

遥感信息的不确定性研究 误差传递模型

葛 咏 王劲峰 著

WUCHA CHUANDI MOXING



地质出版社

遥感信息的不确定性研究

误差传递模型

葛 咏 王劲峰 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书论述了遥感信息不确定性研究的重要性,以及处理不确定性的理论和方法。以合成孔径雷达(SAR)的不确定性研究为例,提出了从机理的角度来处理此类问题,根据各部分传递函数组合成一个误差传播模型,以提高 SAR 图像精度;提出了虚拟现实技术来模拟 SAR 成像系统和利用动画技术显示不确定性大小。

本书可供从事遥感、地理信息系统、测绘及相关学科的科研人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

遥感信息的不确定性研究/葛咏,王劲峰著.-北京:地质出版社,2003.4
ISBN 7-116-03815-9

I.遥… II.①葛…②王… III.遥感-信息技术-不确定系统-研究
IV.TP7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 026697 号

YAOGAN XINXI DE BUQUEDINGXING YANJIU

责任编辑:祁向雷

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324577(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787mm×960mm¹/₁₆

印 张:8.375

字 数:304 千字

印 数:1—800 册

版 次:2003 年 4 月北京第一版·第一次印刷

定 价:30.00 元(基两册)

ISBN 7-116-03815-9/T·109

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

沐浴着新世纪的春风，世界科学技术飞速变化。值得庆幸的是，我们能够置身于这么一个高速发展的科技时代。

遥感，包括航空和卫星遥感，是一种不通过直接接触目标而获得和处理地球表面信息的一种探测技术。进入空间时代和信息时代，人们对地球表面的物质信息和能量信息给予了更大的关注。当前，遥感技术，已经当之无愧地成为获取地球信息的“主角”。然而，由于环境干扰，信息获取设备和处理设备的限制，遥感信息在传递过程中不可避免地带有误差，并将最终导致遥感影像的不确定性。遥感信息这一不确定的特性将严重影响了遥感的功能、效率和灵活性，制约着遥感信息的产品化和实用化的进一步发展。

鉴于上述问题和目前遥感信息不确定性分析的“掐头去尾”处理方法所存在的不足，作者独辟蹊径，提出从机理的角度来处理遥感信息的误差。从影响遥感数据的各种因素的本源着手，找出各种对遥感像元影响的误差的特征和大小，最终，综合各种误差，给出每个像元的不确定性信息。在这种具有不确定性信息的遥感图像的基础上，我们可以“放心”的进行各种影像操作。就目前的研究现状来看，从机理的角度处理遥感信息不确定性的研究方向尚属于空白。

在这种背景下，本书选定空间数据的不确定性作为研究对象，并以合成孔径雷达（SAR）的不确定性研究为例，系统地，详实地分析讨论基于机理的遥感信息不确定性分析的理论和分析方法。给读者一个具体化、有实际可操作性的分析。同时，这些方法也可用到其他遥感系统和产品的不确定性分析中。

本书分为两大部分：第一部分是理论分析，主要是利用机理的方法辅以数据分析的方法分析合成孔径雷达的不确定性。第二部分是不确定性的可视化表达，主要基于第一部分所得到的误差传播模型，采用系统仿真技术和虚拟现实环境初步建立了 SAR 系统仿真和不确定性可视化表达，以便更好地揭示和表达理论分析的结果。

本书共分六章，以合成孔径雷达不确定性分析为研究核心，以“研究背景—理论方法—实施—细化—可视化表达与应用—总结”为主线，逐一对主要研究内容进行了详尽的论述。

第一章为遥感信息不确定性的研究。主要包含三方面的内容，一是讨论了本书的研究背景；二是讨论了当前不确定性研究的理论支持和方法；三是结合

本书的研究内容提出相应的研究方法。

第二章为合成孔径雷达系统。简要介绍合成孔径雷达原理、合成孔径雷达成像特点、传递函数和成像原理。

第三章为合成孔径雷达系统的不确定性分析。本章及第四章是本书的核心和重点，在这章中，首先详细描述了合成孔径雷达成像系统的误差源。其次，描述合成孔径雷达的成像机理模型。最后，在此模型的基础上推导合成孔径雷达误差传递函数。

第四章是讨论和确定相位、位置和灰度三者的关系。地学工作者往往比较关心遥感图像像元的位置和灰度的不确定性大小，但在许多雷达书籍中讨论较多的却是相位及其误差分析，对于相位、位置和灰度这三者之间的关系讨论的较少。为了帮助理解和应用，笔者从地学的角度理解这三者的关系，并推导三者之间的相应的公式。在上述推导和相应误差理论的基础上推导出 SAR 像元的不确定性大小。

第五章是不确定性的表达和应用。首先，可视化的技术支持。其次，实现了两种模拟模式：“正向模拟”和“逆向模拟”。最后，给出了相应的应用范例。

第六章是总结与展望。对全文的内容作了简要回顾，整理了论文工作的主要特色，并针对存在的不足提出了今后进一步研究的方向和目标。

空间数据的不确定性理论研究是地理信息科学界公认的极为重要也是极为困难的基础理论课题之一。笔者希望能够以此工作为后来者扫除不确定性研究道路上的一些障碍，投石问路，抛砖引玉。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目（40201033）和国家“863”青年基金（2001AA135151）项目的资助，作者深表谢意。由于作者水平有限，望广大读者在阅读本书时能提出宝贵意见，不胜感激！

目 录

前 言

第一章 遥感不确定性研究概述	(1)
第一节 简介.....	(1)
第二节 遥感不确定性研究的意义.....	(1)
第三节 遥感不确定性研究的进展.....	(2)
第四节 遥感不确定性的来源.....	(5)
第五节 研究和处理不确定性的理论和方法.....	(7)
第六节 目前不确定性研究存在的问题	(19)
第七节 本书的研究内容和目标	(21)
第二章 合成孔径雷达 (SAR) 系统	(23)
第一节 概述	(23)
第二节 合成孔径雷达技术	(23)
第三节 合成孔径雷达信号传递流程图	(28)
第四节 合成孔径雷达原理分析	(30)
第五节 合成孔径雷达传递函数	(34)
第六节 合成孔径雷达数字成像处理	(39)
第三章 SAR 系统的不确定性分析	(46)
第一节 概述	(46)
第二节 SAR 图像不确定性处理的方法	(46)
第三节 基于机理的 SAR 成像系统不确定性分析	(58)
第四章 SAR 原始图像像元的不确定性大小	(74)
第一节 相位误差、位置误差和灰度误差三者关系	(74)
第二节 误差综合原理	(76)
第三节 SAR 误差综合	(81)
第四节 SAR 原始图像像元的不确定性分析	(85)
第五章 SAR 系统不确定性的可视化及其应用	(86)
第一节 概述	(86)
第二节 可视化的技术支持	(86)
第三节 正向模拟	(89)
第四节 不确定性可视化的实现.....	(101)

第六章 总结与展望	(108)
第一节 主要工作和成果	(108)
第二节 研究展望	(110)
参考文献	(112)
附录 数学符号	(125)

第一章 遥感不确定性研究概述

第一节 简介

20 世纪初, 物理科学史上的两次重大变革: 相对论的引入和量子力学的引入, 不但确立了物理科学的发展方向和研究范畴, 而且更重要的是它指出了科学中描述客观实体的局限性 (Ronen, 1988)。量子力学的一个重要结论是将自然界的存在方式描述成一种固有的不确定性 (Ronen, 1988)。相对论和量子力学表明: 无论是以定性的 (语言) 还是定量 (数据) 的方式描述的客观实体均与客观实体本身存在一定的差别, 这种差距表明了科学对于客观实体的描述存在固有的不确定性。

由于不确定性具有普遍性和现实性, 因而受到国际学术界的广泛重视, 成为当前科学研究领域中的一个难点和热点。

遥感的研究对象都是空间实体。它们的根本任务就是分析处理空间数据, 提取并传输空间信息。描述空间实体的空间数据包括与时间有关的位置数据和属性数据, 是通过对自然界中空间实体的各种直接或间接观测得到的 (Burrough, 1986)。尽管空间数据中所存在的不确定性可以通过数据编辑、纠正等手段得以部分消除, 但空间数据中仍然存在大量随机或系统的不确定性, 有的甚至严重影响产品的可靠性 (刘文宝, 1995; 黄幼才, 1995; 张景雄, 1998; Zhang, 2002)。

这种研究背景为我们研究遥感的不确定性提供了合理性、必要性和重要性。本章主要对目前遥感不确定性的研究现状和存在的问题以及解决问题所涉及的理论方法做了系统的综述, 并在此基础上提出了研究问题和解决问题的方案。

第二节 遥感不确定性研究的意义

遥感数据在获取过程中, 由于仪器设备和处理技术的限制, 在每一个环节上都可能会产生难以预料的系统误差和随机误差。诸如: 传输损耗、遥感平台的不稳定、数字化的误差等, 这些都将造成空间数据本身的误差。在空间数据获取之后, 需要经过数据处理、数据分析、数据转换等过程才能成为用户可以

理解和使用的遥感产品。在遥感产品的生产过程中，由于各种空间操作也会引入新的误差，因此遥感产品不可避免地含有误差。例如，在一幅遥感图像上一片松林被误标注成云杉，那么这个误差由于被忽略或没有注意到而被引入到图像上或数据使用者那里。因此，由于这个错误就会造成松林或云杉面积的计算错误。因此，在使用遥感产品之前，必须首先谨慎弄清它的质量是否合乎自己的要求。例如，遥感产品的精度和可靠性符合要求吗？遥感产品的误差会不会严重影响决策者的结论？

虽然空间数据存在不可避免的不确定性，但是当前遥感和 GIS 软件的一个基本前提是，假设空间数据中不含有误差，并且只能处理确定性数据。利用只能处理确定性数据的 GIS 来处理具有大量不确定性的空间数据会出现严重问题（刘文宝，1995；黄幼才，1995）。

因此，遥感要发展，必须高度重视和研究空间数据的不确定性理论。目前的根本问题是建立和发展一种能处理遥感不确定性的方法，这需要空间数据不确定性理论的支持。因此，研究空间数据的不确定性是一项十分必要而又紧迫的任务。

空间数据不确定性理论研究的两大主要任务：一方面从理论上研究空间数据不确定性的来源、性质和类型，度量指标和表达方法以及在遥感空间数据操作中的传播规律；另一方面，从实际上寻找控制和削弱不确定性的数据处理技术。空间数据不确定性的最终目的是建立不确定性理论，并提供一套计算方法，使每一个 GIS 和遥感产品均附有质量指标，就像测量工作者在提供大地坐标时，同时提供坐标精度一样（刘文宝，1995；黄幼才，1995）。

第三节 遥感不确定性研究的进展

一、术语表达

不确定性（uncertainty）一般表现为随机性和模糊性。误差（Error）指统计意义下的“偏差（variation）”或“错误（mistake）”，主要包括：系统误差、随机误差和粗差。在强调不确定性的统计内涵时，测量工作者常常习惯于将不确定性称为观测误差，而地理工作者则乐于直接称为不确定性。误差的统计分布特征通常用精度表示，精度又分为精密度（precision）、正确度（correctness）和准确度（accuracy）（刘文宝，1995；黄幼才，1995）。

由于空间数据质量所涉及的问题千差万别，人们不得不扩展“误差（error）”和“精度（accuracy）”等传统概念的内涵。误差不仅指统计意义下的“偏差（variation）”或“错误（mistake）”，不仅仅是传统的“三类测量误差”，还包括概念、模糊或量化不确定性等。因此，误差应向“不确定性”概念扩展

(Chrisman, 1989; Heuvelink, 1993)。“精度”术语应向含义相近的词“不确定度”、“适合度”、“可靠度”、“灵敏度”等扩展 (Herzog, 1989)。

二、遥感不确定性研究现状

空间数据不确定性始于 1968 年 Blakney 发表的“地形图的精度标准”和 Webster 和 Beckett 发表的“土壤图的质量和用途”两篇文献,并被认为是 GIS 空间数据不确定性研究方面最早的文献资料 (Goodchild, 1991)。在此之后,空间数据不确定性方面的论文大量涌现。其中作为博士论文选题进行研究的有美国 Kansas 的 Traylor (1979), Washington 大学的 Chrisman (1982), Kent 州立大学的 Veregin (1991), Melbourne 大学地理系的 Hunter (1992), 荷兰 Amsterdam 大学的 Heuvelink (1993), 荷兰 ITC 的 Shi (1994, 1998) 等。

在国家自然科学基金会 (National Science Funding, 简称 NSF) 的支持下,美国于 1988 年成立了国家地理信息和分析中心 (The National Center for Geographical Information and Analysis, 简称 NCGIA)。NCGIA 是一个独立的、致力于地理信息科学和相关技术的基础研究和教育的协会。该中心成立的目的在于解决 GIS 进一步应用和地理分析中的问题。它的研究方向代表着国际 GIS 和遥感基础研究的方向。NCGIA 由四个研究机构组成,它们分别是 University of California, Santa Barbara, University at Buffalo 和 University of Maine。

NCGIA 在制定 20 世纪 90 年代研究计划时,提出了十二个研究课题,其中第一个就是“空间数据库精度”,第十二个专题是关于 GIS 与遥感集成中的有关问题。第十二专题研究小组提出了提高 GIS 与遥感的集成中的六个主要研究问题:①误差分析;②数据结构与检索;③数据处理流程与方法;④人机交互界面;⑤硬件环境;⑥社会因素。这充分显示现阶段 GIS 与遥感研究领域中,不确定性问题是最为重要的研究主题之一 (史文中, 1998)。

在美国,国家数字制图数据标准委员会 (NCDSCS) 下设四个工作组,其中由 University of Washington 的 Chrisman 教授担任主席的第二工作组从事数据质量研究 (Modelling, 1984), 并与 1988 年发表了美国国家数字制图数据标准草案。

在英国,国家经济与社会研究委员会 (The Economic and Social Research Council, 简称 ESRC) 的区域研究实验室和自然环境研究委员会在制定 20 世纪 90 年代的合作研究计划时,提出了十四项研究课题,其中第三项为“GIS 中的误差传播” (Mather, 1989; Maguire, 1989)。

在荷兰,由 ITC (The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 简称 ITC) 和四所大学组建的荷兰空间数据分析专家中心 (Nederlands Expertise Centrum Voor Ruimtelijke Informatieverwerking, 简称 NEXPRI) 在制定 20 世纪 90 年代的研究计划时,提出了四大研究课题,其中第一个研究课题“空

间分析理论”中的第一个问题为“空间操作中的误差传播”(NEXPRI, 1989; Maguire, 1989)。

为了有组织地拟定空间数据不确定性理论的研究方向和计划,以便推动不确定性理论和方法的发展,促使国际 GIS 工作者更加重视数据质量问题,国际上有许多学术组织和高校召开过专题讨论会。例如, NCGIA 曾于 1988 年 12 月主持召开的数据库精度科学大会。这次会议被公认是国际 GIS 空间数据不确定性理论研究史上的一个里程碑,标志着人们对 GIS 数据质量问题进行系统研究的开始。其中会议论文集《Accuracy of Spatial Database》,已成为该方向研究的经典参考文献。1991 年,澳大利亚的 Melbourne 大学也组织过一次数据库精度专题讨论会(刘文宝, 1995)。

近年来,空间数据不确定性的研究成果越来越多地出现在一些大型国际会议和著名学术刊物上。例如,影响较大的“Auto-Carto 会议”和“国际空间数据处理会议(SDH)”, ISPRS 大会, IGARSS 大会, FIG 大会, ASPRS-ACSM 年会, 欧洲的 EGIS 年会, 英国的 AGIS 年会等。随着空间数据处理问题的深入和拓展,近两年来,又不断涌现出了一些重要的、具有学术特色的国际会议,如始于 1994 年的两年一届自然资源和环境科学空间精度评价国际会议,始于 2000 年的 GISc 国际会议等;著名的学术刊物包括 Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, International Journal of Geographical Information Science, International Journal of Remote Sensing, Transaction in GIS。

在我国,中科院地理科学与资源研究所的资源与环境信息系统国家重点实验室在 1994 年的研究基金主题中有三个方向:①地理信息机理;②区域可持续发展;③全球环境变化。地理信息机理又分 19 个项目,其中第四项为“空间数据库数据误差的统计方法”和第十五项为“模拟过程的误差传递分析”。设在武汉测绘科技大学的测绘遥感信息工程国家重点实验室于 1992 年就立项资助了“空间数据库精度分析”的项目(刘文宝, 1995)。

进入 21 世纪, NCGIA 的研究课题有三个:①空间数据的精度和不确定性;②空间认知;③GIS 的建模和表达。Accuracy 2000 国际会议上的主题主要包括:①误差-灵敏度 GIS 的发展;②空间建模的不确定性传播的理论和应用;③遥感影像和分类的不确定性处理;④基于设计和基于模型的不确定性评价;⑤随机空间模拟;⑥时空不确定性的处理;⑦分类数据的空间不确定性建模;⑧空间不确定性的可视化;⑨聚类和综合对空间不确定性评价的影响;⑩空间决策系统与不确定性的融合等。这些方向代表着目前 GIS 和遥感不确定性处理的前沿研究。

许多学者就不确定性理论体系的构成提出了设想。Veregin 提出了一个分析和处理 GIS 空间数据误差的基本体系,包括:①误差源的确定;②误差的探测和度量;③误差传播的建模;④误差管理和控制策略;⑤误差的削弱方法。

Lanter 等提出了一个研究误差传递的模式, 包括: ①误差概念模型; ②误差度量指标; ③误差传递函数; ④误差的自动传递; ⑤评价和决策。应当指出, 目前的大多数研究工作都是在 Veregin 提出的框架内进行的 (刘文宝, 1995; 黄幼才, 1995)。

第四节 遥感不确定性的来源

一、遥感不确定性的类型

作为空间数据不确定性理论的基本问题之一, 不确定性的类型与特性的研究出现过大量的概念和术语。如, Chrisman (1987) 将 GIS 空间数据误差区分为位置误差 (positional error) 和属性误差 (attribute error); Bedard (1987) 分别称其为定位误差 (location error) 和说明误差 (description error); 而 Veregin (1989) 将其定义为制图误差 (cartographic error) 和专题误差 (thematic error)。实际上, 这两种误差总是同时出现, 并不存在一个普遍而又明确的定义 (Chrisman, 1989), 人们只能从不同的侧面进行分析和分类。Veregin (1989) 还进一步将制图特征和专题特征的赋值误差称为量测误差 (measurement error), 将从客观实体特征向制图目标转化过程中引起的误差定义为概念误差 (conceptual error)。Chrisman (1987) 认为概念误差与模糊不确定性本质上含义相同。还有人提出了定性误差 (qualitative error) 和定量误差 (quantitative error) 的概念 (Burrough, 1986; Bedard, 1987)。Lanter (1992) 根据地理要素可以惟一地定义在空间、专题和时间三个维中, 提出了空间误差 (spatial error)、专题误差 (thematic error) 和时态误差 (temporal error)。

从统计的角度可将 GIS 和 RS 空间数据的误差分为粗差、系统误差和随机误差。根据不同的需要, 这种误差的分类在本研究中分别起着不同的作用。

二、遥感不确定性来源

遥感是一种不通过直接接触目标而获取其信息的一种探测技术。“遥感”一词通常是指获取和处理地球表面的信息, 尤其是自然资源与人文环境方面的信息, 其结果反映在使用飞机或卫星获取的像片或数字影像。遥感影像通常需要进一步处理方可使用, 用于该目的的技术称之为图像处理。图像处理包括各种可以对像片和数字影像进行处理的操作, 包括影像压缩、影像存储、影像增强、空间滤波以及模式识别等。

在用遥感手段获取数据的过程中引入的误差可以分为以下几个部分: ①数据获取误差; ②数据处理误差; ③数据转换误差; ④分类和信息提取 (信息提取误差) 误差; ⑤误差评价产生的不确定性 (史文中, 1998, Lunetta, 1991,

Congalton, 1991)。

(一) 数据获取不确定性

在数据获取过程中有些误差是难以控制的，诸如大气条件和地面景观的自然变化；有些误差可以采取一定方法消除或削弱，如辐射误差和遥感平台不稳定所产生的误差。这些误差将造成遥感图像的几何失真（史文中，1998）。

(二) 数据预处理不确定性

数据预处理误差包括地面控制、几何纠正、影像增强、多源数据融合等方面。

1. 地面控制

在对遥感图像进行纠正时，通常都假定地面控制点为无误差，而这样的假定是不现实的，在做遥感图像产品的误差评价时应考虑这部分误差的影响（Congalton, 1991）。纠正过的遥感数据或图像产品的精度最终不会高于用于纠正的地面控制点的精度。

2. 几何纠正

几何纠正将会产生纠正的残留误差，这些误差将引起遥感图像在位置或属性上的误差。属性误差来源于重采样；位置误差来源于纠正模型的近似性。

3. 影像增强

空间数据处理经常涉及影像变换，这也会产生新的误差。例如滤波技术在滤掉噪声的同时也去掉了一部分有用信息。

4. 多源数据融合

数据融合是在处理多源数据以获取更多信息而服务于决策的过程，运用一定的算法合并多幅影像而形成一幅新的影像。其目的是吸收各种数据源的优点，从中提取更加丰富的信息，也可以称之为“1 + 1 = 3”（徐美，1999）。在数据融合的过程中原始影像含有位置误差和属性误差，可能会传递、叠加到产生的新影像中。关于叠加操作过程的讨论见 Chrisman（1987）；Haining（1993）和 Arbia 和 Haining（1990，1998，2000），Newcomer（1984）等人的讨论。

(三) 数据转换不确定性

在数据转换过程中，不论是从矢量到栅格，还是从栅格到矢量的转换，均有可能产生严重的误差。

(四) 分类和信息提取不确定性

遥感专题信息提取（thematic information extraction）的目的是区别图像中所含的专题目标。分类也是一种专题信息提取的方法，但专题信息提取和一般意

义上的遥感图像分类有所不同，信息提取是先定目标，然后有意识地专门面向对象进行识别，而分类是就图像中已有的像元给予类别的归属与划分，它的方法随着遥感技术的改进及遥感应用的深入也在不断的改进，经历了目视解译、自动分类、光谱特性的信息提取及光谱与空间特征的信息提取等多个阶段（徐美，1999；骆剑承，1999）。分类和信息提取存在以下几种误差，这里所说的误差仅是在分类和信息提取过程中产生的，尚未考虑在上述第（一）、第（二）和第（三）的不确定性中所讨论的不确定性。分类和信息提取的不确定性包括：

- （1）类别定义不明确，例如，某一给定的特征不能完全落入某一定义的类别内，由此而导致不一致性误差；
- （2）分类器的分类误差；
- （3）不同分类器的一致性较差；
- （4）数据输入误差；
- （5）分类影像和参考数据对准的误差；
- （6）分类影像和参考数据时态误差，例如，如果地理参考数据是在城市的发展或者丰收季节之前获取的，而遥感影像获取的土地利用图是在此之后获取的，则分类影像和地理参考数据之间存在时态误差；
- （7）对参考数据的理解和描述误差；
- （8）不同判读人员对影像分类的理解，即人工解译误差。人为造成的误差是主观的，最难以量化。这种误差与对遥感影像的理解能力以及所需的抽象水平有关。

（五）评价产生的不确定性

在对遥感图像产品的误差评价过程中，使用的评价手段和方法的优劣可能造成高估或低估误差精度和可靠性，因而会直接影响遥感图像产品的使用。

第五节 研究和处理不确定性的理论和方法

一、研究和处理不确定性的理论和方法

空间数据不确定性涉及的主要问题包含：①确定一个物体的空间位置 $O(x, y, z)$ ，解决这个问题主要涉及概率统计理论；②确定两空间物体 O_1 和 O_2 的关系 $R(O_1, O_2)$ ，需要讨论两物体 O_1 和 O_2 的空间关系，模糊数学理论的空间拓展有可能是解决该问题的一种途径，所以模糊数学是解决空间关系不确定的一种潜在理论；③决定一个空间物体 O 对一个集合的归属关系 A （物体 O 属于集合 A ），这个问题比较复杂，涉及的理论也比较多，如概率统计、

模糊数学、空间统计理论和证据理论等。我们可以看出，用于处理 GIS 和遥感中不确定性的主要理论有：空间统计学、概率论、模糊数学以及证据理论等（史文中，1998）。

（一）概率论

概率论可用于处理由于随机误差而产生的不确定性。在概率论中，不确定性被描述成在给定某些观测值的条件下某一假设为真的条件概率。该假设的条件概率表示了一个概率从 0 到 1 区间的定量描述。

例如，在遥感分类中， H_i 可以是某一个像素属于类别 i 的假设。 X 为频谱空间中的一个密度矢量。不确定性是由条件概率 $P(H_i|X)$ 表示出来的，它指出在划分某一个像素为某一类别时的概率。条件概率 $P(H_i|X)$ 由 Bayes 公式确定。在一个最大似然分类中，对于所有的 $j \neq i$ ，如果 $P(H_i|X) > P(H_j|X)$ ， $\{P(H_i|X), i = 1, 2, \dots, n\}$ 中的最大值将被选定，即该像素被分为类别 i ，在最大似然分类中，每一像素的所有概率值 $\{P(H_i|X)\}$ 称为概率矢量。该矢量将被用作描述分类遥感影像的属性不确定性。在 Bayes 公式中，假设先验概率 $P(H_i)$ 可以正确地确定，这在许多应用中是难以达到的。该理论可以使用相当复杂的联合概率，但是需要大量的概率观测值。这里我们没有一个概率值质量的描述指标，即本模型不能提供其可靠性的度量指标。

（二）证据数学理论

证据数学理论，又称为 Dempster-Shafer 理论，是对传统概率论的一个扩展（Shafer, 1976）。在证据数学理论中，假设 H_i 是真的概率量测值，由支持某一假设的可获得的证据的概率来代替。证据理论是基于可信度（belief）函数和可能（possibility）函数所确定的一个区间，可信函数度量已有的证据对假设支持的程度。另一方面，可能函数数量测根据已有的证据不能否定假设的程度，而可信函数则表达了证据支持假设的最高程度。

例如，在一个最大似然分类中，某一区域内有五种可能的类别。对于某一像素，有以下概率值 $P(H_1) = 0.4$ ， $P(H_2) = 0.2$ 和 $P(H_3) = 0.1$ ，则没有支持的部分 Θ 是 0.3。

可信函数定义如下：

$$Bel(H_i) = P(H_i) \quad (1-1)$$

可能函数定义如下：

$$Pl(H_i) = 1 - \sum_{j=1}^n P(H_j) = Bel(H_i) + \Theta \quad (1-2)$$

区间 $[Bel(H_i), Pl(H_i)]$ 表示由于证据不完整性而对于假设 H_i 支持的不确定性，是由支持部分 Θ 所造成的。

在 $\Theta = 0$ 的情况下, $Bel(H_i) = Pl(H_i) = P(H_i)$, 此时证据理论等同于概率论, 因此, 证据理论是概率论的一个扩展。

Dempster 的结合规则是证据理论中重要部分。该理论的一个基本策略是把证据集合分解成一系列不相关的证据集合, 在这些证据集合中分别作判断, 最后利用 Dempster 结合规则将这些判断结合起来。

证据理论在专家系统设计中变得越来越重要, 该理论也被应用到 GIS 和遥感领域中。例如, 该理论被应用到专家系统当中, 利用遥感影像更新森林图。Lee 等 (1987) 将这种方法与基于 Bayes 方法的对 MSS 影像分类进行了比较。该理论还被用于在 GIS 中应用多源数据为直升机选择最佳路线。证据数学理论的优点在于其为概率论的更一般性表达, Bayes 的可信函数是 Dempster 可信函数的一个子集; Bayes 的条件规则是 Dempster 结合规则的特例; Bayes 对统计估计的求解可以通过 Dempster 的结合规则实现 (史文中, 1998)。

但是, 证据理论也有其弱点: 该理论不能就矛盾证据或不同假设之间具有微弱的支持问题提出解决办法。该理论尚未取得令人信服的解释。由于证据理论是对概率论的一个扩展, 因此, 以往概率论应用的领域, 本理论也可适用。

(三) 模糊数学

模糊数学是由 Zadeh (1965) 提出的由计算机处理不精确概率的一种理论。模糊集合是由一个具有连续隶属度的集合的误差所组成, 它的特性由隶属度函数确定, 它对每一个物体赋予一个属于相应集合的隶属度值, 其值范围从 0 到 1。

在模糊运算时, 不精确输入集合首先被精确地确定其隶属度值, 模糊运算才可在隶属度函数基础上运算。在模糊数学中的标准运算操作包括余、并、交运算, 其分别定义如下:

$$\mu_{\bar{A}}(0) = 1 - \mu_A(0) \quad (1-3)$$

$$\mu_{A \cup B}(0) = \max[\mu_A(0), \mu_B(0)] \quad (1-4)$$

$$\mu_{A \cap B}(0) = \min[\mu_A(0), \mu_B(0)] \quad (1-5)$$

式中, $\max$ 和 $\min$ 分别是最大和最小操作; $\bar{A}$ 是 A 的补集。基于以上三式的模糊数学理论有时亦称为可能性理论。模糊集合与普通集合在运算上的不同是, 前者是对模糊隶属度运算, 而后者是对集合中的元素运算。

模糊数学理论可用于空间数据的不确定性研究。例如, 利用普通集合理论, 我们难以描述土壤类型的空间扩展、分布, 其中一个困难是难解决描述两种土壤间的渐变区域。应用模糊数学理论, 可以解决该问题。土壤体可以定义为一个具有空间扩展的集合体, 其边界区域可以用隶属度函数定义为一个传递区域, 该隶属函数可用于描述空间内任何一点属于该土壤的程度。

模糊数学的优点在于其处理不确定性的能力, 因此, 该理论用自然语言在

进行有关空间查询方面具有较强的潜在应用。例如查询靠近某一建筑的位置就可以用空间域中的模糊子集来描述。模糊数学的一个缺点是它没有一个像概率论经过证明的过程。模糊数学与概率论的区别在于前者的处理对象是可能性而不是概率,因此,模糊数学用于处理不确定性中的不准确性(inexactness)而非随机性(inrandomness)(史文中,1998)。

(四) 空间统计学

统计学是用有序的模型描述无序时间的一门不确定性理论。空间数据是许多地学科学研究方法之一。Cressie(1991)将空间数据分为三个大类:地理统计数据、栅格数据以及点数据。地理统计数据描述连续空间内的统计过程,用地统计学(Geostatistics)分析;栅格数据描述空间的栅格内的空间过程或称时间序列的空间模拟;点模式描述空间点过程对现实世界进行描述。

Cressie(1991)提出了一个通用模型,该模型是适用于地理统计数据、栅格数据、点模式及物体。

设 $S \in R^n$ 是一个 n 维 Euclid 空间的一个一般数据,一个潜在随机数据 $z(s)$ 在空间位置 s , 现在假设 s 在一个索引集合 $D \in R^n$ 中, 因此而产生多维随机矢量场(或随机过程) $\{z(s): s \in D\}$, 上式的一个实现记为 $\{z(s): s \in D\}$ 。根据 D 的定义不同可以有不同的空间数据。

传统的非空间模型是空间模型的一个特例。空间统计较之非空间统计是一个更一般性的理论, 可以被认为是非空间变量的一个空间扩展, 而时空统计则是更一般的扩展。统计理论的发展是从非空间、空间最后到时空域内。

(五) 现代工程控制论

在工程控制系统中, 系统的组成可由子系统的串联、并联和反馈三种方式组合而成(钱学森, 1958; 王效武, 1998)。而在遥感和 GIS 不确定性处理中, 往往要处理一个问题的几个不同阶段所带来的不确定性来源。比如遥感像元的不确定性来源是由遥感数据获取、预处理、图像处理/信息提取等几个处理阶段带来的。这些过程从整体来看是一个线性串联处理系统。由于这里每一个过程输出是下一个过程的输入, 因此我们可以写出每一个过程的显式或隐式传递函数。利用工程控制论的思想优点在于可以将复杂的问题简单化, 并逐个解决。

(六) 不确定性处理的方法

目前, 关于误差和不确定性研究的主要方法有两类: 数据分析和机理分析。数据分析的主要原理是假设或经验求解最终误差的分布函数形式, 然后用一定的识别函数根据一些已知点(监督点)值外推未知点值, 并将其识别函数