

H AIYU GUANLI JISHU QIANYAN
海域管理技术前沿

海域使用

遥感监测技术

HAIYU SHIYONG YAOGAN JIANCE JISHU

赵建华 索安宁 徐京萍 等 著



海洋出版社

海洋行业公益性科研专项项目“海域使用遥感动态监测业务化应用技术与示范”资助

海域使用遥感监测技术

赵建华 索安宁 徐京萍 等著

海洋出版社

2017年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

海域使用遥感监测技术 / 赵建华等著. —北京: 海洋出版社, 2017. 9
ISBN 978-7-5027-9943-4

I. ①海… II. ①赵… III. ①海域-海洋遥感-监测-研究-中国
IV. ①P715.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 242793 号

责任编辑: 赵 武

责任印制: 赵麟芬

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

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店发行

2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月北京第 1 次印刷

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 13.5

字数: 250 千字 定价: 68.00 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



参加著作人员（按姓氏笔画为序）

刘百桥	刘立栋	刘召芹	张云	张丰收
李紫薇	宋德瑞	陈建裕	郝煜	赵建华
索安宁	徐京萍	高宁	袁道伟	谢伟军

前 言

为落实《中华人民共和国海域使用管理法》“国家建立海域使用管理系统，对海域使用状况实施监视、监测”的要求，国家海洋局于2006年启动了“国家海域使用动态监视监测管理系统”的建设和运行，系统采用卫星遥感监测和实时移动监测等方式，对海域使用状况、海洋功能区划执行情况以及海域空间资源等动态要素实施全覆盖、高精度的实时监视监测。“国家海域使用动态监视监测管理系统”于2009年进入业务化运行阶段。为了解决“国家海域使用动态监视监测管理系统”业务化运行过程中遥感监测技术瓶颈和难点，2010年海洋行业公益性科研专项设立了“海域使用遥感动态监测业务化应用技术与示范”项目，该项目由国家海洋环境监测中心牵头承担，国家海洋局第二海洋研究所、中国科学院遥感应用研究所、天津师范大学、中国科学院地理与资源研究所等全国遥感应用技术单位共同承担。该项目主要解决“国家海域使用动态监视监测管理系统”业务化运行过程中的遥感影像几何校正、配准、镶嵌、匀色等遥感影像预处理技术；海域使用遥感监测分类体系与分类影像特征库；典型用海类型和方式遥感信息提取技术；海域使用遥感监测结果分析评价技术；海域使用遥感监测数据集成共享技术等。经过项目组研究人员近5年共同技术攻关，基本解决了项目初设的技术问题，研究成果大部分应用到“国家海域使用动态监视监测管理系统”业务化工作中，达到了原定的研究目标。

本书是“海域使用遥感动态监测业务化应用技术与示范”项目主要研究成果的集成成果。全书立足于我国海域使用监测技术需求，通过在海岸带遥感影像处理技术、海域遥感分类体系、海域使

用遥感信息提取技术、海域资源动态监测技术、海域使用遥感成果集成技术等方面的研究应用,尝试形成海域遥感动态监测业务化流程,以提高海域使用遥感监测工作的效率、准确性和自动化水平,促进国家海域使用动态监视监测管理系统的高效业务化运行,提升海域使用监控能力,尤其是对围填海等严重改变海域属性用海的监控,减少违法违规用海现象的发生,从而有力促进海域资源的合理开发利用和海洋经济的健康可持续发展。

全书分为海域使用遥感监测概述、海域使用遥感监测影像处理技术、海域使用遥感监测分类技术、典型用海类型遥感监测技术、建设用海遥感监测技术、海岸线遥感监测技术、海域使用遥感监测成果集成应用技术和海域使用遥感监测技术应用实践八章内容。由国家海洋环境监测中心、国家海洋局第二海洋研究所、天津师范大学、中国科学院遥感应用技术研究所等单位共同完成,具体分工如下:第一章,赵建华、索安宁、徐京萍;第二章,陈建裕;第三章,刘百桥、刘立栋;第四章,张丰收、徐京萍;第五章,袁道伟、高宁、索安宁;第六章,李紫薇、刘召芹、索安宁;第七章,宋德瑞、郝煜、张云;第八章,李方、赵建华、谢伟军。全书由赵建华、索安宁、徐京萍通纂和定稿。由于研究的深度和水平有限,一些监测技术方法尚待实践工作的进一步检验,不妥之处在所难免,敬请各位同行和广大读者批评指正。

著作组

于大连凌水湾畔

2017年6月

目 录

第一章 海域使用遥感监测概述	(1)
第一节 海域使用遥感监测概况	(1)
第二节 海域使用遥感监测技术现状	(2)
第三节 海域使用遥感监测技术研究的不足与展望	(4)
第二章 海域使用遥感监测影像处理技术	(7)
第一节 中高分辨率遥感影像的几何校正技术	(7)
第二节 光学卫星遥感影像自动匹配技术	(15)
第三节 遥感影像镶嵌技术	(24)
第四节 遥感影像匀色技术	(31)
第五节 海域使用遥感监测影像处理软件开发	(35)
本章小结	(41)
第三章 海域使用遥感监测分类技术	(42)
第一节 海域使用遥感影像样本采集	(42)
第二节 海域使用类型遥感分类光谱测量	(59)
第三节 海域使用遥感影像特征和光谱特征分析	(65)
第四节 海域使用遥感监测分类体系	(68)
本章小结	(75)
第四章 典型用海类型遥感监测技术	(76)
第一节 遥感影像尺度分割技术	(76)
第二节 面向对象的海域使用遥感监测技术	(86)
第三节 养殖用海遥感影像监测技术	(88)
第四节 填海造地和盐田遥感监测技术	(94)
第五节 港池与蓄水池遥感监测技术	(101)
第六节 重点用海类型遥感监测精度评价	(105)
本章小结	(108)

第五章 建设用海遥感监测技术	(109)
第一节 建设用海项目遥感监测技术流程	(109)
第二节 建设项目用海动态遥感监测技术方法	(112)
第三节 海域使用疑点疑区遥感监测技术	(124)
本章小结	(131)
第六章 海岸线遥感监测技术	(132)
第一节 海岸线遥感监测分类	(132)
第二节 海岸线变化遥感监测技术	(136)
第三节 海岸线变化遥感监测精度评价技术	(144)
第四节 海岸线评价软件模块	(155)
本章小结	(162)
第七章 海域使用遥感成果集成应用技术	(163)
第一节 多源数据标准化存储技术	(163)
第二节 坐标系转换技术	(166)
第三节 海域使用遥感成果集成系统	(174)
第四节 海域使用遥感监测信息共享技术	(182)
本章小结	(187)
第八章 海域使用遥感监测技术应用实践	(188)
第一节 遥感影像几何校正技术应用实践	(188)
第二节 海域使用遥感分类判别技术应用实践	(190)
第三节 重点用海类型遥感监测技术应用实践	(198)
第四节 区域用海规划实施遥感监测技术应用实践	(201)
参考文献	(204)

第一章 海域使用遥感监测概述

第一节 海域使用遥感监测概况

我国管辖的海域面积约有 300 万 km^2 ，占国土总面积的 24%，是国家重要的国土空间资源，也是海洋经济发展的基础和载体。海域综合管理是国家海洋综合管理的重要内容，为加强海域使用管理，维护国家海域所有权和海域使用权人的合法权益，促进海域的合理开发和可持续利用，我国于 2002 年制定了《中华人民共和国海域使用管理法》。从此，我国海域管理走上了依法管理的正确道路，海洋功能区划制度、海域权属制度、海域有偿使用制度、海域监督检查制度等海域管理制度依法实施，为规范用海秩序、合理开发海洋资源、加快海洋经济发展提供了制度保障，有效缓解了海域使用过程中“无序、无度、无偿”状况。海域使用管理法第五条规定：“国家建立海域使用管理信息系统，对海域使用状况实施监视、监测”。及时掌握海域使用功能及类型的变化信息，是“强化海洋意识，维护海洋权益，保护海洋生态，开发海洋资源，实施海洋综合管理，促进海洋经济发展”“完善海洋功能区划，规范海域使用秩序”等海域管理工作的必要条件。同时，获得海域使用功能及类型随时间变化的信息，也是海洋行政主管部门制定海域使用整体规划和政策、法规的基础依据。

由于长期以来，我国监视监测手段比较落后，难以对海域空间资源、海洋功能区和近年来填海造地等用海项目实施有效监控，海域使用的现状与动态不清，用于海域管理的基础信息匮乏，海域动态评价与决策支持等高层次信息服务更无从谈起。为了有效落实海域监督检查制度，掌握海域使用总体情况和动态变化过程，国家海洋局于 2006 年启动了“国家海域使用动态监视监测管理系统”的建设和运行，系统采用卫星遥感监测和实时移动监测等方式，对海域使用状况、海洋功能区划执行情况以及海域空间资源等动态要素

实施全覆盖、高精度的实时监视监测,以便及时掌握海域使用及其时空动态变化状况,有效使用海域资源,使其发挥最佳利用效益。具体包括:(1)实时、准确获取海域使用信息,保持有关数据的现势性和及时更新,为国家制定海洋经济发展规划、海域资源利用规划等宏观决策提供可靠、准确的依据;(2)对违法或涉嫌违法用海的地区及其他特殊情况进行快速的日常监测,为违法用海查处和突发事件处理提供依据;(3)寻求达到海域使用最佳整体效益的配置方案,以满足和协调国民经济各部门对用海的需求,进一步拉动海洋经济的发展;(4)确定海域持续利用方式,以促进海域资源的保持和利用;(5)建立和完善海域管理的数字化、可视化及网络化的信息表达方式,实现海域使用管理的科学化、信息化和规范化;(6)为涉海公众提供海域使用数据、图件和技术信息,全面服务社会。目前,系统建设已全部完成,并基本建立了国家、省、市三级业务机构,64个节点全部连通,进入业务化运行阶段。经过多年的建设和业务化运行,系统在海域监管方面发挥了积极作用。但关键技术支撑不足阻碍业务化工作正常开展的问题日益凸显。

遥感技术是一种对地观测的新型应用技术,已广泛应用于土地利用、森林监管、灾害监测、气象预报等领域,取得了很好的社会经济与资源环境效果。应用遥感技术开展海域资源及其使用动态监测,是国家海域使用动态监视监测管理系统实现海域动态信息共享和海洋环境状况定量化分析和评价的基本技术,目前主要应用工作包括重点用海类型和方式遥感监测业务化技术、海域使用疑点疑区遥感监测业务化技术、在建用海项目海域使用动态遥感监测业务化技术和海域使用遥感综合评价业务化应用技术等。

第二节 海域使用遥感监测技术现状

20世纪70年代,美国、加拿大、欧共体等地就开始研究海洋自动监测技术,代表性的海洋环境监测系统为全球海洋观测系统 GOOS (Global Ocean Observing System)。GOOS 是一个国际合作系统,是联合国教科文组织政府间海洋学委员会迄今发起的全球性最大、综合性最强的海洋观测系统,其主要任务是应用遥感、海表层和次表层观测等多种技术手段,长期、连续地收集和處理沿海、陆架水域和世界大洋数据,并将观测数据及有关数据产品对世界各国开放,已经完成多个区域的海洋遥感监测系统建设。

我国海洋遥感监测技术目前主要集中在以下三个方面:海洋动力与环境

要素监测、海洋水色监测、海岸带及海岛测绘。其中海洋动力与环境要素监测的主要内容包括海面风场、浪场、流场、潮汐、锋面、海冰形貌等；海洋水色探测通常指海水中叶绿素浓度、悬浮泥沙含量、污染物质、可溶有机物等要素的探测；海岸带遥感测绘包括海岸线及其演变、滩涂和岛礁地形地貌、沿岸工程环境、浅海水深和水下地形、地质构造、植被分布等。目前尚无专门针对海域使用类型和海域使用方式进行的遥感应用研究，而无论海洋功能区划，各类海域使用审批都对海域使用现状及其他用海信息的快速遥感解译提出了越来越高的要求。

国家海洋局 2002 年开始组织建设的海域管理信息系统，涵盖了海洋功能区划、海域使用申请审批、海域使用权登记造册、海域使用权证书发放、海域使用金征收等各项功能。在研究层面，洪建胜介绍了福建省海域使用综合管理信息系统建设和海洋管理信息化情况；林宁等研究了基于 MapObjects 的海域使用时空数据管理的实现；周良勇等提出了基于单机和网络系统的海域管理信息系统建设方案；付元宾等也从技术体系和业务体系两个方面对我国海域使用动态监测系统（Sea area usage Dynamic Monitoring System，简称 SDMS）的构建模式进行了探讨，初步建立了 SDMS 的概念模型。然而由于海域使用监测存在明显不同于海洋环境监测或土地利用监测的复杂性和特殊性，使得我国目前尚未建立有效的可业务化应用的海域使用遥感监测体系。随着空间技术的发展，立足于各类海域使用类型的空间复杂性特征，以即时的高精度卫星遥感影像为基础监测数据，以全球定位系统地面差分定位为补充数据，充分应用地理信息系统的强大空间分析技术，建立针对各类海域使用类型空间特征的信息提取技术，将大大提高我国海域使用监测与评价技术水平。

围填海动态监测是海域使用管理工作的重要内容之一。遥感和地理信息系统技术在围填海领域的应用始于 20 世纪 80 年代，荷兰较早地利用“3S”技术对围填海进行研究。国内外学者在海域使用动态变化监测方面，主要侧重于对海岸变化检测提取方面，从最早的 Roberts 算子（L. G. Roberts, 1965）的提出，到阈值分割方法的应用，常用的有神经网络法、区域生长法和基于小波变换的多尺度边缘提取等方法。（Lohani et al, 1999）通过对航空专题图进行波段比值，描述出 Holderness 海滩水边线，最后生成岸滩 DEM。Rajesh Karki（2002）结合 GIS 调查了 GUYANA 海岸线的长期时空变化。Margaret M. D'lorio（2003）利用航空遥感和 GIS 对岸线迁移的影响进行了评估。木村典嗣等利用 ALOS 搭载的相控阵型 L 波段合成孔径雷达（PALSAR）对福

冈河口附近的筏式养殖场进行解译分析,认为利用 PALSAR 可以识别不同种类的海苔浮筏信息。

在国内,近年来遥感技术已经在海域使用动态监测、海冰识别、海上目标(船只、尾迹)检测等诸多领域开展应用。孙钦邦介绍遥感技术用于海域动态监测的概念与目的,归纳和分析利用多时相遥感影像进行海域使用变化信息发现和提取的方法和技术;韩富伟应用多时相高分辨率遥感影像,利用人机交互式解译方法,进行了辽宁海域使用动态信息提取;宋红等 2004 年利用遥感影像研究了深圳湾填海区土地利用和时空进程;李禹等 2008 年采用遥感主成分分析(PCA)的方法,对厦门市港湾地区的 5 个时间段内填海造地的空间分布信息进行提取,并结合相应阶段的城市发展战略进行分析;汪海洋、潘德炉等提出一种基于方向傅立叶能量谱和支持向量机的水面尾迹纹理自动提取算法,该算法能够准确地提取运动目标产生的尾迹纹理;陈鹏,黄韦良等提出了一种改进的 CFAR 船只探测算法,指出该算法在探测精度和探测速度上均明显优于改进前的算法。可以看出,国内的研究大多集中于个别地区的海域使用状况调查及分析,研究对象的局限性及特殊性,使监测手段不尽相同。

虽然,目前国内外对海岸线自动检测解译提取做了诸多研究,但对于海岸线向海区域的围海、填海、构筑物用海以及筏式养殖和网箱养殖用海信息的提取还没有专门性针对性的研究,对近岸海域的遥感影像的增强、用海变化信息的检测等尚未形成成熟完善的技术标准。

第三节 海域使用遥感监测技术研究的不足与展望

海域与土地同属国土资源,而与海洋环境又有着密不可分的联系,因此海域使用遥感监测与土地利用遥感监测、海洋环境遥感监测有着很多相似之处。然而,通过多年的实践总结,海域使用遥感监测又具有其自身的显著特点,这主要体现在以下几点。

(1) 海域使用是一个立体的空间概念。海域使用的立体性是与水体及底质的三维空间相对应的,用海活动可能位于水表、水体甚至底质中。目前主流的遥感数据只能对水体表面和水表浅层的用海活动(如浮筏养殖)具备一定的辨识能力,而对水体和底质中的用海活动(如沉箱养殖、底播养殖、海底采矿、海底管线等)则几乎没有辨识能力。

(2) 海域使用往往没有可见边界,且用海区块间光学特性可能没有明显差异。首先,除了围海、填海等少数用海方式,大多数用海并没有实际可见的边界线,如海上倾废区、港口、航道、海水浴场等,其外围边界只是人为确定的图上界线,并不存在遥感图像上可以辨识的界线标志。其次,由于水体的连通性和流动性,很多用海单元之间的水面光谱特性没有明显差异。例如在利用卫星遥感进行辽宁、河北等省海域使用调查的过程中发现,交通运输、旅游娱乐以及海底工程等用海区域的水面光谱特性基本相同,难以在遥感卫片上进行分区。

(3) 面状特征体识别要以线状要素提取为基础。由于不同的海域使用区块间水面光谱特性差异不明显,因此海域使用面状特征体的识别更多需要对边界线的提取来完成,如通过提取坝体完成围海区域的识别,而坝体自身的横向尺度(宽度)远小于围海区域的空间尺度,这就使得海域使用监测对卫星遥感图像的精度要求相对于土地利用监测要更高。如在西藏、新疆、四川等地进行的土地利用调查中,利用 25-30 米分辨率的 TM 遥感影像可以区分 90%-94%的二级类和 85%-90%的三级类,基本可以满足土地利用监测的需求,而在辽宁、河北等地的海域使用监测中发现,同样精度的遥感影像只对盐田等水体光学特性差异显著且分布面积广的用海识别良好,而对小面积的围海养殖等其用海识别率则不足 40%。

(4) 海域使用活动基本都是位于海岸线两侧的一个狭长带状区域内。利用遥感影像对海域使用进行监测时,遥感影像的利用率不高,如果全部采用高精度遥感影像进行全国范围内的海域使用监测,将会造成大量数据和资金的浪费。

虽然遥感技术已在国家海域使用监测中发挥了重要作用,基本实现了对海域空间资源、海域使用现状和海洋功能区等动态要素的全覆盖、高精度实时监测。但鉴于海域使用监测的特殊性,且目前遥感技术应用于海域使用动态监测的研究才刚刚起步,一些关键技术仍需进一步突破与完善,集中表现在:①目前用海是以行业分类,缺乏针对遥感影像的海域使用分类体系以及关于对象分类的基础标准,无法规范用海信息提取,导致海域使用遥感监测成果的不统一。②海域使用遥感影像处理技术不具有针对性,几何校正、影像配准等技术不完善。海岸带遥感影像普遍存在水域面积大、控制点少、环境复杂等特点,而现有的成果及商业软件均是通用性的影像处理方法,缺乏针对海岸带遥感影像的处理模块,在海域动态监测实际工作中的应用难以达

到预期效果。③用海信息提取技术不成熟,海域使用遥感监测工作的自动化水平较低,无法实现有效的遥感监测。④海域使用遥感影像数据量大,针对更新频繁的高精、低精、航拍影像,缺乏海量数据的存储技术及多源遥感数据成果的综合集成方法。

上述问题的存在,严重制约了遥感数据利用率和海域监管效率的提高。今后,应加强高空间分辨率数据、高光谱数据、雷达数据、无人机监测数据等多源、多时相、多模态数据在海域使用动态监测的综合运用,并突破传统的基于地物波谱信息的影像处理与分析方法,结合人工神经网络、支持向量机、核学习等影像分类和目标识别方法,研发基于特征单元的遥感信息提取技术,以提高海域使用信息提取的精度和自动化程度。此外,还需进一步推进 3S 技术的综合运用,与 GIS、GPS 融合进行高分辨率遥感影像的海域使用空间格局与判别分析,并基于海量遥感数据进行集群并行处理技术研究与应用,以实现海域遥感监测数据的高效管理与处理。在当前海域开发日益活跃的大背景下,急需解决制约性的技术瓶颈问题,以保障业务系统的正常运转,提升海域使用遥感监测的效率与精度,为国家海域管理提供及时、准确的监测数据。

第二章 海域使用遥感监测 影像处理技术

第一节 中高分辨率遥感影像的几何校正技术

卫星遥感影像几何校正就是利用卫星遥感影像与各种相关图件或实地之间的同一地物点（控制点）建立几何线性变换模型，对卫星遥感影像进行空间位置配准与校正的工作。卫星遥感影像几何校正是遥感影像的变化检测之前必须进行遥感影像处理技术，高空间分辨率卫星遥感影像几何校正一般采用地面控制点（GCP）同名点方式，即在两个时相遥感影像中选择一定数量的相同地物的影像特征点，建立控制方程。GCP 模型法回避传感器成像时的实际几何状态，直接对不同时相的遥感影像进行几何校正，该方法的校正精度依赖于 GCP 精度。典型的 GCP 模型法是遥感影像多项式校正，将遥感影像的总体变形看作是平移、缩放、旋转、偏扭以及更高次的基本变形综合作用结果，校正前后影像相应点之间坐标关系可以用一个适当的多项式来表达。常见的卫星遥感影像几何校正方法有严格物理成像模型、一阶多项式仿射变换、二阶多项式变换（双线性变换、齐次方程）等。

一、严格物理成像模型

由于卫星姿态、高度、速度、地球曲率、地形等因素，造成卫星遥感影像相对地面目标发生几何畸变问题。解决此问题需要利用卫星遥感影像获取信息并在一个规定的坐标系中，进行基于严格物理成像模型的卫星遥感影像几何校正算法构建。算法构建的关键是完成对成像方程中的外方位元素的反算，其中角元素和线元素是关键参数，外方位元素一共有 6 个，3 个角元素（ κ, φ, ω ），3 个线元素（ X_s, Y_s, Z_s ）。角元素实质为摄影中心在卫

星成像时刻的姿态角, 线元素为摄影中心在卫星成像时刻的空间坐标值。对于共线方程求出各个外方位元元素后就可以完成像素坐标向地理坐标的转换。

建立严格物理成像模型, 必须有卫星的星历数据作支撑。在 SPOT5 原始数据中, 星历数据保存在 Metadata. dim 文件中。该文件包括数据采样时刻卫星摄影中心的三维坐标信息; 三个线元素方向的速度值; 采样时刻; 卫星姿态的角元素、角元素的变化率; 扫描行时间, 景中心时刻和侧视角。构建严格物理成像模型前, 必须进行成像时刻计算、星历插值计算和卫星姿态插值计算。严格物理成像模型的建立是基于成像过程中坐标系的转换, 包括传感器坐标、本体坐标、轨道坐标、CIS、CTS 等坐标系的转换, 最后形成推扫式卫星影像的严格物理成像模型。由于摄动影响等因素的存在, 可以采用两种方式进行严格物理成像模型的优化, 并利用控制点对严格物理成像模型的参数进行调整。

公式 2-1 (共线方程) 所示为像素坐标与实际地理坐标系的对应关系。若要得到精确地几何定位信息, 需要精确反演出成像时刻系统的外方位元元素。

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad \text{公式 (2-1)}$$

影像空间后方交会时姿态中的外方位元元素间 ($\kappa, \varphi, \omega; X_s, Y_s, Z_s$) 有着较强的相关性, 可导致最后平差方程出现病态现象 (方程组系数阵发生奇异), 方程解算精度降低。目前单像空间后方交会法方程病态的解决办法有多种方法, 分别是增设虚拟观测方程、合并相关项、岭估计等。采用的是将线元素和角元素分开迭代求解的方法。

法方程的病态原因在于系数阵发生奇异, 克服的办法是把导致复共线性的线角元素分开迭代, 即一次解算只求解一类元素 (与线角迭代顺序无关)。在平差过程中循环使用阈值进行迭代计算。具体平差方程系数矩的建立是将控制点信息带入共线方程 (2-1) 中, 再将列立的方程组进行线性化 (离散化), 离散化过程相对较为复杂。

选用 N 个控制点, 设系数阵为 B , 外元素采用二阶变率表示。一次迭代过程即为一次平差过程, B 为 4×18 的矩阵, 其中外元素表示为:

$$\begin{aligned}
 \kappa &= \kappa_0 + k [0] \times x + k [6] \times x^2 \\
 X_s &= X_{s0} + k [3] \times x + k [9] \times x^2 \\
 \varphi &= \varphi_0 + k [1] \times x + k [7] \times x^2 \\
 Y_s &= Y_{s0} + k [4] \times x + k [10] \times x^2 \\
 \omega &= \omega_0 + k [2] \times x + k [8] \times x^2 \\
 Z_s &= Z_{s0} + k [5] \times x + k [11] \times x^2
 \end{aligned}$$

其中 x 为影像平面坐标系中的纵坐标 (扫描行数), 卫星运动方向定位成 y 轴, 旁向扫描方向定位 x 轴, 交点为原点 O 。

$$\begin{aligned}
 X &= -Z \frac{\sin \alpha_x [f \cos \omega - (x \sin \kappa + y \cos \kappa) \sin \omega] + \cos \alpha_x (x \cos \kappa - y \sin \kappa)}{\cos \alpha_x [f \cos \omega - (x \sin \kappa + y \cos \kappa) \sin \omega] - \sin \alpha_x (x \cos \kappa - y \sin \kappa)} \\
 Y &= -Z \frac{f \sin \omega + (x \sin \kappa + y \cos \kappa) \cos \omega}{\cos \alpha_x [f \cos \omega - (x \sin \kappa + y \cos \kappa) \sin \omega] - \sin \alpha_x (x \cos \kappa - y \sin \kappa)}
 \end{aligned}$$

公式 (2-2)

上述公式经离散化并带入控制点信息后, 列出方程组系数阵中有关线元素及其变率的系数如下:

$$\begin{aligned}
 B_{2i \times 18} &= \partial F_x / \partial X_s; & B_{2i \times 18+3j} &= -\partial F_x / \partial X_s \\
 B_{2i \times 18+1} &= \partial F_x / \partial Y_s; & B_{2i \times 18+3j} &= -\partial F_x / \partial X_s \\
 B_{2i \times 18+2} &= \partial F_x / \partial Z_s; & B_{2i \times 18+3j+1} &= -\partial F_x / \partial Y_s \\
 B_{(2i+1) \times 18} &= \partial F_y / \partial X_s; & B_{2i \times 18+3j+2} &= -\partial F_x / \partial Z_s \\
 B_{(2i+1) \times 18+1} &= \partial F_y / \partial Y_s; & B_{(2i+1) \times 18+3j} &= -\partial F_y / \partial X_s \\
 B_{(2i+1) \times 18+2} &= \partial F_y / \partial Z_s; & B_{(2i+1) \times 18+3j+1} &= -\partial F_y / \partial Y_s \\
 B_{(2i+1) \times 18+3j+2} &= -\partial F_y / \partial Z_s;
 \end{aligned}$$

其中 B 的下标表示其在一维系数矩阵中的位置。 $i=1, 2, 3, \dots, N_{ctrl}$ 角元素系数阵形式上与线元素类似:

$$\begin{aligned}
 B_{2i \times 18} &= \partial F_x / \partial \kappa_0; & B_{2i \times 18+3j} &= -\partial F_x / \partial \kappa_0 \\
 B_{2i \times 18+1} &= \partial F_x / \partial \varphi_0; & B_{2i \times 18+3j+1} &= -\partial F_x / \partial \varphi_0 \\
 B_{2i \times 18+2} &= \partial F_x / \partial \omega_0; & B_{2i \times 18+3j+2} &= -\partial F_x / \partial \omega_0 \\
 B_{(2i+1) \times 18} &= \partial F_y / \partial \kappa_0; & B_{(2i+1) \times 18+3j} &= -\partial F_y / \partial \kappa_0 \\
 B_{(2i+1) \times 18+1} &= \partial F_y / \partial \varphi_0; & B_{(2i+1) \times 18+3j+1} &= -\partial F_y / \partial \varphi_0 \\
 B_{(2i+1) \times 18+2} &= \partial F_y / \partial \omega_0; & B_{(2i+1) \times 18+3j+2} &= -\partial F_y / \partial \omega_0
 \end{aligned}$$

其中 $i=1, 2, 3, \dots, N_{ctrl}$