

GRACE 模式确定重力场的关键技术探讨

宁津生^{1,2} 罗佳¹ 汪海洪¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要:美德合作的 GRACE 计划可以利用卫星跟踪卫星技术(SST)获取有关地球重力场、大气和海洋等方面有史以来最为全面的信息。它们为广泛开展相关领域的科学研究提供了前所未有的丰富资料。其中, GRACE 提供的稳态的和时变的地球重力场数据可以反映地球内部构造、地表水体运动等地球物理信息, 是 GRACE 目标的最重要的方面。本文深入探讨了 GRACE 卫星有效载荷对于研究地球重力场的贡献, 并给出相应结论。

关键词: GRACE 计划; 地球重力场; 有效载荷
中图法分类号: P223.0

确定地球重力场的精细结构及其时间相依变化不仅是现代大地测量的主要科学目标之一, 也将为现代地球科学解决人类面临的资源、环境和灾害等紧迫课题提供主要的基础地理空间信息。目前, 最先进的地球重力场模型只能以优于亚 dm 级的精度满足中低轨卫星定轨的要求。利用卫星测高测定的海面高研究海面地形和海流要求有相应波长的 cm 级海洋大地水准面, 同样, 建立全球高程基准要求在 50~100km 的波长范围内具有优于 5cm 精度的全球大地水准面, 而目前全球大地水准面的精细度同上述要求大约相差一个数量级。实现这一目标首先取决于在全球范围内测定重力和探测重力场信息的技术发展水平。传统重力测定技术对获取全球均匀分布的高精度重力场信息的能力受到极大的限制, 甚至在有些地区, 可以说是完全无能为力, 这迫切需要新的技术突破。卫星跟踪卫星和卫星重力梯度测量技术就是实现这一目标的新技术突破。

历经近 30 年的研究和 CHAMP(challenging minisatellite payload)计划的成功实施, 主要由 CSR、GFZ、NASA 和 DLR 共同研制的 GRACE(gravity recovery and climate experiment)计划空间部分于 2002 年 3 月 17 日 GMT09:21 升空, 标志着 GRACE 计划已正式实施。GRACE 的空间

部分由相距约 220km 的 GRACE 卫星对组成, 在进行低低模式(SST-II: Satellite-to-Satellite Tracking in Low-Low)卫星跟踪卫星的同时与 GPS 卫星实施高低模式(SST-hl: Satellite-to-Satellite Tracking in High-Low)观测。测定地球重力场精细结构及中、长波重力场随时间变化是 GRACE 计划的主要目标之一。正如有的报道称, 在 30 年中, GRACE 所提供的信息量超过了过去 30 年的相关研究的总和^[1]。

1 星载 GPS

低成本、全天候、连续卫星跟踪是诸如 SLR、DORIS 等地面跟踪系统很难独立满足的 LEO(low earth orbit)卫星跟踪要求。这使得传统大地测量卫星都将卫星轨道设计在中等轨道高度, 由于地球重力场固有的距离平方衰减性质, 过高的卫星轨道配置无法满足测定地球重力场精细结构的要求。直到以 GPS、GLONASS 和 Galileo 系统为代表的 GNSS(global navigation satellite system)对 LEO 卫星的跟踪试验(如应用于 Topex/Poseidon 卫星的星载 GPS 定轨试验)的成功, 表明 GNSS 可以为 LEO 卫星的定轨提供一套比较完整的解决方案。该方案已经在近几年的

LEO 卫星计划中广泛使用。

GRACE 计划的空间部分搭载了由 JPL 提供的 BlackJack 星载 GPS 接收机, 该类接收机是目前性能最优的星载型 GPS, 它可以提供两个频率 (L_1 和 L_2) 的信号, 用于 GRACE 卫星的差分或非差分方式的精密轨道确定, 实时或事后以不同精度水平连续给出 GRACE 卫星的三维状态 (精度为 cm 级)。

由于 CHAMP 卫星和 GRACE 卫星所搭载的星载 GPS 属于同一型号, 而 GRACE 数据目前尚未公开, 所以由已经公布的 CHAMP 星载 GPS 数据分析目前应用于重力卫星计划的星载 GPS 定轨水平和存在的问题。

随机抽取了 J2000.0 第 996.5~999.5 天的两类 CHAMP 星历, 它们分别由德国地学研究中心(GFZ)和美国喷气动力实验室(JPL)提供。比较了两类星历在协议地面坐标框架下 3 个方向的互差, 如图 1 所示, 目前 CHAMP 卫星的定轨水平可能在 10cm 左右, 还没有达到预期优于 5cm 的

目标。这一方面是由于低空间环境的复杂, 已有的定轨模型和方法还有待改善; 另一方面也可能是由于星载 GPS 接收机的性能所致。而 GRACE 在轨道特性和定轨技术方面与 CHAMP 类似, 特别是 GRACE 在 5 年的任务期内, 轨道高度将由目前的 500km 左右渐变到 300km 左右, 对其定轨的难度也将高于 CHAMP 卫星。所以, 多手段组合定轨的研究还需要进一步深入, 这才能保证 GRACE 定轨达到比较高的水平, 使得 GRACE 在计划的低轨道任务阶段可以满足既定任务的需要。另外, 已有的 LEO 卫星任务表明, 星载 GPS 作为一项定轨技术目前还无法完全取代地基手段。SLR、DORIS、PRARE 等定轨技术的一种或几种与 GNSS (GPS、G LONASS 或未来的 Galileo) 联合确定轨道技术是目前 LEO 实施精密定轨的标准模式。因为其他定轨技术可以作为 GNSS 定轨的补充和独立的外部检核, 从而大幅度地提高卫星轨道的精度和可靠性。

此外, GRACE 星载 GPS 接收机还承担着利

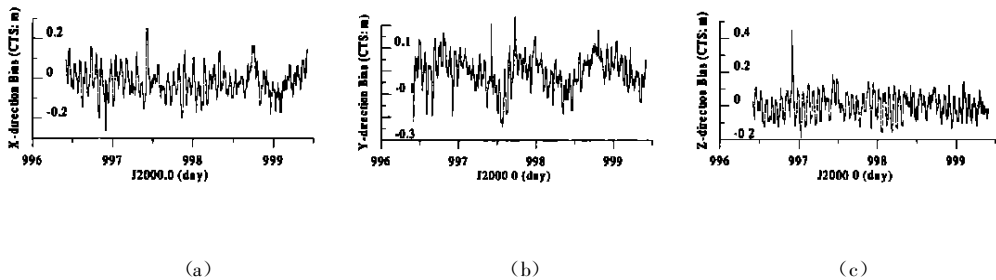


图 1 X、Y 和 Z 方向 (0.067 Hz) 数据比较

Fig. 1 RSO Bias in X, Y and Z-direction (0.067 Hz) Data

用掩星技术监测大气的任务。具体设计实施时, 可以选择一台接收机配备多天线或者各系统独立配备 GPS 接收机的模式。

2 星载加速度计

GRACE 卫星所载的 SuperSTAR 型加速度计是 CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) 提供的。它由位于法国 Chatillon 的 ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales) 制造。由于 GRACE 卫星的低振荡设计和温度的高稳定度, 用于 GRACE 计划的加速度计的测量范围达到 $\pm 5 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 加上其他的改进措施, 其精度可达到 $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。无论是由卫星轨道运动来推算地球重力场, 还是基于某一地球重力场模型进行精密轨道确定, 非引力摄动力 (非保守力), 如大气阻尼、太阳辐射压力、卫星作轨道机

动时的附加推力等和地球引力一起作用于卫星, 因此过去和现在的卫星重力测量中的一个主要问题是, 如何将非保守力对卫星轨道运动的扰动精确地排除。由于三轴静电悬浮加速度计具有结构简单、成本低、灵敏度高、易于自动化数据采集等特点, 因而在目前的卫星重力场探测中被认为是最佳可选设备。

CHAMP 的 STAR 星载加速度计与 SuperSTAR 属于同一系列的星载微加速度计, 同样可以通过对 CHAMP 所载的 STAR 加速度计的数据进行分析^[3], 进而研究 GRACE 所载的 SuperSTAR 加速度计在数据处理方面所面临的问题。STAR 和 SuperSTAR 的出厂设定值见文献[2]。

为了满足 CHAMP 计划测定非保守力摄动的需要, CHAMP 卫星所载的 STAR 加速度计在参数上做了一些调整, 具体见文献[3]。

随机抽取了 CHAMP 星载加速度计 2002 年

第 001 到第 100 天的数据进行处理, 有效地联合了 CHAMP 二级数据的 0.1Hz 加速度计观测值和恒星敏感器观测值, 计算出相应 0.1Hz 采样率的基于惯性参考系 (CIS) 的替代加速度。

对于 0.1Hz 加速度计观测值的改正主要有两项: ①洛伦兹力加速度 (Lorentz force acceleration); ②由法国宇航局 CNES 提供的模型计算的 CHAMP 星载加速度计 x 方向 (IFX) 的改正数 (CNES 并未提供 y 和 z 方向相应的改正)。需要特别注意的是, 由于 STAR 加速度计固有的特性, 即 x 轴的敏感程度比较低, 加入 CNES 的改正十分必要。比较图 2(a)和图 2(c)或图 2(b)和图 2(d)可以看出, 加入改正后替代加速度的离散程度迅速减小, 而且其加速度值的方向也产生了变化(由正到负)。另外, 图 2(a)~2(d)表明, x 方向的加速度几乎呈线性增加。由于该方向的非保守力部分的摄动力主要来源于地球热辐射压力和地球反射压, 所以这种现象可能是季节性的, 但

是也不排除加速度计在该方向上存在线性漂移。

在卫星运行过程中, STAR 加速度计有时会处于不稳定状态(如 2002086 天, 即 J2000.0 的第 815 天附近), 这种不稳定状态并非只是短暂的抖动, 而是出现较长时间的(一天或数天)系统性偏移。在这段时间内, 加速度计观测值的离散程度会增大 1~2 个数量级(图 2(a))。如果没有进一步的外部数据进行改正, 最好的处理方法就是剔除该时间段的数据。

关于使用 CNES 提供的模型改正值, 笔者发现经过附加改正后, 加速度观测值的变化趋势更加明显, 而且对于小的异常的探测也较容易(图 2(e)中的 J2000.0 第 800 天和 831 天附近)。虽然这些异常的量级可能比 815 天的异常小得多, 但是对加速度观测值确定地球重力场仍然会产生较大的影响, 所以最好也进行剔除。进一步由图 2(e)、2(f)也可以明显看到, J2000.0 第 815 天加速度计的异常在 y 和 z 方向也有不同程度的表现。

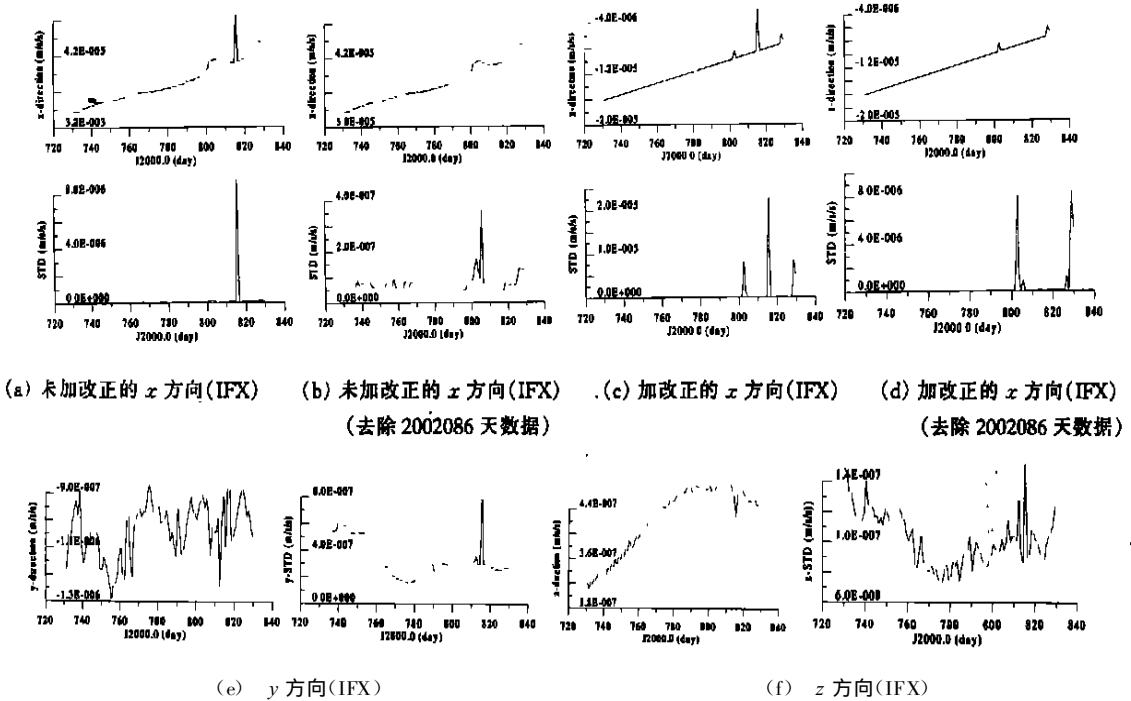


图 2 X、Y、Z 三方向(IFX)每日平均加速度值和标准差

Fig.2 X、Y、Z-direction Mean Acceleration and STD Per Day(IFX)

此外, 在 y 方向和 z 方向非保守力产生的加速度规律性也较 x 方向差。因为 y 方向的非保守力摄动主要来源于大气阻力, 这部分摄动十分复杂。这也从另一个角度说明, 在确定 LEO 卫星的轨道和地球重力场时, 只利用传统的大气经验模型很难满足较高精度的需要。

由图 2(f), z 方向在 J2000.0 第 730~第 788 天之间有一线性增加的过程, 然后趋于平稳(除去

815 天)。由于 CHAMP 卫星出于所执行任务的考虑, 不是太阳同步轨道卫星, 这部分影响可能是非球形地球引起的摄动, 也可能是太阳辐射压变化引起的, 但是由于其量级较小(1×10^{-7}), 对于确定重力场的影响也相对较小。

现在我们来综合分析各方向非保守力摄动加速度的大小和 STAR 加速度计观测的离散程度, x 方向加速度的大小在 $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 数量级, 剔

除异常点并加上附加改正,其 STD 的大小为 $10^{-7} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 数量级。y 方向加速度的大小在 $10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 数量级,剔除异常点之后,其 STD 的大小也在 $10^{-7} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 数量级。z 方向加速度的大小在 $10^{-7} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 数量级,其 STD 的大小也处于 $10^{-7} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 数量级。可以看出,该加速度计的噪声水平至少可以达到 $3 \times 10^{-7} g / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{Hz}$ 。

GRACE 计划对星载加速度计的要求稍高,即使使用性能更优的 SuperSTAR 型加速度计,仍会面临类似的问题,这需要更加完备的分析处理方法。

3 精密卫星间跟踪

GRACE 计划的重力场任务中,星间相对位移的变率 ρ 是 SST-II 确定地球重力场的直接观测,它的观测精度直接决定了地球重力场成果的精度水平。因此,作为 GRACE 计划的核心载荷——K 波段测距系统(KBR; K-band ranging system)是直接提供 SST-II 观测量的设备,它用于精确测定两卫星之间的双向单程距离和距离变化,其设计精度约为 $1 \mu\text{m/s}$ 。由于采用 K 波段的电磁波测距方式,频率基准的稳定性直接影响了测定距离和距离变率的精度。为此,GRACE 配备了精密超稳定振荡器(USO; ultra-stable oscillator)作为 K 波段测距的频率发生器,其设计指标为:运行 30 天以后每天的长期稳定度仍优于 1×10^{-10} ,可以确保所需的距离变率测定精度。

为了保证 GRACE 实施星间精密测距,必须使 GRACE 卫星有一定的俯仰角(如图 3)。而卫

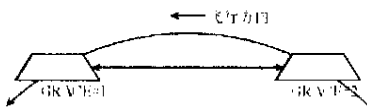


图 3 GRACE 卫星间跟踪

Fig. 3 Tracking Between Two GRACE Satellites

星轨道高度和星间距离直接决定了卫星姿态调整的幅度,它们之间的关系如图 4。可以看出,卫星在 500km~300km 之间,对俯仰角的调整幅度大致相当,而星间距离对调整幅度影响较大,从 $1.1^\circ \sim 0.7^\circ$ 不等。如果星间距离再加大,则调整的幅度将呈线性增加。所以 KBR 测距设备还需辅助以姿态测定设备(SCA)、姿态调整设备(微推进器)和位置确定设备(GPS),以及协调它们工作的 IPU (instrument processing unit),以此保证两卫

星间能够精密对准。为了确保 KBR 测距的可靠性,GRACE 两卫星成一线的偏移量不得超过 0.5mrad(对于 220km 约为 110m)^[4]。

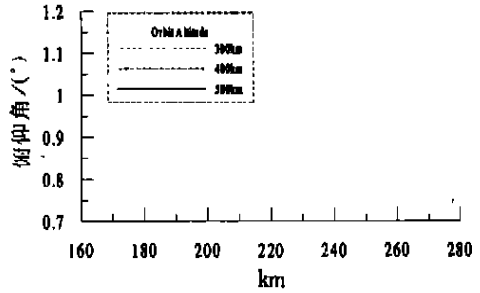


图 4 GRACE 卫星间距离与俯仰角关系

Fig. 4 Relationship Between Two GRACE Satellites and Pitch

4 其他

4.1 恒星敏感器

恒星敏感器在卫星姿态和轨道控制系统(AOCS)中用于卫星的精密定向加速度计(ACC)观测资料的正确归算(由加速度计仪器固定坐标到惯性坐标)。GRACE 所载恒星敏感器(SCA, star camera assembly)由一组相机镜头(两个)与加速度计精密固联。恒星敏感器的关键技术在于所要求的星等在满足观测的条件下要尽量低,并必须具有优化的选星算法和星的搜索匹配算法。

GRACE 所载恒星敏感器的设计指标为:测定卫星姿态的精度优于 0.3mrad,争取达到 0.1mrad 的目标。这对于目前比较成熟的恒星敏感器技术相对易于实现。

4.2 质量补偿

卫星的质量中心与加速度计(ACC)的检测质量中心之间的偏移量必须精确测定,同时在 3 个坐标轴上的测定精度要优于 $50 \mu\text{m}$,而 GRACE 的每个卫星上装备的 CMT(质量调整中心, center of mass trim assembly)就是用于调节该偏移量,并且在每个坐标轴上调节的步长为 $10 \mu\text{m}$,甚至更小,总的调节范围为 $\pm 2 \text{mm}$,保证最大偏心不超过 $\pm 400 \mu\text{m}$ ^[5]。这对于 GRACE 所载 SuperSTAR 所获取加速度数据的可靠性和精度至关重要,一旦达不到控制水平,所产生附加的旋转加速度噪声可能淹没所要观测的加速度。

5 结论和建议

以上列举了与重力场有关的 GRACE 有效载

荷, 它们是 GRACE 能否成功实施 SST-II 技术的关键。通过分析可以得到一些有益的结论。

1) 利用星载 GPS 实施 LEO 的轨道确定是未来的一个趋势。无论 CHAMP、GRACE 还是 GOCE 计划, 星载 GPS 都是关键的有效载荷。

2) GRACE 相对于 CHAMP 是较优的 SST 模式。由于 GRACE 同时发射两颗低轨道卫星在同一个轨道上, 彼此相距约 220km, 采取一个“追踪”另一个的观测方式。两者之间的相对运动, 即卫星间的距离变化用微波干涉仪极其精密地测量, 用其一阶微分便可求得重力加速度。而 CHAMP 实际上是通过轨道的摄动感应地球非球形引力摄动。GRACE 所得到的静态和动态重力场的精度将比 CHAMP 高一个数量级, 空间解析度(半波长)可达 100~200km。

3) GOCE 在理论上对于大地测量关于高分辨率地球重力场的获取贡献最大。但是由 6 个高精度加速度计构成的梯度仪在制造、安装方面难度太大, 要求每个加速度计的特性尽量一致, 单个加速度计的噪声水平要达到 $10^{-12} g/\sqrt{Hz}$ 量级等, 这也是 GOCE 计划一再推迟的原因。所以 GRACE 任务是目前比较切实可行的卫星重力探测模式。

4) 星载加速度计是 SST 关键的有效载荷。两个飞行器上的非保守力影响可以由 Super-STAR 加速度计辅助以 SCA 测量出来。加速度计的敏感度和稳定性是最重要的指标; 另外由于外层空间的特殊性, 星上标定技术是十分必需的。

5) GRACE 有望提供一个前所未有的新的地球重力场模型。它将主要应用于固体地球物理学、海洋学和气象学问题, 使人们对于海洋表面流和海洋热传输等问题有更好的理解。

6) GRACE 主要是用来研究重力场的时间变化。由于 CHAMP 和 GRACE 具有不同的轨道高

度和由此产生的不同的轨道扰动波谱, 两个卫星计划可以互相取长补短, 给出一个高精度的中、长波地球重力场模型。该模型将为今后更高分辨率的重力卫星探测计划作铺垫。如 GOCE 卫星重力梯度测量计划的观测频段主要是高频部分, 它需要高精度中、长波地球重力场模型作为基础。

参 考 文 献

- 1 GRACE. <http://www.csr.utexas.edu/grace/>, 2003
- 2 ONERA. <http://www.esa.int/est/comp/comp0181.htm>, 2003
- 3 GFZ. Announcement of Opportunity for CHAMP. GFZ-Potsdam, 2001
- 4 Kirschner M, Montenbruck O, Bettadpur S. Flight Dynamics Aspects of the GRACE Formation Flying. The 2nd International Workshop on Satellite Constellations and Formation Flying Haifa, Israel, 2001
- 5 Mazanek D D, Kumar R R, Qu M, et al. Aerothermal Analysis and Design of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Spacecraft, NASA/TM-2000-210095 2000
- 6 宁津生. 跟踪世界发展动态 致力地球重力场研究. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6): 471~474
- 7 陈俊勇, 文汉江, 程鹏飞. 中国大地测量学发展的若干问题. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6): 475~482
- 8 沈云中. 应用 CHAMP 卫星星历精化地球重力场模型的研究; [博士论文]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2000
- 9 张传定. 卫星重力测量——基础、模型化方法与数据处理算法; [博士论文]. 郑州: 信息工程大学, 2000

第一作者简介: 宁津生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。现主要从事物理大地测量的研究。代表成果: 我国地球重力场模型研制和大地水准面的精化等。

E-mail: jsning@wtusm.edu.cn

Key Technique for Earth Gravity Field Determination in GRACE Model

NING Jinsheng^{1,2} LUO Jia¹ WANG Haihong¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

(2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: GRACE's payload comprises eight system: K-band ranging system (KBR), accelerometer (ACC), GPS space receiver (GPS), laser retro-reflector (LRR), star camera assembly (SCA), coarse earth and sun sensor (CES), ultra stable oscillator (USO) and center of mass trim assembly

(下转第 37 页)

- Springer, 1997. 207~222
- 40 张青年, 秦建新. 面状分布地物群识别与概括的数学形态学方法. 地理研究, 2000, 19(1): 93~100
- 41 Ai T H, Jiang W. Distribution Analysis and Automatic Generalization of Building Cluster. Geoinformatics & DMGIS' 2001, 2001
- 42 Peng W, Sijmons K, Brown A. Voronoi Diagram and Delaunay Triangulation Supporting Automated Generalization. 10th ICA/ACI, 1995
- 43 Ware J, Jones C, Bundy G. A Triangulated Spatial Model for Cartographic Generalization of Areal Objects. Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS, 1995
- 44 Li Z Huang P. Quantitative Measures for Spatial Information of Maps. Int. J. Geographical Information Sciences 2002, 16(7): 699~709

第一作者简介: 陈军, 教授, 博士生导师, 国际欧亚科学院院士。现主要从事多维动态 GIS、空间决策支持系统等研究。

E-mail: chenjun@nsdi.gov.cn

Voronoi Diagram-based GIS Spatial Analysis

CHEN Jun¹ ZHAO Renliang¹ QIAO Chaofei²

(1 National Geomatics Center of China, 1 Baishengcun, Zizhuyuan, Beijing, China 100044)

(2 China University of Mining and Technology (Beijing Campus), Beijing, China 100083)

Abstract: Voronoi diagram was widely applied to GIS spatial data modeling and spatial analysis in the past ten years. This paper overviews its applications to spatial interpolation, terrain modeling, facility location analysis, spatial recognition as well as spatial data generalization. Future research directions are also briefly summarized.

Key words: Voronoi diagram; GIS; spatial analysis; interpolation; modeling

About the first author: CHEN Jun, professor, Ph. D supervisor, member of the Euro-Asia International Academy of Sciences. His main research interests are dynamic and multi-dimensional GIS spatial decision support systems.

E-mail: chenjun@nsdi.gov.cn

(上接第 17 页)

(CMT). For the determination of the earth's gravity field, KBR, ACC and GPS are the key instruments. In this paper, the KBR, ACC and GPS are analyzed in detail, and the others are also introduced briefly. Some conclusions and suggestions are given.

Key words: GRACE; Earth gravity field; payload

About the first author: NING Jinsheng, professor, Ph. D supervisor, member of Chinese Academy of Engineering. His interested field is physical geodesy. His typical achievements are the development of the earth gravity field model and geoid refining of China, etc.

E-mail: jsnig@wtusm.edu.cn