



# 三维虚拟地球 技术与实践

陈 静 龚健雅 周梦云 著  
吴 思 李佳伟 曾方敏



科学出版社

# 三维虚拟地球技术与实践

陈 静 龚健雅 周梦云 著  
吴 思 李佳伟 曾方敏

科学出版社

北 京

## 版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229,010-64034315,13501151303

### 内 容 简 介

三维虚拟地球技术是地理信息系统与计算机科学领域广受关注的重要研究课题,并已广泛应用于地理信息服务平台、智慧城市和面向大众的地理信息服务等方面。本书较为系统地阐述三维虚拟地球技术的相关理论基础、关键技术、软件平台及应用。全书共6章,主要内容包括面向极地的全球离散网格模型、多源信息组织与可视化方法、面向三维虚拟地球的分析方法、三维虚拟地球软件平台以及三维虚拟地球技术的应用与实践。

本书可作为地理信息系统相关专业高年级本科生、研究生、高校教师及研究人员的参考用书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

三维虚拟地球技术与实践/陈静等著. —北京:科学出版社,2017.11  
ISBN 978-7-03-054936-5

I. ①三… II. ①陈… III. ①三维-数字地球 IV. ①P208

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第260453号

责任编辑:杨光华 / 责任校对:孙寓明

责任印制:彭超 / 封面设计:苏波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

开本:787×1092 1/16

2017年11月第 一 版 印张:11 1/4

2017年11月第一次印刷 字数:264 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前言

自从1998年美国前副总统戈尔提出“数字地球”(digital earth)概念以来,“数字地球”的研究一直是地理信息技术研究的热点和前沿之一,“数字地球”是通过覆盖全球的对地观测技术获取全球多尺度、多时相和多种类的空间信息,同时建立全球三维模型,对这些海量异构空间信息进行高效的组织、管理、可视化和应用,为处理整个地球的自然和社会活动诸方面的问题提供支撑。“数字地球”集成计算机技术、地理信息技术和网络技术,实现“虚拟地球”的三维可视化和各种集成应用。

目前,三维虚拟地球技术发展主要经历了全球离散网格理论方法研究,全球多源多尺度海量空间数据无缝组织、管理和可视化方法研究,基于虚拟地球的多源异构空间信息集成应用等阶段。

在全球离散网格理论方法方面,相关研究很多也很深入,但是研究的侧重点不一致,有的侧重于对地球三维模型的精确剖分表达,有的侧重于对全球网格的快速索引与位置编码。全球离散格网的全球空间多尺度、多层次划分特点,可以构建全球的空间范围索引,从而为快速有效地组织、管理和表达全球多尺度海量空间数据奠定基础。在这方面,本书的研究重点主要还是从构建全球空间索引出发,为管理全球范围的多尺度海量空间数据服务。主要针对在实践中需要解决高纬度地区格网形状变形严重和面积急剧减少,在应用现有地理数据时造成精度损失等问题,在已有研究基础上,研究面向极地、高纬度地区的全球离散网格模型。

全球多源、多尺度海量空间数据无缝组织、管理和可视化方法研究,为了应对网络环境下海量空间数据索引和传输,依托全球离散网格分块索引方法,对全球海量影像、地形等栅格空间数据进行了很好的组织、管理与可视化,并且产生了一个独特的数据格式——瓦片数据格式。然而,这种瓦片数据格式并不适合矢量空间数据、三维模型数据和三维场等空天信息数据特点,导致三维虚拟地球中难以直接高效集成上述空间数据并进行分析应用。

基于虚拟地球的多源异构空间信息集成应用方面,三维虚拟地球不仅可以为相关研究提供集成管理和快速显示全球海量多源异构、多时相多维空间信息服务平台,同时也可与面向大众化的信息集成,提供三维移动空间信息在线服务。

基于这样的认识,本书在简要阐述三维虚拟地球技术的发展及其应用的基础上,重点阐述作者及其研究团队近年来在三维虚拟地球技术方面的研究成果,主要包括面向极地的全球离散网格模型、三维虚拟地球中移动对象、三维模型数据、矢量数据和三维气象场等空天信息的组织、管理和可视化方法。在此基础上,阐述面向桌面和移动终端的三维虚拟地球平台及其在电力和海洋等方面的应用。

全书共 6 章。各章具体分工如下:第 1 章由陈静、龚健雅和周梦云撰写,第 2 章由周梦云、陈静和龚健雅撰写,第 3 章由陈静、袁思佳、吴思、谢秉雄、邹成和刘婷婷撰写,第 4 章由陈静和曾方敏撰写,第 5 章由陈静和龚健雅撰写,第 6 章由陈静、龚健雅、吴思、李佳伟和黄吴蒙撰写。在写作过程中,研究生程若桢、杨琪晨和陈凯帮助整理资料、绘图和校正书稿,在此表示感谢。

本书在研究和出版过程中得到国家重点研发计划“全球一致的室内外无缝剖分位置编码与 IPv6 映射”(项目号:2017YFB0503703),国家自然科学基金青年科学基金项目“网络环境下三维城市模型数据的多尺度传输与可视化”(项目号:40801163)和国家自然科学基金面上项目“全球多尺度三维矢量数据模型及其空间分析方法研究”(项目号:41171314)的联合资助,在此表示感谢!

此外,三维虚拟地球技术的研究、平台开发与应用过程中还得到武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室向隆刚教授、熊汉江教授和王艳东教授等各位同仁的大力支持和帮助,得到武大吉奥信息技术有限公司、国家测绘地理信息局黑龙江基础地理信息中心和北京洛斯塔科技发展有限公司在软件平台研发、黑龙江省地理信息公共服务平台研发以及电力行业应用中的大力支持,在此表示感谢!

由于三维虚拟地球相关理论、方法和技术还在不断发展和更新中,本书难免存在不妥之处,恳请读者批评指正!

作 者

2017 年于武汉大学珞珈山

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                  | 1  |
| 1.1 引言                    | 1  |
| 1.2 研究与应用进展               | 1  |
| 1.2.1 全球离散格网              | 2  |
| 1.2.2 多源空间数据组织、管理与分析      | 4  |
| 1.2.3 基于虚拟地球的多源异构空间信息集成应用 | 5  |
| 1.2.4 三维虚拟地球软件平台及应用       | 6  |
| 1.3 本书内容组织                | 6  |
| 1.4 本章小结                  | 7  |
| 参考文献                      | 7  |
| 第 2 章 面向极地的全球离散格网         | 10 |
| 2.1 引言                    | 10 |
| 2.2 球面剖分方法                | 10 |
| 2.2.1 第一个分界纬线圈的确定         | 10 |
| 2.2.2 球面细分规则              | 12 |
| 2.3 编码解码机制                | 13 |
| 2.3.1 编码机制                | 14 |
| 2.3.2 解码机制                | 15 |
| 2.4 格网间的关系                | 15 |
| 2.4.1 父子关系                | 15 |
| 2.4.2 邻接关系                | 17 |
| 2.5 格网性能测试                | 19 |
| 2.5.1 格网几何变形分析            | 19 |
| 2.5.2 编码解码效率              | 23 |
| 2.5.3 邻近检索效率              | 23 |
| 2.5.4 影像数据组织水平分析          | 23 |
| 2.6 数据集可视化                | 28 |
| 2.7 本章小结                  | 29 |
| 参考文献                      | 30 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 3 章 多源信息组织与可视化关键技术 .....      | 31 |
| 3.1 引言 .....                    | 31 |
| 3.2 移动对象的时空数据组织方法 .....         | 31 |
| 3.2.1 虚拟地球中移动对象的时空数据组织方法 .....  | 32 |
| 3.2.2 基于 HR 树扩展的时空索引方法 .....    | 33 |
| 3.2.3 实验 .....                  | 35 |
| 3.2.4 小结 .....                  | 38 |
| 3.3 基于 GPU 的三维模型可视化方法 .....     | 38 |
| 3.3.1 面向 GPU 绘制的三维模型数据结构 .....  | 38 |
| 3.3.2 三维模型纹理烘焙方法 .....          | 39 |
| 3.3.3 三维模型多尺度可视化方法 .....        | 41 |
| 3.3.4 实验 .....                  | 42 |
| 3.3.5 小结 .....                  | 44 |
| 3.4 矢量数据压缩与可视化方法 .....          | 44 |
| 3.4.1 面向虚拟地球的矢量数据结构 .....       | 45 |
| 3.4.2 多尺度矢量数据的分块构建与数据组织方法 ..... | 46 |
| 3.4.3 面向可视化的矢量数据压缩方法 .....      | 48 |
| 3.4.4 实验与分析 .....               | 49 |
| 3.4.5 小结 .....                  | 52 |
| 3.5 面向虚拟地球的三维气象场可视化方法 .....     | 52 |
| 3.5.1 基于体元对象的数据模型 .....         | 53 |
| 3.5.2 面向三维场的多尺度动态可视化方法 .....    | 55 |
| 3.5.3 实验 .....                  | 58 |
| 3.5.4 小结 .....                  | 60 |
| 参考文献 .....                      | 60 |
| 第 4 章 面向虚拟地球的分析方法 .....         | 63 |
| 4.1 引言 .....                    | 63 |
| 4.2 三维虚拟地球中通视分析 .....           | 63 |
| 4.2.1 通视分析方法概述 .....            | 64 |
| 4.2.2 球面基准下多尺度的通视分析方法 .....     | 66 |
| 4.2.3 虚拟地球中实时通视分析 .....         | 70 |
| 4.2.4 实验与讨论 .....               | 73 |
| 4.3 三维虚拟地球中有源洪水淹没分析算法 .....     | 74 |
| 4.3.1 全球地形数据组织方法 .....          | 75 |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 4.3.2 大范围有源洪水淹没分析算法 .....            | 76         |
| 4.3.3 实验 .....                       | 79         |
| 4.3.4 小结 .....                       | 80         |
| 参考文献 .....                           | 80         |
| <b>第5章 三维虚拟地球软件平台 .....</b>          | <b>82</b>  |
| 5.1 引言 .....                         | 82         |
| 5.2 面向桌面版的三维虚拟地球软件平台 .....           | 82         |
| 5.2.1 规范化处理子系统 .....                 | 82         |
| 5.2.2 建库与管理子系统 .....                 | 84         |
| 5.2.3 分布式服务子系统 .....                 | 84         |
| 5.2.4 球面三维可视化子系统 .....               | 84         |
| 5.2.5 空间信息服务注册中心 .....               | 85         |
| 5.2.6 桌面版三维虚拟地球软件平台效果图 .....         | 85         |
| 5.3 面向移动终端的三维虚拟地球平台 .....            | 88         |
| 5.3.1 面向移动终端的三维虚拟地球人机交互技术 .....      | 91         |
| 5.3.2 面向移动终端的三维虚拟地球软件平台设计 .....      | 97         |
| 5.3.3 面向移动终端的三维虚拟地球软件平台 .....        | 102        |
| 5.4 本章小结 .....                       | 123        |
| 参考文献 .....                           | 123        |
| <b>第6章 三维虚拟地球技术的应用与实践 .....</b>      | <b>124</b> |
| 6.1 引言 .....                         | 124        |
| 6.2 基于虚拟地球的多源空间信息集成共享方法 .....        | 124        |
| 6.2.1 网络地理信息集成共享服务系统架构 .....         | 124        |
| 6.2.2 异构三维虚拟地球数据集成方法 .....           | 126        |
| 6.2.3 多级节点服务聚合的地理信息集成共享方法 .....      | 131        |
| 6.2.4 网络地理信息集成共享服务应用实例:“天地图” .....   | 136        |
| 6.2.5 小结 .....                       | 139        |
| 6.3 移动三维虚拟地球平台在电力行业应用 .....          | 139        |
| 6.3.1 电力线路模型的数据组织 .....              | 139        |
| 6.3.2 电力设备渲染相关算法 .....               | 141        |
| 6.3.3 带弧垂导线内插算法 .....                | 144        |
| 6.3.4 电力线三维模型可视化技术 .....             | 145        |
| 6.3.5 Android 平台的电力三维 GIS 实验系统 ..... | 147        |
| 6.4 面向虚拟地球的海面动态可视化优化方法 .....         | 159        |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 6.4.1 面向 GPU 的全球多尺度海面网格模型 ..... | 160 |
| 6.4.2 风场驱动下的海浪动态绘制方法 .....      | 162 |
| 6.4.3 基于 GPU 的海面格网缝隙修补方法 .....  | 164 |
| 6.4.4 实验 .....                  | 166 |
| 6.5 本章小结 .....                  | 169 |
| 参考文献 .....                      | 170 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

数字地球(digital earth)是美国前副总统戈尔于1998年1月在加利福尼亚科学中心开幕典礼上发表的题为“数字地球:认识21世纪我们所居住的星球”演说时,提出的一个与地理信息系统(GIS)、网络、虚拟现实等高新技术密切相关的概念。戈尔在演说中将数字地球看成是“对地球的三维多分辨率表示,它能够放入大量的地理数据”,并且应该支持查询、浏览和分析海量的地理信息,即“虚拟地球”。

随着对地观测技术、计算机网络技术和地理信息技术的发展,快速获取的全球多尺度、高分辨率遥感影像,为“虚拟地球”的构建提供了丰富的多尺度、多时相影像及地形和矢量数据等空间数据资源。在此基础上,采用全球分布的大量服务器系统和高效的空间数据传输与三维实时可视化技术,构建网络环境下三维虚拟地球系统,从而使任何人在任何时候都可以快速浏览和查询到全球任何地方的多尺度地理空间信息,已成为当代地理信息技术的重要标志(Craglia et al.,2012;Bailey et al.,2011)。

最典型的三维虚拟地球系统是谷歌公司2005年推出的谷歌地球(Google Earth),它对全球多源、多尺度的卫星遥感影像、地形数据和矢量数据以及城市三维模型等基础数据进行有效地集成、组织、管理,构建网络环境下三维虚拟地球系统。同时将谷歌自身快速、高效的搜索引擎技术应用于谷歌地球中,可以满足网络环境下的数据搜索查询、定位以及空间分析等功能(Sheppard et al.,2009)。随后微软公司也推出类似的三维虚拟地球平台Virtual Earth,支持网络地图服务(web map service,WMS),运用微软的Live Local服务,能够搜索出全球任意区域内的地图影像,并且可以将部分区域内的地图影像以三维画面的形式显示出来(Wang et al.,2009)。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)也推出一个三维虚拟地球平台World Wind,主要展现来自美国航空航天局、美国地质调查局(United States Geological Survey,USGS),以及基于WMS服务的影像数据,可以提供三维虚拟地球浏览、查看地名与行政区划(Bell et al.,2007)等服务。World Wind具有开放性的架构,可以方便地进行功能扩展。

## 1.2 研究与应用进展

三维虚拟地球技术的研究与应用主要涉及以下四个方面内容:①全球离散格网模型,用于建立全球多尺度空间网格索引;②全球多源、多尺度海量空间数据无缝组织、管理和可视化方法,用于存储、组织和管理全球多源、多尺度空间数据;③基于虚拟地球的多源异

构空间信息集成应用;④三维虚拟地球软件平台及应用。

### 1.2.1 全球离散格网

全球离散格网(discrete global grids, DGGs)的研究主要分为经纬度格网、正多面体格网和自适应格网三类。由于自适应格网的划分是以球面上实体要素为基础,难以实现多层次的递归剖分,且数据存储和操作复杂,很难进行全球多尺度海量数组的组织和其他操作,故本书主要讨论正多面体格网和经纬度格网。

近年来,基于正多面体格网的 DGGs 研究较多。例如,Fekete 等(1990)提出的球面四元三角剖分(spherical quaternary triangle, SQT)模型,Dutton(1997)提出的四元三角网(quaternary triangular mesh, QTM)模型,Bai 等(2011)提出的基于 QTM 的 WGS 84 椭球面层次剖分,White(2000)提出的菱形格网模型和 Tong 等(2010)、Sahr(2008)、Vince(2006)、Sahr 等(1998)、White 等(1992)研究的六边形格网模型。上述正多面体格网模型具有层次性、近似规则、相似大小与形状、全球可寻址、与数据无关等优点(Dutton, 1997; White et al., 1992),然而,由于从正多面体到球体的映射关系计算比较复杂,格网边界与经纬线不一致,造成了这种格网研究难以利用现有各种坐标系统的各种数据,除非经过大量转换,但代价高昂且存在精度损失,很难适应全球海量空间数据组织和更新的发展趋势。

基于经纬度格网的 DGGs 研究中,等经纬度格网与地理坐标系间具有明确关系,可以简单地存储和处理数据(Gregory et al., 2008),因而得到广泛使用,如 Albergel 等(2010)、Lindstrom 等(2001)、Samet 等(1992)、Fekete 等(1990)和美国地质调查局提供的 GTOPO30 数据。但如图 1.1 所示,等经纬度格网的面积由赤道向两极逐渐减少,形状也由四边形变为三角形。同一层次的格网面积和边长甚至不在同一个量级上。严重的格网变形容易在组织空间数据的过程中产生大量的数据冗余,并且影响多分辨率空间数据操作的效率和准确性(Sahr et al., 2003)。南北极点投影到经纬度平面上成为直线,第一行和最后一行格网实际为三角形,而不是投影面上的四边形,即存在极点奇异性。例如, GTOPO30 数据文件中极点的高程值被重复存储 43 200 次。

针对上述等经纬度离散格网的缺陷,为了使同一层次的经纬度格网单元的面积近似相等,一些学者和应用部门尝试改进全球等经纬度格网模型,研究变间隔的经纬度格网模型,如图 1.2 所示。变经纬度格网主要分为三类:①等纬差变经差格网,基本原理是在纬度间隔不变的情况下,格网经度间隔从赤道到两极逐渐增大。例如,美国国家影像制图局(National Imagery and Mapping Agency, NIMA)(2005)提供的数字地形高程数据(digital terrain elevation data, DTED),DTED 的格网面积比等经纬度格网更加均匀,但其格网邻接关系较为复杂(图 1.2(a));Ma 等(2009)提出的基于纬线平面投影的正方形离散全球格网,其绝大多数格网面积和形状一致,但在两极区域和汇聚处格网存在裂缝。②变纬差等经差格网,基本原理是在经度间隔不变的情况下,格网纬度间隔从赤道到两极逐渐增大。例如,Ottoson 等(2002)提出的椭球四叉树(ellipsoidal quadrees, EQT),

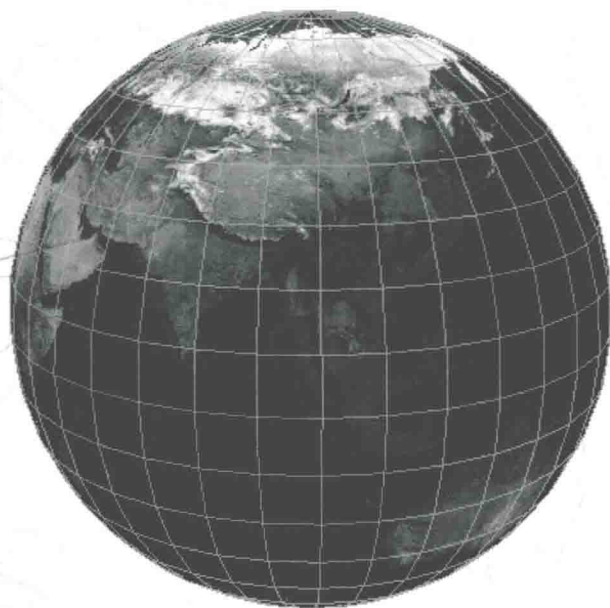


图 1.1 等经纬度格网

EQT 考虑了地球的实际形状,采用 WGS-84 椭球作为剖分的数学基础,它虽然保证了瓦片面积的近似相等,但瓦片形状变化仍然很大(图 1.2(b))。③变纬差变经差格网,其基本原理是格网的经纬度间隔同时发生变化。例如,挪威学者 Bjørke 等(2004,2003)提出的等面积单元的变经纬度格网模型(Forsvarets Forskningsinstitut, FFI),由赤道到两极,其纬度间隔逐渐减小,经度间隔逐渐增大(图 1.2(c));Beckers 等(2012)也基于“相等的面积和相似的形状”两条规则,采用方位投影建立了半球的变经差变纬差格网;其格网经纬度发生变化的规则较为复杂,不利于分析计算。

与全球等经纬度格网模型相比,上述变经纬度格网模型方法中格网面积虽然更加一致,但这种优化是以更不规则的格网形状和更加复杂的格网邻接性为代价的(Sahr et al., 2003),且其格网不具有层次性和嵌套性,没有设计相应的格网编码,难以进行连续的全球多分辨率数据组织与表达建模。针对这个问题,Sun 等(2008)、崔马军等(2007)提出了球面退化四叉树格网(degenerate quadtree grid, DQG)的剖分方法。如图 1.3 所示,其原理是选取球内接正八面体作为球面格网划分的基础,纬度间隔固定而经度间隔从赤道到两极规则增大,相邻行的经度间隔或相等或为两倍关系。DQG 格网结构简单、几何变形稳定,改进了已有的变经纬度格网不具有层次性和嵌套性、难以进行连续的多分辨率数据操作的问题,大大提高了邻近搜索的效率。然而,DQG 虽然在一定程度上解决了等经纬度格网在高纬度地区格网面积、形状变化过大的缺陷,但在极地地区格网形状由矩形退化为三角形,仍存在极点奇异性及格网形状不一致的问题,不利于极地范围多尺度空间数据组织。

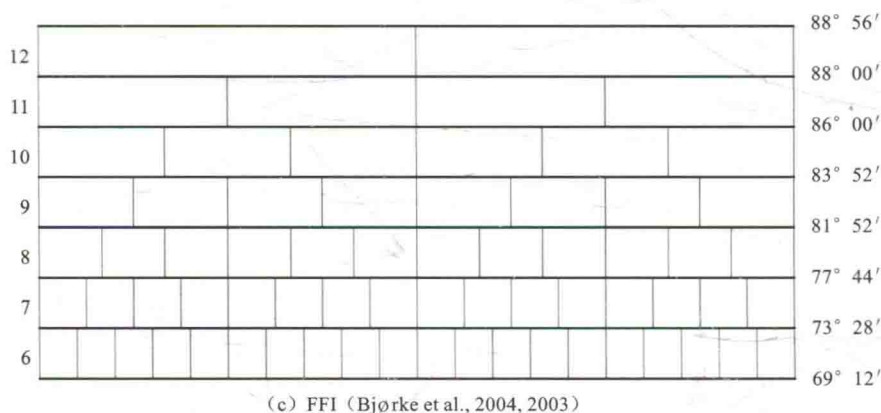
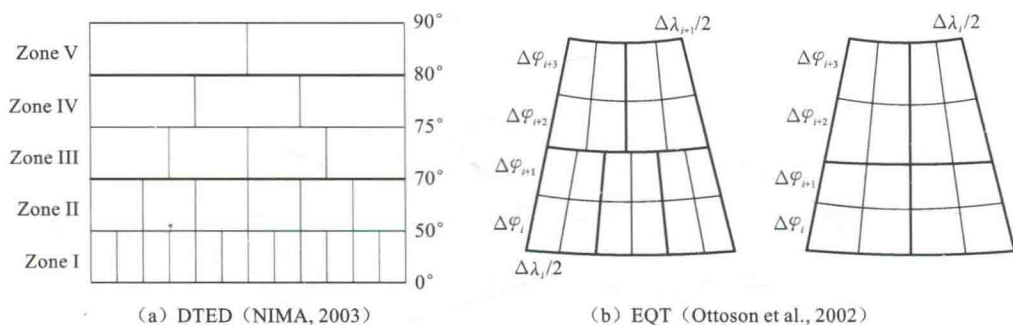


图 1.2 变经纬度格网

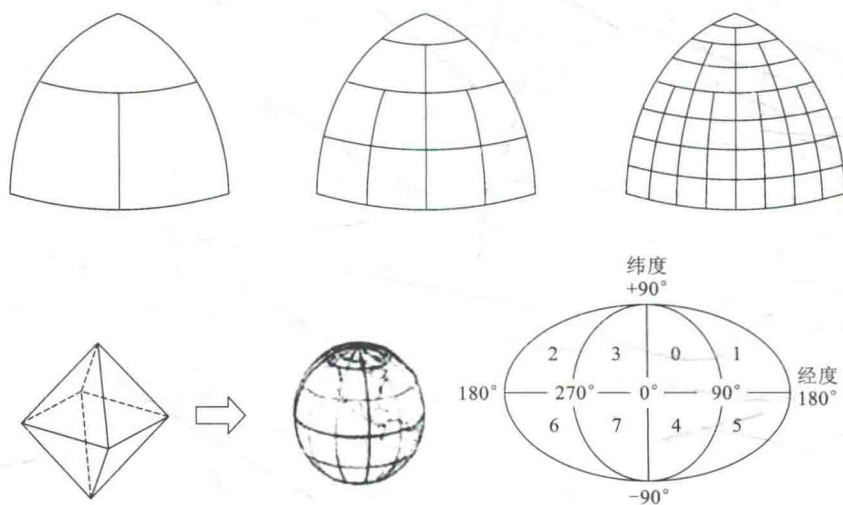


图 1.3 球面退化四叉树

### 1.2.2 多源空间数据组织、管理与分析

全球海量空间数据的获取技术为建立“数字地球”提供了数据基础,而如何组织和管

理这些多分辨率、多尺度、多时空和多种类的全球海量空间数据,从而实现海量空间数据的高效调度与协同服务是网络三维虚拟数字地球中的关键技术之一。全球范围的海量空间数据无缝组织是指同时无缝地储存、管理、处理、表达和传输全球范围的多源、多尺度的海量空间数据,其核心是建立多尺度空间数据库进行多源空间数据集成,其目的是具备空间数据的多尺度可视化和集成多源空间数据的能力。

针对全球范围、分布式环境下海量异构虚拟地球数据组织与管理的挑战,龚健雅等(2010)创立了全球无缝多级格网递归剖分与异构虚拟地球协同服务理论,建立了时空一体的多源多尺度异构全球数据模型,在此基础上提出了全球一体化金字塔空间数据组织方法和可扩展的四叉树层次空间索引方法,从而实现了全球、大规模、多时相空间数据的高效无缝组织。此外,还有学者将城市规划信息在虚拟地球上进行发布,利用 Web Services 和面向服务架构(service-oriented architecture, SOA)进行模型的共享和交互(Wu et al., 2010)。有学者提出了面向虚拟地球的框架,基于八叉树的多尺度数据结构进行多时间序列的三维空间数据组织与管理(Li et al., 2011)。

### 1.2.3 基于虚拟地球的多源异构空间信息集成应用

三维虚拟地球通过在线网络体系结构可以进行多源异构空间信息集成应用,并且与地理信息服务的日益紧密切集成,实现全球空间信息的共享和智能服务,空间信息与非空间信息的关联服务(李德仁, 2010)。此外,三维虚拟地球还可以为相关研究提供集成管理和快速显示全球海量多源、多分辨率、多时相多维空间信息服务平台,同时也可与面向大众化的信息集成,提供三维移动空间信息在线服务。

Google Map 服务已经被人们所熟悉,Google Map 主要使用 Keyhole 公司提供的卫星数据,世界上诸多城市的影像都可以达到 1 m 之内的精度。卫星影像使用等角正切圆柱方式的墨卡托投影获得,得到的影像预先仿照金字塔模式按不同精度分层存储,Google Map 总计提供了 0~17 共 18 级的缩放等级,所有的卫星图都被切分成 256 像素×256 像素大小的影像块,按照四叉树方式对每块编码索引,然后根据用户请求的坐标位置和精度在浏览器端把影像块拼接形成大的卫星图(孙剑, 2007)。

Virtual Earth 是微软公司的核心地图服务器的名称,目前也是微软的 Local Live 的后台服务器,它提供了大量的商业影像和大尺度的矢量数据,可以为全球的互联网用户提供空间位置服务,另外它还提供了免费的地图开发应用接口,开发人员可以通过该接口将该网站的地图内容结合自己的业务数据展示给用户。Local Live 门户采用了与 Google Map 类似的技术,包括后台的数据组织模式(孙剑, 2007)。

针对全国地理信息公共服务平台建设的要求,龚健雅等(2010)在已有基础地理信息软件平台研发基础上,重点突破了全球多源信息高效组织与异构虚拟地球数据共享,分布式环境下数据的统一索引与协同调度,海量空间数据的高效传输与实时可视化以及空间与非空间信息集成和软件共享与互操作等关键技术,为构建具有中国特色的国家地理信息公共服务平台(公众版)“天地图”奠定技术基础。

### 1.2.4 三维虚拟地球软件平台及应用

近年来,国内外已出现了各种商用或开源的虚拟地球平台,国外较为成熟的三维虚拟地球包括谷歌公司的 Google Earth,美国国家航空航天局(NASA)的 World Wind, Skyline 公司的 Skyline Globe,美国微软公司的 Virtual Earth, ESRI 公司的 ArcGIS Explorer,开源的全球地形渲染引擎二次开发包 osgEarth 等;而国内比较成熟的虚拟地球平台则包括武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室与武大吉奥信息技术有限公司联合开发的 GeoGlobe,北京国遥新天地信息技术有限公司的 EV-Globe。

其中,Google Earth 是公众服务最全面、用户数目最多的虚拟地球产品,除了星空、街景、海洋等新颖的功能模块,还增加了时间轴,便于查看世界各地的历史卫星照片,更加形象直观地了解该地的历史变迁(Chen et al.,2008;Burke,2008)。World Wind 是全球最强大的开源地理科普软件,完全开放资源,并依托于美国国家航空航天局从而拥有强大的卫星数据更新能力(Boschetti et al.,2008;Bell et al.,2007)。Skyline 允许用户根据自己的需求定制企业级的三维地理信息解决方案,并提供 Oracle、ArcSDE 等多种数据库的接口支持(Wei et al.,2008)。Virtual Earth 实现了无须下载而在浏览器中直接运行的功能。ArcGIS Explorer 作为 ArcGIS 系列的衍生产品,完整地继承了 ArcGIS Server 的 GIS 性能,是对 ArcGIS 家族的一个重要的补充。

开放式虚拟地球集成共享平台 GeoGlobe 基于地理信息服务规范和标准,实现了专业地理信息系统与虚拟地球数据的集成与共享(Gong et al.,2010)。EV-Globe 除了能够实现多分辨率的海量影像高速浏览以外,还集成了主流的 GIS 软件 SuperMap 和 ArcInfo,实现了矢量/栅格数据的二三维一体化管理,支持矢量的快速显示。目前三维虚拟地球软件平台通常允许用户通过互联网搜索、标注、分享与位置相关的信息,构建以虚拟地球为基础的社交网络,顺应了网络发展中开放和分享的新方向。

在开源的虚拟地球软件方面,osgEarth 地形渲染引擎由于继承了跨平台的三维开源场景图形系统 OSG 中包括场景组织与管理、场景数据优化、数据动态更新等关键技术(Zhu et al.,2013),提供了几乎所有主流空间数据格式的数据接口,并封装了众多提升程序运行性能的算法,因而具有良好的兼容性和可扩展性。

## 1.3 本书内容组织

本书主要阐述三维虚拟地球的相关技术、软件平台和应用,主要包括:①三维虚拟地球的空间索引全球离散网格模型;②三维虚拟地球中移动对象、三维模型、矢量数据和三维场数据的组织、管理和可视化技术;③面向虚拟地球的空间分析方法;④三维虚拟地球软件平台;⑤三维虚拟地球的应用。全书共 6 章,各章主要内容如下。

第 1 章为绪论。主要介绍三维虚拟地球技术的研究背景、研究进展和相关领域的应用分析。

第 2 章介绍面向极地的全球离散格网。为了建立一种可以兼顾极地和中低纬度地区

的全球离散格网以支持全球海量空间数据的多尺度建模、索引和三维可视化,提出一种面向极地剖分的全球离散网格模型——四元四边网络模型,它是一种格网面积和形状近似相等的球面剖分方法,并讨论该全球离散格网的编码与解码算法、层次检索算法和邻近检索算法。

第3章介绍多源信息组织与可视化关键技术。三维虚拟地球作为一个全球多源信息集成管理的平台,涉及组织、管理和可视化全球多源多尺度信息。主要阐述三维虚拟地球平台中移动对象、三维模型、矢量数据和气象场等多源信息组织与可视化关键技术。

第4章讨论面向虚拟地球的分析方法。主要针对面向虚拟地球的分析方法进行讨论,选择通视分析和有源洪水淹没分析两个典型的应用进行讨论。

第5章介绍三维虚拟地球软件平台。主要讨论自主研发三维虚拟地球软件平台,包括桌面版和面向移动终端的三维虚拟地球软件平台的研发。

第6章讨论三维虚拟地球技术的应用与实践。主要在阐述基于虚拟地球的多源空间信息集成共享方法基础上,介绍面向大众应用的“天地图”。在阐述电力线模型的数据组织与调度基础上,介绍面向移动终端的三维虚拟地球软件平台在电力行业的应用。在阐述面向 GPU 的海浪动态绘制方法基础上,介绍面向虚拟地球技术的海洋应用。

## 1.4 本章小结

本章首先介绍了三维虚拟地球的概念,并从全球离散网格模型,多尺度数据组织、管理和分析方法,基于虚拟地球的多源异构空间信息集成应用,以及国内外三维虚拟地球软件平台及应用四个方面介绍了三维虚拟地球技术的研究与应用进展。

## 参考文献

- 陈静,向隆刚,龚健雅,2013. 基于虚拟地球的网络地理信息集成共享服务方法. 中国科学(地球科学)(11):1770-1784.
- 崔马军,赵学胜,2007. 球面退化四叉树格网的剖分及变形分析. 地理与地理信息科学(6):23-25.
- 龚健雅,陈静,向隆刚,等,2010. 开放式虚拟地球集成共享平台 GeoGlobe. 测绘学报(6):551-553.
- 李德仁,2010. 论地球空间信息的3维可视化:基于图形还是基于影像. 测绘学报(2):111-114.
- 孙剑,2007. 基于虚拟地球技术的空间信息集成. 青岛:山东科技大学.
- 吴立新,余接情,2012. 地球系统空间格网及其应用模式. 地理与地理信息科学(1):7-13.
- 余接情,吴立新,2009. 球体退化八叉树网格编码与解码研究. 地理与地理信息科学(1):5-9,31.
- ALBERGEL C,CALVET J C,DE ROSNAY P,et al.,2010. Cross-evaluation of modelled and remotely sensed surface soil moisture with in situ data in southwestern France. Hydrology and Earth System Sciences,14(11):2177-2191.
- BAI J,SUN W,ZHAO X,2011. Character analysis and hierarchical partition of WGS-84 ellipsoidal facet based on QTM. Cehui Xuebao/Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,40(2):243-248.
- BAILEY J E,CHEN A J,2011. The role of virtual globes in geoscience. Comput Geosci,37:1-2.

- BECKERS B, BECKERS P, 2012. A general rule for disk and hemisphere partition into equal-area cells. *Computational Geometry-Theory and Applications*, 45(7):275-283.
- BELL D G, KUEHNEL F, MAXWELL C, et al., 2007. NASA World Wind: Opensource GIS for Mission Operations//2007 IEEE Aerospace Conference, 3-10 March.
- BJØRKE J T, GRYTTE J K, Hæger M, et al., 2003. A Global Grid Model based on Constant Area Quadrilaterals. *ScanGIS'2003: Proceedings of the 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science*. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology; 239-247.
- BJØRKE J T, NILSEN S, 2004. Examination of a constant-area quadrilateral grid in representation of global digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(7):653-664.
- BOSCHETTI L, ROY D P, JUSTICE C O, 2008. Using NASA's World Wind virtual globe for interactive internet visualization of the global MODIS burned area product. *International Journal of Remote Sensing*, 29(11):3067-3072.
- BURKE J, 2008. Geospatial Visualization of Atmospheric Chemistry Satellite Data Using Google Earth. *Remote Sensing System Engineering*, August 11, 2008-August 13, 2008. The International Society for Optical Engineering (SPIE).
- CHEN A, LEPTOUKH G, KEMPLER S, et al., 2008. Visualization of NASA Earth Science Data in google earth. *Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: Geo-Simulation and Virtual GIS Environments*.
- CRAGLIA M, BIE K, JACKSON D, et al., 2012. Digital Earth 2020: towards the vision for the next decade. *Int. J. Digit Earth*, 5:4-21.
- DUTTON G, 1997. Encoding and handling geospatial data with hierarchical triangular meshes. *Proceeding of 7<sup>th</sup> International Symposium on spatial data handling*. Netherlands: Taylor and Francis.
- FEKETE G, TREINISH L A, 1990. Sphere Quadrees; a New Data Structure to Support the Visualization of Spherically Distributed Data. *SPIE Conference on Extracting Meaning from Complex Data: Processing, Display, Interaction*, Feb 14-16 1990 Santa Barbara, California, USA, 242-253.
- GONG J, CHEN J, XIANG L, et al., 2010. GeoGlobe: Geo-spatial information sharing platform as open virtual earth. *Cehui Xuebao/Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 39(6):551-553.
- GOODCHILD M F, 2000. Discrete Global Grids for Digital Earth//*International Conference on Discrete Global Grids*. California: Santa Barbara.
- GREGORY M J, KIMERLING A J, WHITE D, et al., 2008. A comparison of intercell metrics on discrete global grid systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32:188-203.
- MATTHEW J G, KIMERLING A J, DENIS W, et al., 2008. A comparison of intercell metrics on discrete global grid systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(3):188-203.
- LI J, WU H Y, YANG C W, et al., 2011. Visualizing dynamic geosciences phenomena using an octree-based view-dependent LOD strategy within virtual globes. *Computers & Geosciences*, 37(9):1295-1302.
- LINDSTROM P, PASCUCCI V, 2001. Visualization of Large Terrains Made Easy. *Proceedings of the IEEE Visualization Conference*. Computer Society; 363-370.
- MA T, ZHOU C H, XIE Y C, et al., 2009. A discrete square global grid system based on the parallel plane projection. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(10):1297-1313.