以及波浪间非线性水动力作用等对海面后向散射特性的影响。本章的研究结论为后续的研究中电磁散射计算方法的选择提供基本依据。

模块2:时变海面的后向散射调制特性及其统计模型,由第4~7章组成。其中:

第4章研究时变海面后向散射信号的多普勒谱特性。鉴于海面后向散射多普勒谱特性对海态反演、海面运动目标探测和识别的重要性,本章以线性和 Creamer 非线性时变海面为基础,研究海面后向散射信号的多普勒谱随雷达入射角和风向等因素的变化特性,重点分析长波与短波间的非线性水动力作用对多普勒谱展宽和频移的影响,同时也分析了不同海面和不同电磁散射计算方法在时变海面多普勒谱特性建模与仿真中的有效性和结果差异。

第5章分析时变海面对后向散射信号幅度与相位的调制机理。针对数值计算得到的时变海面后向散射信号,通过分析其“散斑”分量的相关特性和“纹理”分量的调制作用,揭示电磁散射计算生成的海面雷达回波的调制机理。基于复合高斯场,采用理论分布模型来研究后向散射信号幅度和相位的统计特性。一方面,引入 Middleton 模型分析相位差的统计分布,研究短时间尺度上杂波的联合高斯分布特性;另一方面,引入幅度比统计模型来预测海杂波的幅度起伏统计分布以及海杂波幅度随时间间隔的变化特性。此外,还对不同雷达频率和不同入射角下快变化“散斑”分量的相关特性和慢变化“纹理”分量的调制作用进行了深入分析。

第6章讨论海杂波的统计模型,重点研究基于复合 K 分布模型的海杂波建模与仿真技术。首先对常用于海杂波后向散射系数计算的4种半经验模型,即 SIT 模型、GIT 模型、TSC 模型和 HYB 模型进行了总结,并对几种常见的杂波统计模型,包括韦布尔分布、对数-正态分布和复合 K 分布模型进行了简要讨论。提出了利用海面散射系数计算的半经验模型估计复合 K 分布的形状参数 ν 和尺度参数 c 的方法。最后,提出了一种用于海面后向散射系数实时生成的通用三参数统计模型,导出了符合韦布尔分布、对数-正态分布和复合 K 分布这3种经典统计模型的海面后向散射系数统计生成函数,讨论了用实测数据均值和标准偏差拟合优化函数参数的思想。

第7章研究空-时相关的海杂波统计建模与仿真技术。首先讨论海杂波的时间相关和空间相关特性模型,然后研究基于复合 K 分布模型的空-时相关的海杂波建模方法与仿真技术,重点讨论了空-时相关的海杂波仿真的外因乘积模型,并通过2个仿真示例演示空-时相关海杂波统计建模与仿真的具体步骤,同时验证方法的有效性。

模块3:时变海面目标的雷达散射建模、仿真与散射机理分析,由第8、9章组成。其中:

第8章讨论时变海面舰船目标的运动特性模型。海面舰船目标的运动既非常复杂,又遵循一定的水动力学原理,舰船目标的运动特性建模是时变海面目标动态散射特征信号研究的前提。本章从海面波浪的随机特性以及船舶运动的水动力学特性出发,建立受海况条件、舰船吨位、航速以及风向角等变化影响的海面舰船目标运动特性模型,为后续的海面舰船目标雷达散射现象学模型的建立奠定必要的运动特性模型基础。

第9章研究时变海面目标的多径散射现象及其建模。首先提出了时变海面舰船目标多径电磁散射建模的总体思路,然后讨论二维粗糙海面的时变复反射系数模型以及舰

船目标电磁散射计算的高频渐近方法,在此基础上将上述模型同海面目标运动特性模型相结合,建立了时变海面运动目标的多径散射现象学模型。利用缩比舰船模型的微波暗室和造波池测量结果以及海面浮标球的 IPIX 雷达实测数据对模型所反映出的基本雷达散射现象进行了分析和验证。最后,通过模型仿真计算,对时变海面活动舰船目标的散射机理和现象进行了深入分析和讨论。

模块 4: 时变海面与目标的高分辨率成像特性建模、散射现象分析及其在目标探测识别中的应用,由第 10~12 章组成。其中:

第 10 章探讨目标一维高分辨率距离像(HRRP)幅度和相位的统计建模及其在海面目标探测识别中的应用,试图从宏观层面阐述并演示如何将时变海面活动舰船目标的雷达散射机理和现象学模型应用于海面目标的雷达探测与识别中。本章首先讨论用于目标幅度与相位特性的两类统计建模技术—— α -stable 模型和混合模型方法,同时还研究基于 HRRP 的相位闪烁特性分析方法。利用 α -stable 统计分布模型,对比分析舰船目标与海杂波的 HRRP 幅度和相位闪烁特性,讨论了目标与海杂波背景之间的可分性,进而研究 α -stable 模型如何用于强海杂波中舰船目标的探测。提出一种将复 HRRP 时间序列的相位闪烁统计特征同幅度熵相结合的目标探测新算法,其显著优点是,即使在较低的信杂比条件下,该算法仍能健壮地鉴别出强海杂波中舰船目标所占据的距离单元,从而为后续目标分类识别提供必要条件。最后,讨论了基于复 HRRP 和高斯混合模型的海面舰船目标识别技术。

第 11 章讨论时变海面活动舰船目标的 SAR 成像模型。首先讨论海面目标 SAR 成像信号生成的总体技术思路,给出 SAR 成像基本几何关系和信号生成总体流程;接着研究理想和非理想轨迹下场目标 SAR 回波信号生成的快速算法,为海面场景 SAR 回波快速生成与仿真奠定算法基础。在对目标和海面的电磁散射计算模型、海面目标运动特性模型、SAR 信号生成模型、海面复反射系数模型以及海面目标多径散射信号模型进行综合集成的基础上,建立了时变海面运动舰船目标的 SAR 回波信号生成模型。对海面目标的 SAR 和 ISAR 成像算法进行了简要综述。最后,利用所建立的 SAR 成像模型和成像算法,针对不同海况条件下时变海面目标开展了一系列的 SAR 和 ISAR 成像仿真试验,并对海面活动舰船目标的雷达散射现象和成像机理进行了深入分析。

第 12 章讨论海面目标的宽带单脉冲三维成像技术。首先分析单脉冲测角原理及单脉冲雷达和差通道信号的数学表达,建立海面目标宽带单脉冲雷达信号模型,该模型同时考虑了基于宽带单脉冲体制的 SAR 成像几何关系,并融入舰船目标电磁散射模型、舰船水动力学模型及海面和目标电磁耦合的多径散射模型。在此基础上,提出了一种基于多帧 HRRP 的宽带单脉冲三维成像方法,结合角闪烁抑制方法改善了单脉冲三维成像效果,它既弥补了传统的基于单帧 HRRP 单脉冲成像中提取的目标散射信息较单一的缺点,又避免了通过 ISAR 处理再进行三维成像中的复杂信号处理。最后,通过理论分析和仿真试验,深入研究了海面多径散射对舰船目标单脉冲

三维成像的影响。

本书是在汇集作者所在北京航空航天大学遥感特征实验室多年来在该领域基础理论研究成果的基础上而形成的,书稿由许小剑、李晓飞、刁桂杰和姜丹4位作者执笔完成。其中,第1、2、6、7、10章由许小剑主笔,第3、4、5章由李晓飞主笔,第8、9章由姜丹主笔,第11、12章由刁桂杰主笔,全书的结构安排和统稿由许小剑完成。在本书的编写过程中,得到北京航空航天大学电子信息工程学院毛士艺教授、孙进平教授、陈炜和袁运能副教授等诸多同仁的支持和帮助,书中一些结果直接来自于本实验室已毕业的历届研究生王彩云、王勇、隋森、崔凯博士以及林亚、陈广文硕士等的学位论文研究成果。此外,书稿的校核工作还得到实验室王佳宁、顾丹丹、陈鹏辉等博士生的帮助,在此一并表示感谢。

本书的研究工作得到国家安全重大基础研究计划、总装备部武器装备预先研究计划和预研基金等项目的资助。在书稿形成过程中,得到黄培康院士、潘旭东首席科学家等专家的指导,还得到总装备部主管机关领导以及吴兴无、李芄芃两位项目管理办公室主任的关心和大力支持。国防工业出版社为本书的编辑和出版付出了辛勤的努力。在此一并致以最诚挚的谢意。

“明知山有虎,偏向虎山行。”可以说,这正是本书第一作者近10年来带领诸多研究生在该问题上探索研究过程的一种心路历程的写照。鉴于问题的极其复杂性,作者并非企图通过区区12章对时变海面雷达目标散射现象学模型有完整的论述,而是希望通过对本实验室多年来围绕该课题的研究和认识进行总结并出版,可以对本领域其他研究人员有些许帮助或启发,起到“抛砖引玉”的作用,为推动该领域研究工作不断取得新的进展贡献自己绵薄之力。

由于作者的知识结构和学识水平所限,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者
2012年6月于北京



00000000000000000000



第1章 海谱模型	001	Chapter 1 Sea Spectral Models	001
1.1 概述	001	1.1 Introduction	001
1.2 风浪与海谱	002	1.2 Waves and Sea Spectrum	002
1.2.1 基本定义	002	1.2.1 Fundamental definitions	002
1.2.2 几何关系	004	1.2.2 Rough sea surface geometry	004
1.2.3 海浪与风速	004	1.2.3 Sea waves and wind speed	004
1.3 常见的海谱模型	006	1.3 Various Sea Spectral Models	006
1.3.1 PM 海谱模型	006	1.3.1 PM model	006
1.3.2 JONSWAP 海谱模型	008	1.3.2 JONSWAP model	008
1.3.3 Fung 海谱模型	009	1.3.3 Fung model	009
1.3.4 DV 海谱模型	010	1.3.4 DV model	010
1.3.5 Apel 海谱模型	011	1.3.5 Apel model	011
1.3.6 NRL 海谱模型	012	1.3.6 NRL model	012
1.4 海谱之间的特性比较	013	1.4 Comparison among Various Sea Spectral Models	013
1.4.1 主波浪方向波数谱特性	013	1.4.1 Wavenumber spectral characteristics along the major wave direction	013
1.4.2 方向扩展特性	018	1.4.2 Characteristics of directional expansion	018
1.4.3 自相关特性	019	1.4.3 Auto-correlation characteristics	019
1.5 关于方向分布函数的进一步讨论	020	1.5 Further Discussion on the Directional Expansion Models	020
1.5.1 Mitsuyasu 和 Hasselmann 模型	020	1.5.1 Mitsuyasu and Hasselmann model	020
1.5.2 Donelan-Banner 模型	021	1.5.2 Donelan-Banner model	021
1.5.3 Ewans 模型	021	1.5.3 Ewans model	021
1.5.4 Hwang 模型	022	1.5.4 Hwang model	022
1.6 小结	024	1.6 Summary	024
参考文献	025	References	025

第2章 时变粗糙海面生成**方法**

027

2.1 概述	027
2.2 线性时变海面生成方法	028
2.2.1 双线性叠加法	029
2.2.2 标准海谱方法	030
2.3 非线性时变粗糙海面生成方法	031
2.3.1 一维非线性海面生成	031
2.3.2 二维非线性海面生成	031
2.4 不同海谱模型所生成海面的特性对比	033
2.4.1 风速的影响	033
2.4.2 风向的影响	036
2.5 线性与非线性海面特性差异分析	037
2.5.1 一维线性与非线性时变海面特性比较	037
2.5.2 二维线性与非线性时变海面特性比较	039
2.6 小结	041
参考文献	042

第3章 粗糙海面的电磁散射计算

044

3.1 概述	044
3.2 归一化雷达散射截面	045
3.3 典型粗糙面电磁散射计算方法	046
3.3.1 双尺度复合散射模型	046
3.3.2 小斜率近似方法	048
3.3.3 快速迭代法	053
3.4 不同海谱模型时的海面后向散射系数对比	057
3.4.1 后向散射系数与入射角的关系	057
3.4.2 后向散射系数与入射方位角的关系	060

Chapter 2 Methods for Rough Sea Surface Generation

027

2.1 Introduction	027
2.2 Generation of Linear Time-evolving Sea Surfaces	028
2.2.1 Bi-linear supersition method	029
2.2.2 Standard sea spectral method	030
2.3 Generation of Nonlinear Time-evolving Sea Surfaces	031
2.3.1 One-dimensional (1D) nonlinear sea surface generation	031
2.3.2 Two-dimensional (2D) nonlinear sea surface generation	031
2.4 Comparison of Characteristics among Sea Surfaces Generated Using Different Sea Spectral Models	033
2.4.1 Impact of wind speed	033
2.4.2 Impact of wind direction	036
2.5 Analysis of the Differences between Linear and Nonlinear Sea Surfaces	037
2.5.1 Comparison of 1D time-evolving sea surfaces	037
2.5.2 Comparison of 2D time-evolving sea surfaces	039
2.6 Summary	041
References	042

Chapter 3 Calculation of Electromagnetic (EM) Scattering from Rough Sea Surfaces

044

3.1 Introduction	044
3.2 Normalized Radar Cross Section (NRCS)	045
3.3 Typical Techniques for Calculation of EM Scattering from Rough Surfaces	046
3.3.1 Two-scale composite scattering model	046
3.3.2 Small-slope approximation (SSA) method	048
3.3.3 Method of ordered multiple interaction (MOMI)	053
3.4 Comparison of Backscattering Coefficients Calculated Using Different Sea Spectral Models	057
3.4.1 Backscattering coefficients vs. incidental angle	057
3.4.2 Backscattering coefficients vs. azimuthal angle	060



3.4.3	后向散射系数与风速的关系	061
3.4.4	后向散射系数与入射频率的关系	062
3.5	电磁计算模型和海面特性对散射计算结果的影响	063
3.5.1	电磁散射计算方法对 NRCS 的影响	063
3.5.2	介质海面与非介质海面的 NRCS 对比分析	064
3.5.3	海面非线性作用对 NRCS 的影响	065
3.6	小结	066
	参考文献	067

第4章 时变海面后向散射多普勒谱特性 069

4.1	概述	069
4.2	时变海面后向散射多普勒谱的基本特性	070
4.2.1	时变海面后向散射多普勒谱	070
4.2.2	影响海面后向散射多普勒谱的主要因素	071
4.3	海面散射多普勒谱计算方法	073
4.4	一维海面后向散射信号多普勒谱特性研究	074
4.4.1	线性与非线性海面多普勒谱特性对比分析	074
4.4.2	不同散射计算方法在多普勒谱仿真中的有效性分析	078
4.5	二维海面后向散射信号多普勒谱特性研究	080
4.5.1	基于 SSA2 的二维线性海面多普勒谱研究	080
4.5.2	二维海面非线性作用对多普勒谱的影响与分析	083
4.6	一维同二维非线性海面多普勒谱差异分析	088
4.7	小结	089
	参考文献	090

3.4.3	Backscattering coefficients vs. wind speed	061
3.4.4	Backscattering coefficients vs. frequency	062
3.5	Impact of Different EM Calculation Techniques and Sea Surfaces on the Calculated Scattering Characteristics	063
3.5.1	Impact of different EM calculation techniques	063
3.5.2	Comparative study of dielectric and conducting sea surfaces	064
3.5.3	Impact of nonlinear sea surfaces	065
3.6	Summary	066
	References	067

Chapter 4 Doppler Spectral Characteristics of Backscattering from Time-evolving Sea Surfaces 069

4.1	Introduction	069
4.2	Properties of Doppler Spectra for Backscattered Signals from Time-evolving Sea Surface	070
4.2.1	Doppler spectra of backscattered signals from time-evolving sea surface	070
4.2.2	Major impacting factors for Doppler spectra	071
4.3	Method for Doppler Spectral Analysis of Backscattering from Sea Surfaces	073
4.4	Doppler Spectral Characteristics of Backscattering from 1D Sea Surfaces	074
4.4.1	Comparison of Doppler spectra between linear and nonlinear sea surface	074
4.4.2	Validity for Doppler analysis of different scattering calculation techniques	078
4.5	Doppler Spectral Characteristics of Backscattering from 2D Sea Surfaces	080
4.5.1	Doppler spectra for 2D linear sea surface based on SSA2	080
4.5.2	Impact of nonlinearity on Doppler spectra	083
4.6	Differences of Doppler Spectra between 1D and 2D Nonlinear Sea Surfaces	088
4.7	Summary	089
	References	090

第5章 时变海面后向散射 信号调制机理

	092
5.1 概述	092
5.2 复合高斯模型	093
5.2.1 基于双尺度的复合 高斯调制理论	093
5.2.2 基于CG调制机理的 海杂波幅度统计模型—— 复合K分布	094
5.3 基于复合高斯调制机理的 相位理论分布模型	096
5.3.1 相位差理论模型	096
5.3.2 相位差分布随时间间隔的 变化特性	098
5.4 基于复合高斯调制机理的 幅度理论分布模型	099
5.4.1 幅度比理论模型	099
5.4.2 幅度比理论分布随时间 间隔的变化特性	100
5.5 时变海面后向散射信号相位 和幅度统计分布特性	101
5.5.1 一维海面后向散射信号 相位差和幅度比统计	102
5.5.2 二维海面后向散射信号 相位差和幅度比统计	110
5.6 小结	114
参考文献	115

第6章 海杂波统计模型

6.1 概述	117
6.2 海面后向散射系数的 半经验模型	118
6.2.1 SIT模型	119
6.2.2 修正的GIT模型	119
6.2.3 TSC模型	120
6.2.4 HYB模型	122
6.3 海杂波统计分布模型	124
6.3.1 瑞利分布模型	124

Chapter 5 Modulation Mechanisms of Backscattered Signals from Time-evolving Sea Surfaces

	092
5.1 Introduction	092
5.2 Composite Gaussian (CG) Model	093
5.2.1 Composite Gaussian modulation based on two-scale model	093
5.2.2 Sea clutter amplitude statistics based on CG model—Composite K-distribution	094
5.3 Theoretical Distribution of Phases Based on CG Modulation Mechanism	096
5.3.1 Theoretical model of phase difference	096
5.3.2 Characteristics of phase difference as a function of time interval	098
5.4 Theoretical Distribution of Amplitude Based on CG Modulation Mechanism	099
5.4.1 Theoretical model of amplitude ratio	099
5.4.2 Characteristics of amplitude ratio as a function of time interval	100
5.5 Statistics for Phases and Amplitudes of Backscattered Signals from Time-evolving Sea Surface	101
5.5.1 Statistics of phase difference and amplitude ratio for 1D sea surface	102
5.5.2 Statistics of phase difference and amplitude ratio for 2D sea surface	110
5.6 Summary	114
References	115

Chapter 6 Statistical Models for Sea Clutter

6.1 Introduction	117
6.2 Semi-empirical Model for Backscattering Coefficient of Sea Surface	118
6.2.1 SIT model	119
6.2.2 Modified GIT model	119
6.2.3 TSC model	120
6.2.4 HYB model	122
6.3 Statistical Distribution of Sea Clutter	124
6.3.1 Rayleigh distribution	124



6.3.2	韦布尔分布模型	125
6.3.3	对数-正态分布模型	126
6.3.4	复合 K 分布模型	127
6.4	基于半经验模型的复合 K 分布海杂波统计建模与仿真	128
6.4.1	形状参数	128
6.4.2	尺度参数	132
6.4.3	K 分布参数估计小结	132
6.5	基于统计分布的通用三参数模型	133
6.5.1	通用三参数模型	133
6.5.2	模型参数拟合优化方法	134
6.5.3	仿真结果与分析	136
6.6	小结	138
	参考文献	139
第7章 空-时相关海杂波统计建模与仿真技术		141
7.1	概述	141
7.2	海杂波时间相关特性模型及其仿真技术	142
7.2.1	ZMNL方法	143
7.2.2	SIRP方法	144
7.2.3	AR模型方法	146
7.2.4	仿真示例与结果分析	148
7.3	海杂波空间相关特性模型及其仿真技术	150
7.3.1	海杂波的空间相关特性模型	151
7.3.2	空域相关 K 分布随机序列生成方法	152
7.4	空-时相关的海杂波仿真技术	154
7.4.1	空-时相关海杂波仿真的总体流程	154
7.4.2	外因乘积模型方法	155
7.4.3	仿真示例1: 雷达相干处理时间间隔小于调制分量去相关时间的情况	158
7.4.4	仿真示例2: 雷达相干处理时间间隔远大于调制分量去相关时间的情况	161
7.5	小结	169
	参考文献	169

6.3.2	Weibull distribution	125
6.3.3	Log-Normal distribution	126
6.3.4	Composite K -distribution	127
6.4	Statistical Simulation of Composite K -distributed Sea Clutter Using Semi-empirical Models	128
6.4.1	Shape parameter	128
6.4.2	Scale parameter	132
6.4.3	Summary of parameter estimation for K -distribution	132
6.5	Generalized Three-Parameter Model for Statistical Distributions	133
6.5.1	Generalized three-parameter model	133
6.5.2	Optimization for parameter-fitting	134
6.5.3	Simulation results and analysis	136
6.6	Summary	138
	References	139

Chapter 7 Statistical Modeling and Simulation for Space-time Correlated Sea Clutter

7.1	Introduction	141
7.2	Modeling and Simulation of Time Correlated Sea Clutter	142
7.2.1	ZMNL method	143
7.2.2	SIRP method	144
7.2.3	AR model based method	146
7.2.4	Simulation examples and analysis	148
7.3	Modeling and Simulation of Space Correlated Sea Clutter	150
7.3.1	Space correlation model of sea clutter	151
7.3.2	Generation of space correlated K -distribution random process	152
7.4	Space-time Correlated Sea Clutter Simulation	154
7.4.1	Simulation flow chart of space-time correlated sea clutter	154
7.4.2	Exogenous model for sea clutter simulation	155
7.4.3	Demonstrative Example-1: Small Coherent Processing Interval Case	158
7.4.4	Demonstrative Example-2: Large Coherent Processing Interval Case	161
7.5	Summary	169
	References	169

第 8 章 时变海面舰船目标 运动特性模型

8.1 概述	171
8.2 舰船目标运动建模基本理论	173
8.2.1 舰船 6 自由度运动 坐标系	173
8.2.2 水动力系数计算	174
8.3 扰动力和扰动力矩的 生成	176
8.3.1 海浪谱	176
8.3.2 遭遇频率与遭遇 海浪谱	178
8.3.3 时变扰动力及力矩 估计	179
8.4 离散状态空间方程的建立	180
8.4.1 纵向运动离散状态 空间方程的建立	180
8.4.2 横向运动离散状态 空间方程的建立	183
8.5 模型的验证、推广与 结果分析	187
8.5.1 驱逐舰目标的运动 特性仿真	187
8.5.2 推广至大型舰船的 运动特性仿真	190
8.6 小结	192
参考文献	192

第 9 章 时变海面运动目标 多径散射模型

9.1 概述	194
9.2 海面舰船目标多径 散射模型	195
9.3 时变海面复反射系数 模型	198
9.3.1 复反射系数计算	198
9.3.2 复反射系数的特性 分析	200

Chapter 8 Hydrodynamic Motion Model for Ships on Time-evolving Sea Surface

8.1 Introduction	171
8.2 Fundamentals for Hydrodynamic Motion Modeling of Ships	173
8.2.1 Six degree-of-freedom coordinate system for ship motion	173
8.2.2 Hydradynamic coefficient calculation	174
8.3 Generation of Exciting Force and Force Moments	176
8.3.1 Sea wave spectra	176
8.3.2 Frequency and sea spectrum of encounter	178
8.3.3 Estimation of time-varying exciting force and force moment	179
8.4 Development of the Discrete State Space Equations	180
8.4.1 Equations for heave-pitch motions	180
8.4.2 Equations for sway-roll-yaw motions	183
8.5 Model Validation, Extension and Result Analysis	187
8.5.1 Hydrodynamic motion simulation of a destroyer	187
8.5.2 Extension to motion simulation of large sized vessels	190
8.6 Summary	192
References	192

Chapter 9 Multipath Scattering Model for Moving Ships on Time-evolving Sea Surface

9.1 Introduction	194
9.2 Multipath Scattering Model for Ships on Sea Surface	195
9.3 Time-variant Complex Reflection Coefficient Model	198
9.3.1 Complex reflection coefficients calculation	198
9.3.2 Characteristics of the complex reflection coefficients	200



9.4	目标本体坐标系下电磁 散射场的计算	203
9.4.1	目标姿态及运动轨迹 的坐标转换问题	203
9.4.2	目标本体坐标系下的 散射场计算	206
9.4.3	电磁散射计算的 高频渐近技术	207
9.5	模型的验证	212
9.5.1	海面运动舰船目标电磁 散射计算与仿真流程	212
9.5.2	多径效应的模型验证	212
9.5.3	时变海面对目标散射 调制现象的模型验证	215
9.6	时变海面活动目标散射 特性仿真与散射现象分析	218
9.6.1	观测擦地角的影响	219
9.6.2	海面水动力调制对 目标散射的影响	222
9.7	小结	224
	参考文献	224
第10章	基于目标复 HRRP 的 统计建模与探测识别 方法	227
10.1	概述	227
10.2	目标 HRRP 建模的 α -stable 分布模型及其参数估计方法	228
10.2.1	α -stable 分布随机数 的产生	230
10.2.2	α -stable 分布的 参数估计	231
10.3	目标 HRRP 幅度分布建模 的混合模型方法	234
10.3.1	选择混合模型的动机	234
10.3.2	混合模型及其参数估计	236
10.3.3	模型选择	238
10.4	目标 HRRP 的相位统计 特性分析	240

9.4	Calculation of Target EM Scattering at Local Coordinates	203
9.4.1	Coordinate transform relations	203
9.4.2	Scattered field calculation at local target coordinates	206
9.4.3	High frequency approximation techniques for EM scattering calculation	207
9.5	Model Validation	212
9.5.1	Procedure for EM scattering calculation and simulation of moving ships on sea surface	212
9.5.2	Validation of multipath scattering modeling	212
9.5.3	Validation of phenomenological modeling for scattering modulation of ships on sea surface	215
9.6	Simulation and Phenomenological Analysis of Scattering from Ships on Time-evolving Sea Surface	218
9.6.1	Impact of depress angle	219
9.6.2	Impact of hydrodynamic modulation of the sea surface	222
9.7	Summary	224
	References	224
Chapter 10	Complex HRRP Based Statistical Modeling and Target Discrimination Techniques	227
10.1	Introduction	227
10.2	α -stable Distribution and Parameter Estimation for HRRP Modeling	228
10.2.1	Generation of α -stable distributed random process	230
10.2.2	Parameter Estimation for α -stable distributed process	231
10.3	Mixed Model for HRRP Amplitude Statistics	234
10.3.1	Motivation for using mixed model	234
10.3.2	Mixed model and its parameter estimation	236
10.3.3	Model selection	238
10.4	Statistical Analysis of HRRP Phases	240

10.4.1	相位闪烁与角闪烁线偏差的关系	240	10.4.1	Relationship between phase glint and linear deviation error of angular glint	240
10.4.2	角闪烁与目标横向散射结构特征	241	10.4.2	Relationship between angular glint and target cross range scattering structure	241
10.4.3	角闪烁统计模型	244	10.4.3	Statistical model of angular glint	244
10.4.4	基于相位闪烁模型的 距离像增强	245	10.4.4	Enhanced HRRPs Based on Phase Glint Characteristics	245
10.5	基于复 HRRP 的海面舰船 目标探测机理与方法	247	10.5	Target Discrimination Mechanisms and Techniques Using Complex HRRPs	247
10.5.1	舰船目标与海背景的可 分性; α -stable 分析	247	10.5.1	Discriminability of ships and sea clutter; α -stable analysis	247
10.5.2	HRRP 幅度统计特性 及分析	250	10.5.2	Statistics and analysis of HRRP amplitude fluctuation	250
10.5.3	相位闪烁统计特性 及分析	255	10.5.3	Statistics and analysis of HRRP phase glint	255
10.5.4	基于 HRRP 相位特性 的舰船目标探测方法	259	10.5.4	Target discrimination using HRRP phase characteristics	259
10.5.5	基于 HRRP 幅度特性 的舰船目标探测方法	260	10.5.5	Target discrimination using HRRP amplitude characteristics	260
10.5.6	基于 HRRP 幅度和相位 特性的联合目标探测	262	10.5.6	Target discrimination based on combined HRRP phase and amplitude characteristics	262
10.6	基于 HRRP 的 GMM 统计 建模与目标识别	264	10.6	HRRP Based GMM Modeling and Target Classification	264
10.6.1	高斯混合模型	264	10.6.1	Gaussian mixed model (GMM)	264
10.6.2	GMM 的 EM 算法 参数估计	265	10.6.2	EM algorithm for parameter estimation	265
10.6.3	改进的 EM 算法	266	10.6.3	Modified EM algorithm	266
10.6.4	识别仿真	267	10.6.4	Target classification simulation	267
10.7	小结	271	10.7	Summary	271
	参考文献	272		References	272
第 11 章 海面运动舰船目标的 SAR 成像模型		275	Chapter 11 SAR Imaging Model for Moving Ships on Sea Surface		275
11.1	概述	275	11.1	Introduction	275
11.2	海面目标 SAR 成像信号 生成模型的总体思路	276	11.2	General Model for SAR Signal Generation of Ships on Time-evolving Sea Surface	276
11.2.1	基本几何关系	276	11.2.1	Imaging geometries	276
11.2.2	海面目标 SAR 回波 信号生成总体流程	277	11.2.2	General diagram for SAR signal generation of ships on sea surface	277
11.2.3	海面背景 SAR 回波 信号生成	279	11.2.3	SAR signal generation of sea surface	279
11.2.4	运动舰船目标 SAR 回波信号生成	280	11.2.4	SAR signal generation of moving ships	280



11.3	理想航迹下场景目标 SAR 回波快速模拟算法	281	11.3	Fast Algorithms for SAR Signal Simulation: Ideal Fligh Path Case	281
11.3.1	正侧视 SAR 回波信号模拟	281	11.3.1	Side-looking SAR signal simulation	281
11.3.2	斜视 SAR 回波信号模拟	284	11.3.2	Squint side-looking SAR signal simulation	284
11.3.3	算法仿真验证	290	11.3.3	Simulation and algorithm validation	290
11.4	非理想航迹下场景目标 SAR 回波快速模拟算法	293	11.4	Fast Algorithms for SAR Signal Simulation: Non-ideal Fligh Path Case	293
11.4.1	非理想航迹下条带式斜视 SAR 回波信号模拟	294	11.4.1	Squint stripmap SAR signal simulation	294
11.4.2	非理想航迹下聚束式斜视 SAR 回波信号模拟	298	11.4.2	Squint spotlight SAR signal simulation	298
11.4.3	算法仿真验证	300	11.4.3	Simulation and algorithm validation	300
11.5	时变粗糙海面 SAR 回波信号生成	302	11.5	SAR Signal Generation for Time-evolving Rough Sea Surface	302
11.5.1	海面场景 SAR 几何关系	302	11.5.1	SAR imaging geometry for sea surface	302
11.5.2	时域模拟算法	303	11.5.2	Time domain algorithm	303
11.5.3	频域模拟算法	304	11.5.3	Frequency domain algorithm	304
11.5.4	算法的仿真验证	306	11.5.4	Simulation and algorithm validation	306
11.6	海面运动舰船目标 SAR 回波信号生成	307	11.6	SAR Signal Generation for Moving Ships on Sea Surface	307
11.6.1	SAR 与舰船目标几何关系	307	11.6.1	SAR imaging geometry for ships	307
11.6.2	舰船目标 SAR 信号模型	308	11.6.2	SAR signal model	308
11.6.3	舰船目标散射场计算	310	11.6.3	EM scattering calculation	310
11.6.4	舰船目标 SAR 回波信号的生成	311	11.6.4	SAR signal generation for moving ships	311
11.7	海面舰船目标的 SAR 与 ISAR 成像技术	311	11.7	SAR and ISAR Imaging Techniques of Ships on Sea Surface	311
11.7.1	SAR 成像算法	312	11.7.1	SAR imaging techniques	312
11.7.2	ISAR 成像算法	316	11.7.2	ISAR imaging techniques	316
11.7.3	海面舰船目标 SAR/ISAR 联合成像处理	322	11.7.3	Combined SAR and ISAR imagery for ships on sea surface	322
11.8	海面运动舰船目标的成像机理与仿真分析	326	11.8	Imaging Mechanisms and Simulation Analysis of Moving Ships on Sea Surface	326
11.8.1	不同海情下运动目标对 SAR 图像的影响	326	11.8.1	SAR imaging phenomenology of moving ships at different sea states	326
11.8.2	多径散射对舰船 SAR 像的影响仿真分析	330	11.8.2	SAR imaging phenomenology of multipath scattering	330
11.8.3	海面运动目标 SAR/ISAR 联合成像仿真分析	335	11.8.3	Simulation analysis of combined SAR and ISAR imagery for moving ships	335
11.9	小结	341	11.9	Summary	341
参考文献		342	References		342

第12章 海面目标宽带单脉冲 三维成像模型

12.1 概述	345
12.2 单脉冲雷达测角的基本原理	347
12.2.1 振幅和、差式单脉冲 雷达	347
12.2.2 相位和、差式单脉冲 雷达	348
12.2.3 宽带单脉冲雷达测角 与成像能力分析	349
12.3 单脉冲雷达和、差通道 信号分析	353
12.3.1 天线坐标系和目标 坐标系的定义	354
12.3.2 振幅和、差式单脉冲 体制测角误差分析	354
12.3.3 相位和、差式单脉冲 体制测角误差分析	356
12.4 海面目标的单脉冲雷达 回波信号模型	358
12.4.1 机载单脉冲雷达 成像几何关系	358
12.4.2 海面目标单脉冲雷达 接收信号模型	360
12.5 宽带单脉冲三维成像技术	361
12.5.1 基于单帧一维距离像 的单脉冲三维成像	361
12.5.2 基于二维 ISAR 像的 单脉冲三维成像	362
12.5.3 基于多帧一维距离像的 单脉冲三维成像技术	362
12.5.4 角闪烁点的剔除	363
12.5.5 宽带单脉冲三维 成像算法比较	365
12.6 多径散射对海面目标三维 成像的影响研究	370
12.6.1 多径散射对三维 成像影响的理论分析	370
12.6.2 仿真结果分析	375
12.7 小结	388
参考文献	389

Chapter 12 Three-Dimensional(3D) Wideband Monopulse Radar Imaging Model for Ships on Sea Surface

12.1 Introduction	345
12.2 Principles of Angle Measurement Using Monopulse Radar	347
12.2.1 Amplitude-comparison monopulse radar	347
12.2.2 Phase-comparison monopulse radar	348
12.2.3 Angle measurement and imaging performance analysis for wideband monopulse radar	349
12.3 Analysis of Signals from Sum and Difference Channels of Monopulse Radar	353
12.3.1 Definition of antenna and target coordinate systems	354
12.3.2 Angle measurement error for amplitude-comparison monopulse	354
12.3.3 Angle measurement error for phase-comparison monopulse	356
12.4 Monopulse Radar Signal Model for Ships on Sea Surface	358
12.4.1 Imaging geometry of airborne monopulse radar	358
12.4.2 Model of monopulse radar received signals from ships on sea surface	360
12.5 3D Imaging Using Wideband Monopulse Radar	361
12.5.1 3D monopulse imagery from a single frame of HRRP	361
12.5.2 3D monopulse imagery based on ISAR images	362
12.5.3 3D monopulse imagery based on multiple frames of HRRPs	362
12.5.4 Supress of angular glint	363
12.5.5 Comparison of wideband monopulse imaging algorithms	365
12.6 Impact of Multipath Scattering on 3D Imagery of Ships on Sea Surface	370
12.6.1 Theoretical analysis	370
12.6.2 Simulation results and analysis	375
12.7 Summary	388
References	389