

论空天地一体化对地观测网络^①

李德仁

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 空天地一体化对地观测网不仅是最具发展前途的高新技术领域之一,也是保障国家安全、经济社会发展的重要基础设施。本文首先全面论述了对地观测网研究的主要理论问题、关键技术、发展现状和趋势;然后,介绍了国产卫星遥感数据的一体化综合快速处理技术,在此基础上论述了广义空间信息网格的概念和内涵;最后指出,需以提供快速、精确和实时的空间信息服务为目标,加快开展对地观测网的理论与技术研究,推进数字地球走向智慧地球的转变。

关键词: 空天地一体化;对地观测网;空间信息服务

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00419

1 引言

当前世界正在经历着新技术革命。科学发展表现出“综合交叉”占主导地位的特点,促使人们不断努力去开拓、占领和扩大知识结构。地球空间信息学(Geo-Spatial Information Science and Technology, Geomatics)是地球科学、空间科学与信息科学交叉的新兴学科,是近50年出现的国际前沿科技竞争的战略重点。它采用现代探测与传感技术、摄影测量与遥感对地观测技术、卫星导航定位技术、卫星通信技术和地理信息系统等手段,研究地球空间目标与环境参数信息的获取、分析、管理、存储、传输、显示和应用,满足资源环境变化监测、自然灾害预报、国土资源规划与管理、城市发展、精准农业^[1]、智能交通、国防建设与国家安全等重大需求,保障经济和社会的可持续发展。2004年1月的《Nature》发文中将地球空间技术与纳米技术和生物技术并列为当今最具发展前途和最有力潜力的3大高新技术。

地球空间信息学研究的范畴从传感器/卫星研制到卫星发射,传感器定轨测姿与数据获取、数据传输,到时空基准的建立与维持、空间环境模型和遥感成像机理,再到导航定位数据处理、遥感数据接收处理、空间探测数据处理,以及多种信息的融

合与集成,最后到各级产品的生产、服务与分发给各类型用户,实现各种应用。

地球空间信息学研究的生命力在于,首先,随着地球及其环境的变化,要解决地球人类面临的挑战,面对环境灾害预警和资源勘查等问题的提出,卫星应用变得十分重要,已成为促进国民经济持续增长的重要手段。第二,在国防建设与国家安全方面,人类社会工业革命开始之后,哥伦布发现新大陆,开启了争夺制海权,1903年飞机发明后,二战开启了争夺制空权,继苏联人造卫星上天之后又开启了争夺制天权,即制信息权。而卫星应用在军事方面可以支持军事信息化作战,识别战场态势,支持联合作战,实现精确打击。第三,在经济社会可持续发展方面,国家的信息化过程需要空间信息基础设施的支持,及其空间信息的服务系统支持。地球空间信息学广泛应用于国土资源规划与管理、城市发展、精准农业、智能化交通等领域^[2],将形成新的信息产业链,成为国民经济的重要增长点之一,保障经济和社会的可持续发展,并可直接服务于大众民生。

2 空天地一体化对地观测网络

空天地一体化观测网络是对地观测领域的科

收稿日期: 2012-07-01; **修回日期:** 2012-08-01.

^①本文内容源自资源与环境信息系统国家重点实验室“石坚论坛”第1讲主题报告,经录音整理,并经本人审阅。

作者简介: 李德仁(1939-),男,江苏镇江人,中国科学院院士,中国工程院院士,国际欧亚科学院院士,著名摄影测量与遥感专家。E-mail: drli@whu.edu.cn

学前沿,一体化的全球对地观测集成系统(GEOSS)于2003年,由美国、中国和欧盟等50多个国家发起,经3次部长级峰会,讨论通过了GEOSS十年行动计划^[3],到2010年有81个国家和58个国际组织参加,旨在建立一个分布式的一体化全球对地观测的多系统集成系统(GEOSS),形成空天地传感器一体化组网,联合应对社会可持续发展的重大问题。

空天地一体化对地观测网需要解决的关键问题是:空间信息获取的一体化和智能化,空间数据处理的自动化、定量化和实时化,空间信息分发与应用的网格化,空间信息服务的灵活性和大众化。研究的核心是解决地球空间信息获取、处理、应用和服务中的基础理论问题。

2.1 地球时空基准理论与方法

为建立我国的空天地一体化时空基准理论、方法与技术支撑,地球时空基准理论与方法的研究主要针对以下方面:三维动态大地坐标参考框架的构建,全球及中国陆海统一高程基准的设立,全球与区域物理基准的统一理论及其相互转换,卫星测高及海洋环境监测,卫星重力探测,卫星的时间同步。另外,重力、磁力的物理基准也需要统一。

围绕空天地一体化多传感器影像高精度配准与定位的主要研究包括以下几个方面:精密四维地球空间时空参考框架的建立理论(x, y, z, t),全球空天地一体化、静态一体化参考框架的实现方案,以及长期维持的方法,基于我国北斗及GPS、Galileo等多种卫星导航系统的遥感卫星组合定轨方法。

我们已经解决利用多导航定位卫星对我国2000km之下的近地球遥感卫星定位问题,利用武汉大学研发的PANDA软件能够实现3~5mm的精确定位;在星载GPS、INS和恒星相机组合定位定姿方面,已达到美国同类产品的精度。

2.2 空间信息网络技术和方法

为解决空天地一体化空间信息网络中信息传输、压缩、加密、安全、共享等关键技术问题,空间信息网络技术和方法主要研究内容包括:空天地一体化信息网络的资源共享;海量空间数据压缩与传输控制;卫星传感器组网与全球信息网络的集成,以及天地互联网的耦合等工作;空间信息加密与网络

安全技术。空间信息网络技术和方法的研究,既是研究工作的基础,也是国家安全的基础。

目前,武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,在国家“973”和“863”计划项目的支持下,开展了地球空间信息网格服务共享平台研究工作,该平台是利用我国新一代网络环境,构建新一代网络的地球空间信息与处理服务的共享服务与测试平台,制定统一的标准,使任何人均可在网络上注册与发展数据及处理服务的软件,实现数据和处理软件原码共享;同时,通过构建数据和原码的共享环境,实现地球空间信息智能处理与服务理论及方法研究的可持续发展。下一步需要研究的是天基互联网,以实现在轨各类卫星间时变空变条件下的组网通信和信息传输。

2.3 地球空间环境探测

地球空间环境探测是研究空间目标、大气、电磁环境的探测与分析的新方法,为建立我国的空间环境监测技术体系奠定基础。主要研究内容包括:大气与电离层环境探测与数值建模;高频雷达海洋环境监测;空间目标探测、定位与识别技术;无线电探测系统与信息获取;近地空间环境监测数据融合、模式与预报;全球动力环境变化监测技术与演变趋势分析等。

2.4 航空航天遥感对地观测

为突破我国遥感数据地面接收处理、遥感信息自动提取等关键技术,完善我国遥感卫星对地观测技术体系,航空航天遥感对地观测研究工作主要从以下几个方面着手:遥感成像机理与定量反演,多源传感器数据与信息融合,遥感数据的接收与处理,遥感影像精密定位,影像解译和目标自动识别和三维重建与三维空间信息提取。

各种遥感信息的精确有效的定量化工作,主要是研究各种传感器的成像方程及大气等环境参数的影响;遥感影像几何与辐射纠正的一体化模型;我国空天地一体化对地观测系统的几何与辐射定标场的设计;利用地面几何定标场、辐射定标场、遥感传感器及大气等相关条件,进行几何与辐射定标的方法研究。

目前,国内已经研制了多套遥感光学卫星数据处理系统(包括几何、辐射预处理和精处理)和联邦互操作与地上地下三维一体化软件,集成了大量遥

感影像智能处理和信息提取算法,可实现算法和软件的高效共享,参与制定了相关国家标准,建立了高精度几何标定场,满足卫星和航空几何定标的参照要求,已被航天部门采纳。

另外,为实现从遥感影像中准确快速提取地理空间信息和物理信息,国内开展了空间信息认知模型和遥感影像智能解译的理论、多传感器遥感信息目标自动识别与分类的理论与方法、多传感器遥感信息协同处理与融合方法、多传感器遥感信息物理反演的理论与方法和遥感影像快速并行处理方法等研究工作。

2.5 卫星导航定位

为建立我国的导航卫星星座和综合卫星导航服务系统提供理论、方法与技术基础,主要研究内容包括:多源卫星导航系统兼容集成及信号组合理论与方法,高、中、低轨遥感和探测卫星精密综合定轨、定姿理论与研发,抗射频干扰、抗多径影响的卫星定位接收机技术及其他信息技术的集成,区域和全球多源综合卫星定位实时动态服务系统建立的相关理论和关键技术。利用这些技术已成功实现了 GPS 与北斗卫星数据的增强与集成处理,有效地提高了卫星导航定位的精度和可靠性。下一步应抓紧建立基于 CORS 站的位置云服务平台。

2.6 地球空间信息服务

为解决地球空间信息公共服务技术体系中的空间信息语义表达、集成、融合与共享的理论与方法问题,实现地球空间信息的智能服务。地球空间信息服务的主要研究内容包括:地理信息的认知与概念模型;地球空间信息大规模并行计算与智能处

理;地球多源空间信息集成、融合与可视化;地球空间环境模拟与虚拟仿真;地球空间信息网络共享;地下空间信息探测及解译。

在国家“863”计划的支持下,国内已构建地球空间信息服务共享平台 Geoglobe,旨在让所有的软件和信息能够在网上共享,通过服务器注册中心进行用户的安全认证,对各种用户提供空间数据查询、集成和服务。目前,该项研究目标在于使所有的传感器资源、数据资源、处理资源、信息资源,计算机网络资源和存储器资源^[4]可以集成,实现对用户的服务,并制定相应的空间数据、空间服务和空间数据处理和应用的标准。目前,Geoglobe 系统可以实现空间数据查询、集成和服务,如查询某地的航空影像、实现某地三维地形漫游等。除了数据服务还可实现信息服务,如自然灾害受灾面积计算,可根据用户的自然语言要求,进行分布式异构空间信息处理。目前,地球空间信息服务共享研究在针对知识的服务方面还有待进一步研究空间数据挖掘与知识发现方法。

目前,我国公众国家地理信息公共服务平台“天地图”网站已公开如下成果,在 1-7 层:全球 1:100 万地理底图,全球 250m 卫星影像 (MODIS);在 8-10 层:全球 1:100 万地理底图,全国 15m 卫星影像 (ETM);在 11-12 层:全国 1:25 万公开版数字地形图,全国 2.5m 卫星影像;在 13-14 层:全国车载导航,全国 2.5m 卫星影像;在 15-18 层:全国车载导航,城市 0.6m 卫星影像,全球 90m SRTM DEM 数据,以及全国 1:5 万地名数据。此外,天地图系统支持基于 Web 2.0 进行数据处理和共享。目前已被国家减灾委、气象局、地震局等单位广泛使用(图 1)。



图 1 基于天地图的灾情预警系统

Fig. 1 The disaster early warning system based on air-ground map

在地球空间信息服务研究工作中采用了如下

关键技术:(1)采用全球无缝多源、多尺度、多时相

空间数据模型。利用全球无缝多级格网递归剖分,建立了时空一体的多源多尺度全球空间数据模型(图2),通过全球一体化金字塔空间数据组织方法和四叉树空间索引方法,实现了全球多源、多尺度、多时相空间数据的高效无缝组织;(2)支持多服务器协同调度与大规模用户的并发访问;(3)空间数据自适应渐进传输与高效可视化,基于多级金字塔小波变换的影像数据自适应渐进传输方法,大幅提高了网络传输效率。

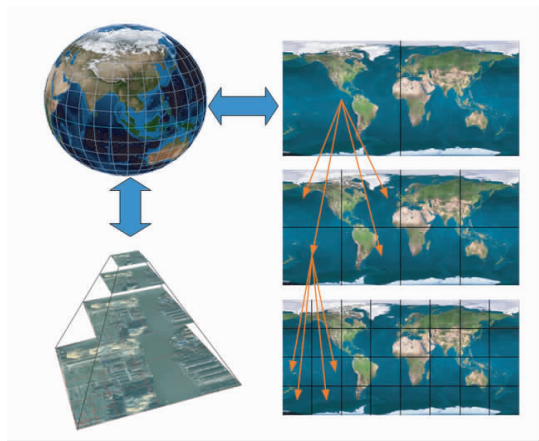


图2 全球无缝多源、多尺度、多时相空间数据模型

Fig. 2 The multi-source, multi-scale and multi-temporal spatial data model with the global seamless grid

另外,可量测实景影像的空间信息服务-可量测实景影像与4D的集成(5D产品),已经完成全国120多个城市,通过兴趣点功能实现了与非空间信息的关联以服务全民,如彩票点等。通过将航空航天影像、街道实景影像与地图的集成,实现3G手机上的实景地图与实时交通的导航和查询定位,大幅提高了系统服务于大众民生的便捷性和经济性。

3 卫星遥感信息一体化快速综合处理技术

针对光学和SAR的航天多源数据,解决多源卫星遥感信息一体化、快速和综合处理等关键技术攻关,研制卫星遥感信息一体化快速综合处理平台示范系统。研究目标是:实现1、2级影像产品的自动化实时生产,处理延时优于1分钟;实现3、4级影像产品的半自动准实时生产,生成3级产品优于5分钟,4级产品优于10分钟;实现多源数据一体化处理,包括一体化快视、预处理、多源整体平差和多源三维信息提取。

3.1 卫星遥感影像处理的一体化体系结构

卫星遥感影像处理的一体化体系结构研究内容包括:卫星遥感一体化快速处理软硬件体系结构

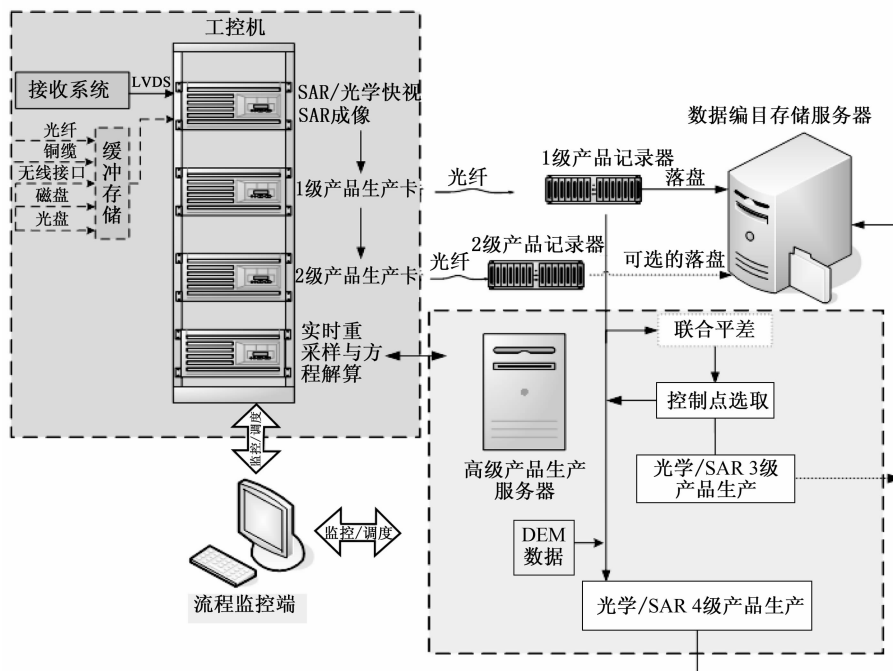


图3 软硬件集成一体化体系结构

Fig. 3 The architecture of software and hardware integration

设计,标准化、模块化、可扩展和可重构设计,统一标准的硬件、软件接口规范(见图3)。

在标准化研究方面,主要包括系统的组成结构、互联关系、电气协议、机械结构等符合国际主流规范,硬件模块采用 Compact-PCI/PMC 国际标准,具有高可靠性,满足车载、机载等多种应用环境;模块化设计方面,系统由一系列功能内聚模块组成;可扩展设计通过增减硬件模块的数量以满足不同具体应用,而可重构设计即通过更改模块类型、数量,以及连接关系可以适应不同的具体应用。

3.2 软硬件集成的快速处理技术

软硬件集成的快速处理技术,采用多层次并行策略设计,利用大、中、细3个粒度进行遥感数据实时多粒度并行传输,利用高速多通光纤传输技术,传输数据率达到 300Mbps ~ 1Gbps,数据粒度可达 128MB ~ 8GB,多端口数据实时并发和实时传输技术是采用大规模的 FPGA 实现多端口数据流并发传送,缩短了数据传输时间、提高实时性,突破了嵌入式处理系统与通用服务器之间高速数传的瓶颈,存储容量和处理能力满足军民要求。

针对光学影像 1-2 级产品生产,利用新硬件固化算法,基于 cache 原理实现高效辐射校正算法和分块处理的 DSP 二级产品生产算法,采用以矩阵分块映射的高效存储方案,将整个矩阵划分为若干子阵,每个子矩阵放在一页的连续地址中,矩阵二维的访问效率可达 480MB/s 左右。

从光学、SAR 原始数据,到数据产品生产,再到产品发布的一体化实时处理,实现了流程的一体化、软硬件一体化和多源数据处理一体化,处理时间由常规的 30~60min 缩短到 2min 以内,并可实现快速移动部署。

利用多机、多核和 GPU 实现快速并行计算可在 1min 内,将接收到的原始卫星数据加工成可供用户网上使用的数字产品。

3.3 多源遥感数据综合处理技术

为提高中国卫星影像的质量,在处理卫星影像技术方面,进行了以下的研究:(1)光学和 SAR 影像预处理;(2)光学和 SAR 影像高级产品处理;(3)多源、多时相一体化平差;(4)多角度立体建模与信息提取。

在系统辐射校正处理方面,进行死像元检测与

处理、丢行的检测与处理、奇偶探元响应的不对称性处理、阵列间的响应差异与处理、随机条带噪声去除、超高分辨率影像 MTFC 补偿处理、星载 SAR 精成像技术辐射增强等研究。

在卫星几何处理方面,提出了光学和 SAR 通用几何模型(RPC)。通过建立全球控制点影像数据库,获取了全球 200 多万个广义控制点,可实现自动配准选点和纠正,自动化处理精度优于 20m (相对检查点)。这种基于控制点库的几何精纠正技术改变了传统光学影像精纠正生产模式,将生产时间由 2~3h 提高到了 3min 以内。利用 RPC 模型光学正射校正,正射纠正的精度大幅提高。利用 RPC 模型做多源、多时相区域网平差,建立同轨和异轨统一的核线模型,可进行立体像对和高程信息提取、光学和 SAR 构成立体像对和高程提取。建立高分辨率光学、SAR 卫星影像一体化接受和处理系统,对我国获取全球的卫星影像和 4D 产品具有重要意义。

4 空天地一体化对地观测网络的建立

广义空间信息网络是指在网络技术和云计算技术支持下,在信息网络上运行的空、天、地一体化地球空间数据获取、信息处理、知识发现和智能服务的新一代整体集成的实时/准实时空间信息系统网。

广义空间信息网络面临的主要任务包括:实现全球、全天候、全天时、全方位的空间数据获取,实现从传感器直到应用服务端的无缝集成,实现从数据到信息和知识的自动升华,实现对各类不同用户(包括实时用户)提供空间信息灵性服务。

广义空间信息网络由 4 个模块组成:

(1)智能传感器网络(Smart Sensor Web)。智能传感器网络涉及的研究问题:①智能传感器网络的体系结构:无处不在、接触或非接触、具有数据采集和通信功能;②在轨数据处理:以满足实时用户对数据加工、信息提取的实时要求;③智能传感器网络与全球计算机信息网络的集成理论^[5]。

(2)基于网络计算和云计算的多传感器数据-信息-知识的智能处理系统。以网络计算的多传感器数据-信息-知识的智能处理系统涉及的研究问题有:确定各类传感器的空间位置和姿态的方法;解求目标物理和几何特性的数学模型和一体化解

求方法;多平台、多传感器遥感影像网格计算与信息提取的智能方法;多源海量空间信息集成融合和空间信息的实时更新方法;空间数据认知模式,以及从海量空间数据库进行数据挖掘和知识发现的理论(图 4)。将大量的数据上升为知识,其难度仍比较大^[5]。

(3)适应于网格计算环境的新一代地理信息系统理论问题。GIS 作为空间数据和空间信息在计算机中的存贮、表达、分析和应用的信息系统,已经从单个系统走向了 WebGIS 和 Mobile GIS,未来将走向 Grid GIS。涉及的研究问题有:时间基准不一致引起的问题;空间基准不一致引起的问题;数据格式不一致引起的问题;语义不一致引起的问题等。

目前,空间基准、数据格式不一致的问题已经解决,而时间基准不一致与不同行业的专家语义不一致的问题仍未解决,为了解决语义不一致的问题,需要从本体出发建立语义网络,进行高于分类的语义本体的描述,而时间基准不一致需要提高遥感卫星的时效分辨率。

(4)基于网格技术的空间信息智能服务代理(Intelligent Geo-Service Agents)。空间信息智能服务是广义空间信息网格建立的主要目的,是使空间信息为各行各业,从科学研究、经济建设、国防安全、人民生活到和谐社会的构建,进行实时智能服务,实现将最有用的信息,用最快捷的方法和最低的成本送给最需要的用户。

空间信息智能服务代理(Intelligent Geo-Service Agents)涉及的研究问题有:空间信息智能服务机制与模式,包括需求牵引的空间服务任务流程建模,任务分配,智能搜索和空间信息智能服务平台的体系结构;空间信息服务标准与互操作标准,使各种空间信息服务系统一标准下实现互操作;空间信息服务的语义模型,包括基于本体的空间信息语义网格,空间服务网格模型的设计等;空间信息服务在各类终端上的实现,这些终端包括手机、掌上宝、便携机、台式机、电视机、电话机等等。

利用天基互联网与天地通信网络的耦合,各种传感器在 Web 上进行描述、注册、在线处理与服务,通过面向任务的聚焦服务机制,服务按需聚合、高效协同,空天地一体化对地观测网可成为沟通“异构传感器系统”、“信息模型”和“决策支持”之间的桥梁。例如,在智能交通系统中的应用(图 5),有效提高交通运输效益,使交通拥挤降低 20%,延误

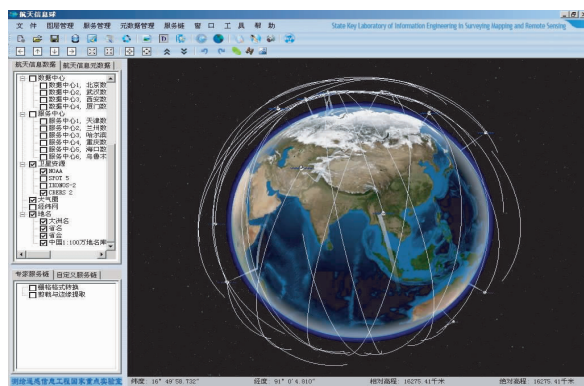


图 4 多传感器卫星传感器预警与规划调度

Fig. 4 Sensor early warning and planning-scheduling of multi-sensor satellites



图 5 智能交通系统中的应用系统

Fig. 5 An application system of the intelligence transportation system

损失减少 10%~25%,车祸降低 50%~80%,油料消耗减少 30%,废气排放明显减少。

5 结论

自加拿大的罗杰·汤姆林森在 20 世纪 60 年代提出地理信息系统以来,在王之卓、陈述彭老一代科学家积极倡导下,我国对地观测技术在 40 多年的发展历程中已经取得了很大成就,并广泛地应用于土地利用、资源管理、环境监测、交通运输、城市规划^[2]、经济建设,以及政府各职能部门。而随着 Google Earth 与 Virtual Earth 的问世,原本只有专业用户才能使用的地理信息,让所有互联网用户开始能够在一套统一的空间信息服务平台上开展各种工作。2007 年,美国科学院院士 Michael F. Goodchild 为了阐述在 Web 2.0 的环境下地理信息

的协作生产和地理知识的传播与共享的问题,提出了“人人都是传感器”的概念。之后,通过我们的研究,利用 Web 2.0 技术将大量原始的空天地可量测实景影像的外方位元素及立体量测软件一起上传到网络上,可使“按规范测量”的传统模式有望变成“按需要测量”的模式,使得“人人都是测量员”。Web 2.0 为用户提供的各种服务具备体验性、沟通性、差异性、创造性和关联性等特性,智能传感器与网络 GIS 的出现,为用户数量和服务内容等方面带来了质的飞跃。所以,一个新的地理信息时代来临了。

新地理信息时代具有服务对象扩大到所有的大众用户、用户也是空间数据和空间信息的提供者、新地理信息时代按需实时更新、通过传感器网络,数据从死变活、提供按需测量和按需服务的典型特征。“Nature”(vol. 440, 2006)杂志发表封面论文 2020 Vision 指出:观测网将首次大规模地实现实时地获取现实世界的的数据、可以通过观测网发现新问题,验证假设;观测网是一个触及现实世界的计算科学,将是下一个科学前沿。

以空间位置为关联点整合相关资源、以地理信息系统集成各类数据资源,实现了“秀才不出门,能知天下事”的数字地球,与实现了人与人、人与机器、机器与机器的互联互通的物联网的结合,迎来了新的“秀才不出门,能做天下事”的智慧地球时代。从数字地球到智慧地球的过程,也是实现从 See everything On Web 到 Do everything On Web 的过程。围绕构建智慧地球的主题,空天地一体化

对地观测网已在诸多领域得到应用。例如,在城市管理中,利用智能手机和监控器来建立高效的监控网络,在事件发生后,立即传送可疑人员的图像和录像等有效的信息到实时监控中心,并通过移动监控站扩大监控范围,实现城市网格用于应急响应。

综上所述,空天地一体化对地观测网是多学科的交叉,事关国家安全、经济建设、灾害应急和大众服务。因此,为迎接新地理信息时代,我们须以空间信息的快速、精确和实时服务为目标,建立地球空间信息学的基础理论框架,开展对地观测网的理论与技术研究,并推进数字地球走向智慧地球的转变。

致谢:作者感谢资源与环境信息系统国家重点实验室“石坚论坛”提供的科学交流平台,感谢测绘遥感信息工程国家重点实验室全体同仁努力工作所提供的本报告中涉及的成果。

参考文献:

- [1] 李德仁. 对地观测与抗震救灾[J]. 测绘科学, 2009, 34(1): 8-10.
- [2] 李德仁. 论广义空间信息网格和狭义空间信息网格[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 514-520.
- [3] 李德仁, 邵振峰. 信息化测绘的本质是服务[J]. 测绘通报, 2008(5): 1-4, 32.
- [4] 刘嵘. 集群式网格地理信息服务注册中心的构建研究[D]. 解放军信息工程大学博士论文, 2011.
- [5] 李德仁, 易华蓉, 江志军. 论网格技术及其与空间信息技术的集成[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(9): 757-761.

On Space-Air-Ground Integrated Earth Observation Network

LI Deren

(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan 430079, China)

Abstract: Space-Air-Ground integrated earth observation network (SAGIEON) is not only the most promising high-tech area, but also a fundamental infrastructure closely related to national security and economic/social development. Firstly, the scientific concept, key technologies, current situation and tendency of SAGIEON are comprehensively represented. Secondly, an integrated data processing system for native remote sensing satellites is introduced, including its objectives and key technologies. Thirdly, the connotation of generalized spatial information grid are proposed on the basis of the above mentioned discussions. Finally, some conclusions are drawn. For the propose of providing fast, precise and real-time spatial information service to everyone, it is very important to carry out research on the theories and technologies of SAGIEON.

Key words: Space-Air-Ground integrated; earth observation network; space information service