

自主海洋动力环境卫星微波遥感处理技术研究示范 (编号: 201105032)

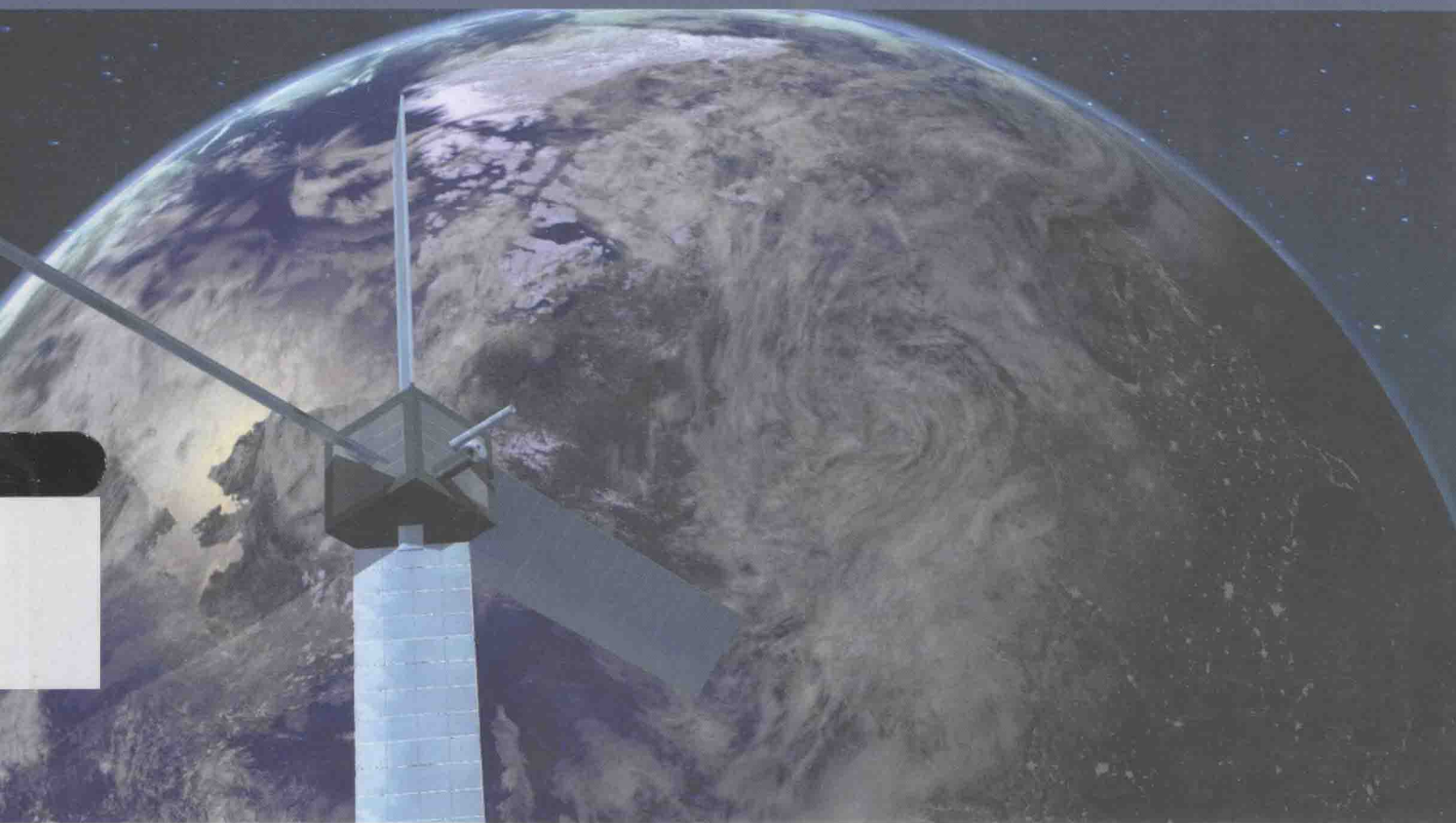
HY-2卫星海洋动力环境探测数据应用服务技术系统与示范 (编号: 201305032)

海洋动力环境微波遥感信息提取技术与应用 (编号: 2013AA09A505)

海洋动力环境卫星 基础理论与工程应用

蒋兴伟 编著

HAIYANG DONGLI HUANJING WEIXING
JICHU LILUN YU GONGCHENG YINGYONG



海洋出版社

海洋动力环境卫星基础 理论与工程应用

蒋兴伟 编著

海洋出版社

2014年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

海洋动力环境卫星基础理论与工程应用/蒋兴伟编著. —北京: 海洋出版社, 2014. 1
ISBN 978 - 7 - 5027 - 8744 - 8

I. ①海… II. ①蒋… III. ①卫星遥感 - 应用 - 海洋环境 - 研究 IV. ①X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 275016 号

责任编辑: 苏 勤

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京旺都印务有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

开本: 889mm × 1194mm 1/16 印张: 20.5

字数: 560 千字 定价: 126.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《海洋动力环境卫星基础理论与工程应用》

主要编写人员

主 编：蒋兴伟

副主编：林明森 张有广

参与编写人员（按姓氏笔画排序）

马超飞	王其茂	王振占	王晓慧	王家松
王 睿	兰友国	朱 骏	刘 廷	孙从容
李 敏	吴奎桥	吴 斌	邹巨洪	张 欢
张 强	张 颖	张 毅	陈建荣	邵云明
范陈清	周旭华	周 武	赵齐乐	钟世明
钟 敏	施 闯	祝开建	贾永君	高 凡
郭 向	黄 磊	彭海龙	彭碧波	曾 光

解学通



序

Preface

蒋兴伟博士新著《海洋动力环境卫星基础理论与工程应用》的问世，无论从海洋遥感信息探测机理、工程实践和数据服务等方面，还是从全球海洋观测系统能力建设方面，都是一部前沿、开拓创新和应用服务的力作，是又一项十分可贵的重大成果。

在过去的 20 多年中，海洋观测卫星在数量和种类上都有了很大的发展。这种发展结合越来越多国家发射的海洋卫星，极大地加深了我们对海洋和大气特性的了解。我国在成功发射海洋水色（HY-1A/B）卫星的基础上，随着我国第一颗海洋动力环境（HY-2A）卫星的上天，雷达高度计的测高在我国实现了厘米量级的海面高度测量，微波散射计海面测风技术实现了我国全年热带风暴的全部实况观测，被动微波辐射计的上天提供了不受云影响的海面温度的观测，这些都是海洋动力环境卫星带来的重大进展，也是我国海洋卫星的里程碑式的工作。

作者为我国海洋动力环境卫星的发展做出了艰苦的努力，针对我国自主技术条件下，在主被动微波载荷的需求与指标、精密定轨方案、数据处理技术和产品应用方面进行了深入的研究和论证，组织了工程实施，实现了工程的总体目标，取得了一系列的创新研究成果，使我国卫星海洋遥感技术上了新的台阶，为我国实现海洋强国提供了强大的技术支撑。

本书内容丰富，既有海洋现象的遥感成像机理和解读，也有工程实现的方案和技术，是对整个 HY-2A 卫星工程的很好总结和提升，是广大海洋遥感工作者必不可少的珍贵资料。

该书的出版将对我国海洋遥感监测技术的应用和发展起到极大的推动作用。祝愿我国的海洋卫星事业有力展翅腾飞！

姜崇山

2013 年 12 月于北京



前言

Foreword

海洋是生命的摇篮，也是实现可持续发展的重要资源宝库。沿海国家对海洋的重要性认识越来越高，加强对海洋的观测和认识，研究海洋与大气的相互作用，应对全球变化，准确预报海洋灾害，科学探测和合理开发利用海洋资源，科学保护海洋环境，有效保障国家安全和维护国家海洋主权与权益，成为沿海国家的重要任务。海洋也是各沿海国家激烈竞争的重要领域。

海洋卫星和卫星遥感海洋应用掀起了观测和认识海洋的第二次浪潮。在经历了长时期的利用船舶、岸站和水面技术对海洋的调查、监测和观测之后，海洋卫星观测带动海洋观测进入了海面与空中结合的立体观测时代，从空间、海面、水中、沿岸对海洋环境进行多平台多层次的长时序连续观测，显著提高了对海洋的观测能力，增强了对海洋的认识，提高了海洋灾害预报能力和对海上生产作业、军事活动、旅游娱乐的海洋环境保障能力，支持了海上国防建设。

发展海洋经济，打牢海洋科学基础，提高防灾减灾水平，急需大力发展海洋动力环境卫星业务化应用。“十五”、“十一五”期间，HY-1A、HY-1B水色卫星业务化运行填补了我国海洋卫星遥感的空白。目前，保持1颗HY-1B水色卫星在轨运行，并建立了以海洋卫星为主要数据源的海冰、赤潮、绿潮、水质、海温、大洋渔场环境、海岸带环境监测业务示范系统。“十二五”期间，我国自主研发的海洋动力环境卫星（HY-2A）在轨运行，具备了高精度卫星测高、测风和被动微波测量功能，达到国外同类卫星遥感器的观测水平。但尚需在海洋防灾减灾、公益服务、海洋资源开发、极地科考、大洋开发、全球环境监测、应急监测等方面加强业务化应用能力。

HY-2A卫星于2007年1月正式立项，2011年8月发射成功，对海洋动力环境参数风、浪、流、潮和海表温度进行实时监测。我国已经具备了海洋卫星总体技术、地面应用系统和卫星业务试验应用的能力和条件。

未来5~10年是我国国民经济和社会发展的的重要时期，海洋对解决资源和环境瓶颈、拓展经济社会发展空间、保障国家安全等将起到越来越

越重要的作用。我国已进入大规模、高强度、多种类开发利用海洋的阶段，但也面临着对海洋缺乏全面深入的认识、海上安全保障不足、海上事件应急能力较弱等问题；因此，大尺度、全方位认识和监控海洋，维护海洋开发环境安全，保障国家海洋权益等，是国家今后一段时期的迫切需求。建立后续的海洋动力环境卫星及相适应的地面系统，扩大海洋动力环境卫星应用领域和范围，能够显著提高我国海洋的监控能力，保障我国的海洋经济社会可持续发展，提高我国在世界海洋领域中的地位。

本书分为4篇。第1篇介绍HY-2A卫星遥感基础理论，包括雷达高度计、微波散射计和微波辐射计的观测原理；第2篇介绍HY-2A卫星工程，包括卫星系统组成、工作原理、运行轨道和系统指标以及地面系统组成、主要任务、功能和技术指标；第3篇为HY-2A卫星的工程实施，包括卫星系统、地面系统和精密定轨系统的实施方案；第4篇介绍HY-2A卫星数据的具体应用。

本书是海洋卫星地面系统设计师队伍和管理人员的必读教材。也可供从事航天工作和海洋研究的科技人员、管理人员以及大学遥感专业的教学和科研参考。

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免出现谬误之处，恳请读者批评指正。

编著者

2013年10月

CONTENTS 目次

海洋动力环境卫星基础理论与工程应用

第1篇 海洋动力环境卫星遥感基础理论

第1章 雷达高度计观测原理	(3)
1.1 背景	(3)
1.2 雷达高度计脉冲与平坦海面的相互作用	(4)
1.2.1 海面冲击响应	(4)
1.2.2 海面的平均回波功率	(5)
1.3 波浪对雷达高度计回波的影响	(6)
1.3.1 海面粗糙度和 U 与雷达回波的关系	(6)
1.3.2 自动增益控制 (AGC) 和脉冲平均	(6)
1.3.3 波浪的影响	(7)
1.4 海面高度反演中的误差源	(9)
1.4.1 高度计仪器噪声	(9)
1.4.2 大气误差	(9)
1.4.3 海况偏差	(10)
1.4.4 轨道误差	(10)
1.4.5 环境误差源	(11)
1.4.6 重力测量计划	(12)
1.5 国外同类雷达高度计	(12)
1.5.1 SKYLab 高度计	(12)
1.5.2 Geos-3 卫星高度计	(13)
1.5.3 Seasat-A 卫星高度计	(13)
1.5.4 Geosat 和 GFO-1 卫星高度计	(14)
1.5.5 ERS-1/2 卫星高度计	(14)



1.5.6 T/P 卫星高度计	(15)
1.5.7 Jason-1/2 卫星高度计	(16)
1.5.8 CryoSat 高度计	(17)
第2章 微波散射计观测原理	(19)
2.1 背景	(19)
2.2 地球物理模式函数	(21)
2.3 利用模式函数海面风矢量反演方法	(23)
2.4 国外同类微波散射计	(24)
2.4.1 NSCAT 散射计	(24)
2.4.2 AMI 散射计	(25)
2.4.3 SeaWinds 散射计	(26)
第3章 微波辐射计观测原理	(31)
3.1 背景	(31)
3.2 微波辐射传输方程	(32)
3.3 海面成分的贡献	(34)
3.3.1 海面的发射和反射	(34)
3.3.2 海面风的影响	(35)
3.3.3 泡沫的影响	(36)
3.4 海洋参数反演算法	(37)
3.4.1 多元线性回归算法	(37)
3.4.2 非线性迭代算法	(38)
3.5 国外同类微波辐射计	(39)
3.5.1 DMSP 卫星辐射计	(39)
3.5.2 EOS 卫星辐射计	(40)
3.5.3 ERS 卫星辐射计	(42)
3.5.4 ENVISAT 卫星辐射计	(43)
第4章 精密定轨基本原理	(45)
4.1 卫星运动状态方程	(45)
4.2 量测方程	(46)
4.3 卫星轨道估值方法	(46)
4.4 精密定轨质量评估	(47)
4.4.1 轨道质量内部检验	(47)
4.4.2 轨道质量外部检验	(48)
4.4.3 卫星轨道误差分配	(49)

第2篇 HY-2A 卫星工程概述

第5章 HY-2A 卫星系统概况	(53)
5.1 卫星组成	(53)
5.2 工作原理	(54)
5.3 运行轨道	(56)
5.4 系统指标	(57)
5.4.1 星地一体化指标	(57)
5.4.2 卫星系统主要指标	(57)
第6章 HY-2A 卫星地面应用系统概况	(60)
6.1 系统组成	(60)
6.2 主要任务	(60)
6.3 主要功能	(61)
6.4 系统指标	(62)

第3篇 HY-2A 卫星工程实施方案

第7章 卫星总体设计	(65)
7.1 卫星平台	(65)
7.1.1 结构与机构	(65)
7.1.2 热控	(67)
7.1.3 姿态与轨道控制	(69)
7.1.4 供配电	(72)
7.1.5 测控	(74)
7.1.6 数据管理	(76)
7.2 有效载荷技术	(81)
7.2.1 雷达高度计	(81)
7.2.2 微波散射计	(83)
7.2.3 扫描微波辐射计	(85)
7.2.4 校正辐射计	(87)
7.2.5 数传	(89)
第8章 地面应用系统方案	(91)
8.1 接收预处理分系统	(91)
8.1.1 分系统组成	(91)
8.1.2 主要任务和功能	(92)
8.1.3 主要技术指标	(92)

8.1.4	分系统工作流程	(107)
8.2	精密定轨分系统	(108)
8.2.1	分系统组成	(108)
8.2.2	主要任务和功能	(112)
8.2.3	主要技术指标	(112)
8.2.4	精密定轨流程	(113)
8.3	运控通信分系统	(114)
8.3.1	分系统组成	(114)
8.3.2	主要任务和功能	(114)
8.3.3	主要技术指标	(127)
8.3.4	分系统工作流程	(134)
8.4	资料处理分系统	(135)
8.4.1	分系统组成	(135)
8.4.2	主要任务和功能	(137)
8.4.3	主要技术指标	(144)
8.4.4	分系统工作流程	(149)
8.5	辐射校正与真实性检验分系统	(150)
8.5.1	分系统的组成	(150)
8.5.2	主要任务和功能	(151)
8.5.3	主要技术指标	(152)
8.5.4	分系统工作流程	(153)
8.6	业务应用分系统	(168)
8.6.1	分系统的组成	(168)
8.6.2	主要任务和功能	(169)
8.6.3	主要技术指标	(170)
8.6.4	分系统工作流程	(171)
8.7	产品存档与分发分系统	(178)
8.7.1	分系统组成	(178)
8.7.2	主要任务和功能	(181)
8.7.3	主要技术指标	(182)
8.7.4	分系统工作流程	(183)
第9章	卫星精密定轨方案	(185)
9.1	各主要海洋动力环境卫星的定轨途径及定轨精度	(185)
9.2	各种精密定轨技术的综合分析与比较	(186)
9.2.1	TRANET/OPNET	(187)

9.2.2	SLR 跟踪技术	(187)
9.2.3	DORIS 系统	(188)
9.2.4	PRARE 系统	(189)
9.2.5	雷达高度计	(190)
9.2.6	GPS	(190)
9.3	各种定轨方法的综合比较	(192)
9.3.1	经典动力法(dynamic strategy)	(192)
9.3.2	运动(非动力)法(kinematic strategy)	(193)
9.3.3	简化动力学方法(reduced-dynamic strategy)	(193)
9.3.4	几何法(Geometric strategy)	(194)
9.4	精密定轨方案选择	(195)
9.4.1	GPS 精密定轨系统方案	(196)
9.4.2	SLR 精密定轨系统方案	(198)
9.4.3	DORIS 精密定轨系统方案	(198)

第4篇 HY-2A 卫星工程应用

第10章	雷达高度计数据应用	(203)
10.1	海面高度	(203)
10.1.1	干对流层延迟校正	(203)
10.1.2	湿对流层延迟校正	(205)
10.1.3	大气逆压延迟校正	(206)
10.1.4	电离层路径延迟校正	(208)
10.1.5	海况偏差校正	(210)
10.2	有效波高	(215)
10.2.1	数据处理方法	(215)
10.2.2	精度评估	(215)
10.3	海面风速	(216)
10.3.1	数据处理方法	(216)
10.3.2	精度评估	(218)
第11章	微波散射计数据应用	(224)
11.1	海面风场	(224)
11.1.1	数据处理方法	(224)
11.1.2	精度评估	(228)
11.2	台风监测	(232)
11.2.1	台风中心定位与路径分析	(232)

11.2.2 台风结构分析	(235)
第12章 扫描微波辐射计数据应用	(236)
12.1 数据处理方法	(236)
12.1.1 多元线性回归反演算法	(236)
12.1.2 HY-2A 扫描微波辐射计海洋参数反演	(237)
12.2 精度评估	(237)
第13章 精密定轨技术与评估	(240)
13.1 HY-2A 精密定轨系统组成	(240)
13.2 HY-2A 精密定轨策略	(241)
13.2.1 GPS 结合激光测距(GPS/SLR)定轨策略	(241)
13.2.2 DORIS 结合激光测距(DORIS/SLR)定轨策略	(242)
13.2.3 综合(GPS/DORIS/SLR)精密定轨策略	(243)
13.2.4 独立SLR 精密定轨策略	(244)
13.3 HY-2A 精密定轨评估	(244)
13.3.1 SLR 数据统计分析	(244)
13.3.2 SLR 检核轨道精度	(245)
13.3.3 独立轨道比较	(247)
参考文献	(248)

附 录

附录1 HY-2A 卫星有效载荷各级文件命名规则	(257)
附录2 HY-2A 卫星有效载荷各级数据格式	(262)

第1篇 海洋动力环境 卫星遥感基础理论

第1章 雷达高度计观测原理

1.1 背景

卫星雷达高度计经过40年的发展,大致经历了从探索、试验到应用研究及业务使用阶段的发展历程。在高度计发展的探索阶段,首先是美国利用搭载在 Apollo 14 上的高度计对月球进行了探测,随后是1973年美国 Skylab 飞船上的高度计对地球的观测。在探索阶段,高度计的观测精度非常低,Skylab 的测高精度约为1 m,测波精度为1~2 m。因此,很难满足海洋应用的需要。

自 Skylab 之后,各国相继发展了多颗雷达高度计卫星。第一颗雷达高度计卫星 GEOS-3 在1975年4月发射,测高精度为0.25~0.5 m。GEOS-3 的主要任务是确定地球重力场和描绘全球海面的变化。该卫星为确定海洋学和地球动力学参数提供了3年有效数据,获取的大量高质量的数据使人们的注意力从试验阶段转向了应用阶段。美国在1978年发射的 Seasat 卫星上搭载的高度计测高精度达到了10 cm 左右,径向轨道误差为150 cm。但是,由于电池故障,Seasat 高度计只工作了3个月。在运行的第一个月中,Seasat 地面轨迹的精确重复周期为17天,然后以3天的重复周期运行。它是第一个能提供全球海面变化信息的高度计。Seasat 高度计证明了采用遥感技术可以在全球范围内测量海面温度、海面风速、流、潮汐等水文气象要素的能力。1985年美国海军发射了 Geosat 高度计卫星,从开始运行到1986年6月这段时间,Geosat 按照非精确重复轨道运行,执行测地任务(GM);从1986年9月开始按照17天的精确重复周期运行(ERM)。该卫星是一颗测地卫星,测高精度为5 cm、径向轨道误差为10 cm。它的首要任务是精确确定全球的海洋重力场和平均海平面。欧空局于1991年7月发射了欧洲第一颗遥感卫星 ERS-1,它的测高精度2~3 cm。该卫星的任务是获取全球海浪、海面风场、大洋环流和全球的平均海面变化等信息。美、法在1992年8月联合发射了海洋地形卫星 TOPEX/Poseidon (T/P),它的测高精度达到1.7 cm。这颗卫星的任务就是精确确定全球海面动力地形,增进人们对全球海洋现象的认识。由于卫星测高对海洋学、地球物理学和测绘学等学科具有重要的意义,因此美国和欧空局分别发射了一些卫星的后继星,如: Geosat 的后继星 Geosat follow on-1 (GFO-1),它由美国海军1998年2月10日发射,按照与 Geosat 同样的重复轨道运行; ERS-1 的后继星 ERS-2,它的任务同 ERS-1; ERS-2 的后继星 Envisat; T/P 的后继星 Jason-1 和 Jason-2。

我国在2002年12月30日发射了 Shenzhou-4 飞船(简称:SZ-4),在上面搭载了我国自行研制的多模态微波传感器,其中包括:高度模态(简称:高度计)、辐射模态和散射模态。SZ-4 飞船高度计的主要任务是观测全球的有效波高、海面风速和海面高度。SZ-4 的成功发射,对仪器实现了功能体制的验证,为 HY-2A 卫星雷达高度计的研制和数据处理等方面奠定了技术基础。

2011年8月16日,我国发射了HY-2A卫星,星上搭载的卫星雷达高度计成功实现了对海面高度、有效波高和海面风速等全球海洋动力环境要素的观测,各项观测指标均达到国外同类卫星的观测水平。

1.2 雷达高度计脉冲与平坦海面的相互作用

Moore 和 Williams (1957) 通过实验证明了雷达高度计接收的海面平均回波功率和海洋表面特性之间的相互关系,证明雷达接收的海面平均回波功率可以用一个卷积的形式表示,即认为海面的平均回波功率可以表示为发射脉冲的功率与包括散射系数、天线增益等参数在内的表达式的卷积。这个理论经过 Barrick (1972), Hayne (1980) 等人的完善,得出了一个在数学和物理上都清晰的卷积模型,即将海面的平均回波功率 $P_r(t)$ 表示为:平均海平面的冲激响应 $P_i(t)$ 与雷达系统点目标响应 $S_r(t)$ 的卷积,其中平均海平面的冲激响应 $P_i(t)$ 又可以表示为平坦海面的冲激响应 $P_{FS}(t)$ 与海面散射元的高度概率密度函数 $q_s(t)$ 的卷积,这样海面的平均功率 $P_r(t)$ 用公式表示为:

$$P_r(t) = P_{FS}(t) * q_s(t) * S_r(t) \quad (1-1)$$

1.2.1 海面冲击响应

对于平坦的海面,根据雷达方程雷达回波可以表示为:

$$P_{FS}(t) = \int_{\text{雷达照射面积}A} \frac{\lambda^2 P_T(t - \frac{2r}{c}) G^2(\theta, \omega)}{(4\pi)^3 r^4 L_p} \sigma^0(\psi, \phi) dA \quad (1-2)$$

式中, $P_T(t - \frac{2r}{c})$ 表示延迟了 $2r/c$ 时间以后的发射脉冲的平均功率波形; c 表示光速; λ 表示脉冲波长; L_p 表示大气的传输损耗; r 表示海面散射元 dA 到雷达天线的距离; A 表示雷达天线的海面照射区面积; $G(\theta, \omega)$ 表示雷达天线的增益; $\sigma^0(\psi, \phi)$ 表示海面的后向散射系数; θ, ω, ψ 和 ϕ 为角参数。

由于星载雷达高度计天线的波束宽度以及发射脉冲都较窄,可以假设雷达天线的增益 $G(\theta, \omega)$ 与 ω 无关,同时假设雷达在小角度的照射范围内 σ^0 为常数,如果用冲击函数 $\delta(t)$ 代替式 (1-2) 中的发射脉冲功率 $P_T(t)$, 那么式 (1-2) 可以表示为:

$$P_{FS}(t) = \frac{G_0^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 L_p H^4} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{\delta(t - \frac{2H}{c} \sqrt{1 + \varepsilon^2})}{(1 + \varepsilon^2)^2} \sigma^0(\psi) \times \exp\left[\frac{4}{\gamma} \left(1 - \frac{\cos^2 \zeta}{1 + \varepsilon^2}\right) + b + a \cos(\tilde{\phi} - \phi) - b \sin^2(\tilde{\phi} - \phi)\right] \rho d\phi d\rho \quad (1-3)$$

其中

$$\begin{cases} \varepsilon = \rho/H \\ a = \frac{4\varepsilon \sin 2\zeta}{\gamma (1 + \varepsilon^2)} \\ b = \frac{4\varepsilon^2 \sin^2 \zeta}{\gamma (1 + \varepsilon^2)} \end{cases} \quad (1-4)$$