

DOI:10.13203/j.whugis20160526



文章编号:1671-8860(2017)02-0143-07

从对地观测卫星到对地观测脑

李德仁^{1,2} 王 密^{1,2} 沈 欣^{1,2} 董志鹏¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息协同创新中心,湖北 武汉,430079

摘 要:21 世纪以来,高分辨率对地观测卫星快速发展,对地观测系统由最初单星模式发展为现在的轻小型卫星组建星座,实现了全天时、全天候、全方位的对地精细化观测。未来将对地观测卫星星座与通信卫星、导航卫星和飞机等空间节点通过动态组网,建立天基空间信息网络,以实现智能化空天信息的实时服务。为了进一步增强系统的智能化水平,提高系统感知、认知能力和应急响应能力,本文提出未来空间信息网络环境下对地观测脑(earth observation brain,EOB)的概念,对地观测脑是基于事件感知的智能化对地观测系统。详细介绍了对地观测脑的概念模型及需要解决的关键技术,举例说明了对地观测脑初级阶段的感知、认知过程。将来对地观测脑可以回答何时(when)、何地(where)、何目标(what object)发生了何种变化(what change),并在规定的时间(right time)和地点(right place)把这些正确的信息(right information)推送给需要的人(right people)的手机或其他智能终端,全球用户可实时获得所需的任何数据、信息和知识。

关键词:对地观测卫星;对地观测脑;智能对地观测系统;空间感知与认知;应急响应能力;天空地一体化协同对地观测

中图法分类号:P23

文献标志码:A

1957 年苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星“斯普特尼克 1 号”,正式开启了人类的“天空时代”,从此改变了千百年来人类只能从地球表面进行观测的历史。随后几十年人类相继发射气象、资源、海洋等卫星序列,均以光学和雷达遥感为探测手段,从外部空间对地球进行观测,获取人类所需要的各种空间信息,这些卫星统称为对地观测卫星。

近 20 年来,随着航天和航空遥感技术的飞速发展,对地观测卫星的空间分辨率、光谱分辨率、时间分辨率等不断提高,第一颗高分辨率商业遥感卫星 IKONOS 的成功发射(美国 Space Imaging 公司研制,分辨率达到 1 m)开启了商业高分辨率遥感卫星的新时代^[1]。高分辨率遥感卫星带来巨大军事与经济效益,引起全球民用与军事应用领域的高度重视,世界各国随之掀起了全球高分辨率遥感卫星研制的高潮^[2],高分辨率遥感卫星已进入一个全面发展和广泛应用的崭新时期,美国、法国、俄罗斯、欧空局、日本、印度等国家和机构都相继发射了大量高分辨率遥感卫星:

WorldView 系列、GeoEye-1、Peidase-1A/B、SPOT 系列、ALOS、Cartosat-1/2 等,我国也相继发射资源系列、遥感系列和高分系列高分辨卫星^[3]。

在卫星性能不断提高的基础上,对地观测由传统的单星模式发展为轻小型卫星组建星座^[4],满足更短的重访周期、更大范围的观测覆盖范围以及基于特定任务目标需求的快速响应、持续动态监测等数据获取需求。随着 2014 年 SPOT-7 的成功发射,法国空中客车防务与空间公司此前规划的由 SPOT 6&7 与 Pleiades 1A&1B 组成四颗卫星星座的计划终于得以完成,而美国 DigitalGlobe 公司将 WorldView-4 与 WorldView-3 组成星座,此外,美国 SkyBox Imaging 公司研制的 SkySat 系列卫星星座,美国 Planet Labs 研制的 Dove 系列卫星构建 Flock-1/1b/1c/1d/1e 星座,美国陆军太空导弹防御司令部研制的 Kestrel Eye 系列卫星星座等,以及英国萨里航天中心及美国 NASA 对手机卫星(智能手机与微小卫星的结合)及芯片卫星(单个集成电路包含全部航天器

收稿日期:2016-11-28

项目资助:国家自然科学基金(41371430,91438203)。

第一作者:李德仁,博士,教授,中国科学院院士,中国工程院院士,主要研究方向为地球空间信息学理论与方法。drli@whu.edu.cn

功能)研究论证和初步实验,标志着国际上已将构建轻小型遥感卫星星座作为对地观测的发展重点。

由多颗卫星组成观测星座同时在轨运行观测,每天将获取数百TB的影像数据^[5]。以我国为例,到2020年我国将新研制数十颗高分辨率遥感卫星,实现30~50颗遥感卫星同时在轨工作,保守估计每天获取的数据量将达到数百个TB。经过天上数据获取、星地数据传输、地面站接收、处理中心处理与产品分发的数据链的传统遥感影像数据获取和处理模式已难以满足当今对遥感影像数据获取和处理的要求。因此,以用户的任务需求为核心的任务驱动的遥感数据星地协同处理机制成为遥感影像数据获取和处理的发展方向。在任务驱动方式和遥感数据星地协同处理机制下,优化配置星地数据获取资源、计算资源、存储资源、传输资源、接收处理资源,充分利用星地协同的各类算法资源,如多源传感器高质量实时成像、高精度实时几何定位、数据智能压缩、典型目标智能检测和变化检测等处理算法,依据不同地面任务信息(地理位置、观测区域大小、目标类型)智能规划星地协同的数据处理模式与流程,实现自动化、智能化的星地协同处理,从而快速提供任务决策所需的高精度、高质量、高可靠空间决策支持信息,对地观测系统将进入到智能化的新时代^[6]。

随着航空航天技术的发展,逐渐形成一种由星地协同智能对地观测系统与通信卫星、导航载荷的卫星和飞机等空间节点组成,通过动态链接组网,实时获取、传输和处理海量数据,实现天基信息的体系化应用的网络,即天基空间信息网络。天基空间信息网络实现了对全球表面分米级空间分辨率、小时级时间分辨率的数据采集和米级精度的导航定位服务,在时空大数据、云计算和天基信息服务智能终端支持下,通过天地通信网络全球无缝的互联互通,实时地为国民经济各部门、各行业和广大手机用户提供定位(positioning)、导航(navigation)、授时(timing)、遥感(remote sensing)、通信(communication)服务,即PNTRC服务^[7]。

二十一世纪是智能信息化时代,人类希望结合脑科学、认知科学、心理学、统计学和计算机科学等领域的知识制造出类似于人脑智能的机器设备,可以自动地获取数据,智能地处理分析数据,从而帮助人类分析决策。在地球空间信息科学领域,应结合脑科学与认知科学等领域的理论知识,增强天基空间信息网络的感知、认知、决策能力,

进一步提升天基空间信息网络的智能水平,使天基空间信息网络具有类似于脑的智能感知、认知能力,形成对地观测脑(earth observation brain, EOB)。

1 对地观测脑

1.1 脑科学与认知科学的发展

人工智能作为二十一世纪三大尖端技术之一,是对人的意识、思维的信息过程的模拟。人工智能涉及脑科学、认知科学、心理学、统计学和计算机科学等领域的理论知识^[8]。特别是作为人工智能起源的脑科学与认知科学领域的进步,对人工智能的发展具有重大的促进作用。“智能”(intelligence)作为脑科学与认知科学领域的核心概念,自1979年认知科学学会(cognitive science society)在美国成立以来,众多享有盛誉的学术机构组建了各自的脑科学与认知科学研究队伍,极大地促进了脑科学与认知科学的发展^[9]。为了占领人工智能的制高点,世界各国相继开展了不同关于脑科学与认知科学的研究计划。

1990年美国率先提出“脑的十年”(decade of the brain)计划;欧洲紧随其后在1991年推出“欧洲脑的十年”(the European decade of brain)计划;日本也在1996年计划投入20亿巨资以“认识脑”、“保护脑”、“创造脑”为目标推出了“脑科学时代”计划^[10]。2013年美国启动脑科学研究计划(BRAIN Initiative),随后欧盟也启动了人脑计划(the human brain project)^[11]。

我国近年来也非常重视脑科学与认知科学的发展建设,在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》中,将“脑科学与认知科学”列为我国科技长期发展规划的八大前沿科学领域之一。2012年中国科学院启动了战略性先导科技专项(B类)“脑功能联结图谱”项目,在此基础上,中国的“脑科学计划”正在紧张筹划之中,相信未来中国脑科学计划的实施,必将在推动我国脑科学的发展、脑疾病的防治、人工智能的开拓等方面更取得重大研究成果,进入国际前沿,同时壮大我国脑与认知科学研究队伍。

近二十年来,随着脑科学与认知科学领域的科学家们彼此合作与交流,通过多学科理论及实验的协作与整合,及大地促进了人类对心智本质的理解,取得了很多具有理论和应用价值的研究成果,对地球空间信息学领域的智能化发展提供了重要的指导思想与理论基础。将脑科学与认知

科学中的脑感知认知功能集成于天基信息网络系统中,增强系统的感知、认知能力,提升天基信息网络系统智能化水平,实现系统对所获取数据快速处理,提取有用的信息和驱动相应应用,实现脑认知中的感知、认知和行动这三个过程,进而形成对地观测脑。

1.2 对地观测脑的概念及内涵

对地观测脑是一种模拟脑感知、认知过程的智能化对地观测系统,通过结合地球空间信息科学、计算机科学、数据科学及脑科学与认知科学等领域知识,在天基空间信息网络环境下集成测量、定标、目标感知与认知、服务用户为一体的一种智能对地观测系统。对地观测脑实质上是通过天上

卫星观测星座与通讯导航星群、空中飞艇与飞机等获取地球表面空间数据信息,利用在轨影像处理技术、星上数据计算分析技术等对获取的数据信息进行处理分析,获取其中的有用的知识信息服务于用户决策,从而实现天、空、地一体化协同的实时智能对地观测。

人脑有视觉、听觉等功能,通过视觉、听觉等功能获得人类所处环境的周围信息,利用神经元将周围环境信息传送到左右半脑,左右半脑通过推理分析周围环境信息,从而指导人的行为活动。与人脑类比,对地观测脑同样也有视觉、听觉、脑分析等相应功能,对地观测脑的概念模型示意图如图 1 所示。

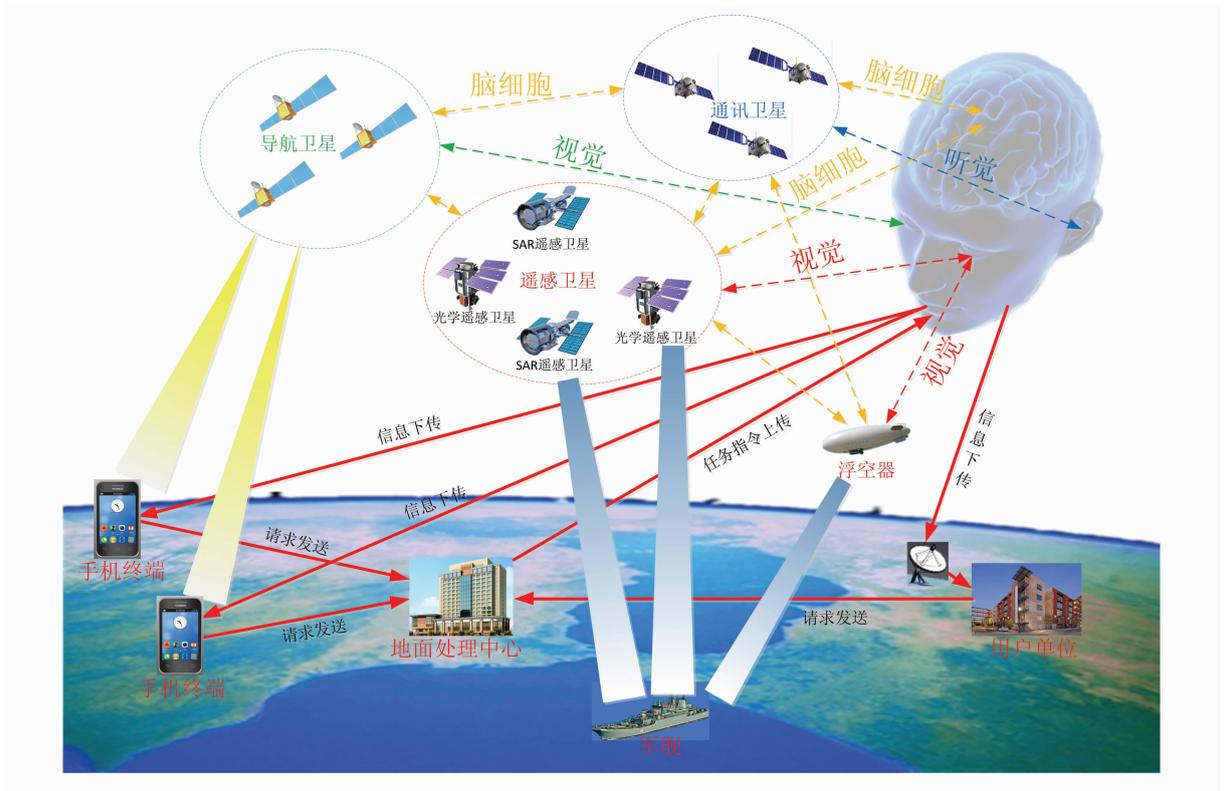


图 1 对地观测脑模型示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Earth Observation Brain Model

在对地观测脑中,天上遥感卫星观测星座、导航卫星星座与空中浮空器等作为对地观测脑的视觉功能,通过视觉功能实时获得目标区域的影像、地理空间坐标等一系列观测数据^[12]。通讯卫星星座作为对地观测脑的听觉功能,通过听觉功能实现视觉功能中遥感卫星观测星座、导航卫星星座、浮空器之间的通讯及信息传递,此外也实现天上对地观测脑与地面控制中心、个体用户及用户单位之间的通讯与信息传递。在对地观测脑中,遥感卫星、导航卫星、通讯卫星、浮空器等设备除了作为视觉、听觉功能外,还充当对地观测脑中

脑的分析节点,类似于人脑中脑细胞,根据用户需求每个脑分析节点分布协同工作,对获取的观测数据处理分析获取用户需求的数据信息^[13]。

对地观测脑实现了端到端的一体化面向用户服务,地面客户端个人用户、用户单位等向地面控制中心发出需求信号,地面控制中心根据需求信号进行任务编码,进而向天上服务端对地观测脑发出任务指令,对地观测脑根据任务指令统筹调度视觉功能中各遥感卫星、导航卫星、浮空器等观测设备,对目标区域进行成像、定位等操作,对地观测脑中各脑分析节点分布协同对在轨观测数据

进行目标检测、信息提取等操作,获取用户需求的数据信息。对获取的用户需求信息通过听觉功能实时上传给用户,实现空地一体化协同实时对地观测^[14]。地观测脑可以回答何时(when)、何地(where)、何目标(what object)发生了何种变化(what change),并在规定的时间(right time)和规定的地点(right place)处把这些正确的信息(right information)推送给需要的人(right people)^[15],实现4W信息实时推送给4R用户。全球用户可实时获得所需的任何数据与信息。在整个观测流程中,从接收任务指令、目标区域数据获取、数据处理分析、数据信息分析下传给用户均在天上服务端对地观测脑中实时完成。

天基空间信息网络为不同领域用户提供定位、导航、授时、遥感、通信,即PNTRC服务。PNTRC服务具体表现为如下方面。

(1) 实时增强导航服务(positioning & navigation):为各种类型用户(包括地面手机用户)提供优于米级的高精度实时导航定位信息^[16];

(2) 精密授时服务(timing):提供高精度时间信息和时间同步信息;

(3) 快速遥感(视频)增值服务(remote sensing):全天时、全天候、实时的获取、处理遥感和视频数据,并将感兴趣的信息及时推送给用户的手机和各类智能移动终端;

(4) 天地一体移动宽带通信服务(communication):克服地面通信网络覆盖范围不足的局限,可为全球用户提供安全、可靠、高速的天地一体化通信和数据传输服务。

对地观测脑作为天基空间信息网络的进一步智能化升级,极大地提升了对地观测系统的感知、认知、指导用户行动的能力。在基本的PNTRC服务的基础上,通过对地观测脑,还可以享受系统的感知(perception)、认知(cognition)服务,即用户向对地观测脑提出应用需求,对地观测脑根据用户需求对目标区域进行感知、认知获得其中隐含的信息,及时反馈给用户,帮助用户全面了解目标区域进而做出决策,从而指导用户行动。

2 对地观测脑需要解决的关键问题

对地观测脑在提供PNTRC+PC服务及过程中,除了应用导航、遥感、通信等领域已有的研究成果外,还需要解决影像在轨处理及信息提取、星上分布协同计算与智能感知、认知等一些新的关键技术问题。

2.1 星上数据实时处理与信息快速生成技术

卫星影像与视频数据量大,星上数据存储、传输等能力有限,对地观测脑将卫星数据获取和信息提取结合在一起,将信息提取模块固化到卫星上,使得数据处理和分析与有效载荷数据获取系统连为一体,实现星上数据实时处理与信息快速生成。从星上数据获取到信息提取整个过程中,需要对星上数据实时进行辐射校正与几何定位等影像预处理操作,然后对校正后的影像进行典型目标在轨智能检测与提取,再对提取目标的影像进行在轨数据智能压缩,对压缩数据进行下传,从而实现有限宽带下传输有效数据最大化。整个过程需要突破影像在轨实时辐射校正与几何定位、典型目标在轨智能检测与提取、影像数据在轨智能压缩等技术性难题。

2.2 星上数据分布协同计算技术

整个系统实现的是端到端的服务,所有的数据获取、信息提取、智能感知、认知工作均在服务端对地观测脑中完成,因此需要星上有强大的计算分析处理能力,这就对星上硬件提出更高的要求。首先是星上智能接口的研究,使地面处理中心的任务指令能被星上处理平台准确接收。需要研制体量更轻、存储量更大、耐热性更强的星上磁盘存储阵。研制性能更优的星上计算处理器,类似于目前星上DSP或者FPGA。由于空天各卫星节点实施分布式协同计算,需要对统筹调度各卫星节点实施协同计算的技术研究。

2.3 数据智慧处理技术

由于要对地观测脑提供感知、认知功能,需要研究更加智能的算法对获取数据进行处理分析,获取其中隐含信息及时反馈给用户,帮助用户全面地了解目标区域,进而做出决策。对多源空间数据高效存储、查询技术的研究,使系统在感知、认知过程中高效准确地获得所需数据。对智慧空间数据挖掘技术^[17]进行研究,从获取的影像、地理空间坐标等数据中获得隐含的知识与信息,实现系统的感知、认知能力。对地球空间数据驱动应用技术进行研究,对感知、认知所得数据信息进行编码,准确地传递给客户端,进而指导用户行动。

3 对地观测脑初级阶段应用实例

对地观测脑初级阶段对海洋目标检测定位的基本流程如图2所示。用户向对地观测脑发出对海上舰艇目标进行检测定位请求,对地观测脑通

过视觉功能光学遥感卫星进行在轨成像,通过星上处理平台对获取的影像实现在轨辐射校正、目标检测、几何定位处理,提取影像中的有效信息。对提取的有效信息通过对地观测脑的听觉通讯卫星^[18],无延迟下传至客户端地面处理中心,地面处理中心根据用户需求将有效信息快速推送给用户,用户根据推送信息做出决策判断。整个过程实现了用户对海洋目标快速准确的检测定位,进而辅助用户做出决策判断。

在对地观测脑初级阶段获取有效信息的过程中,利用对地观测脑视觉获取数据、分析数据的能力,提取用户需要的有效信息。通过对地观测脑的听觉将获取的有效信息传送到地面处理中心,地面处理中心根据用户需求将信息推发给用户。整个过程实现了对特定目标信息实时自动提取,初步实现了对地观测脑的智能感知与认知能力。该研究成果已得到实际应用。

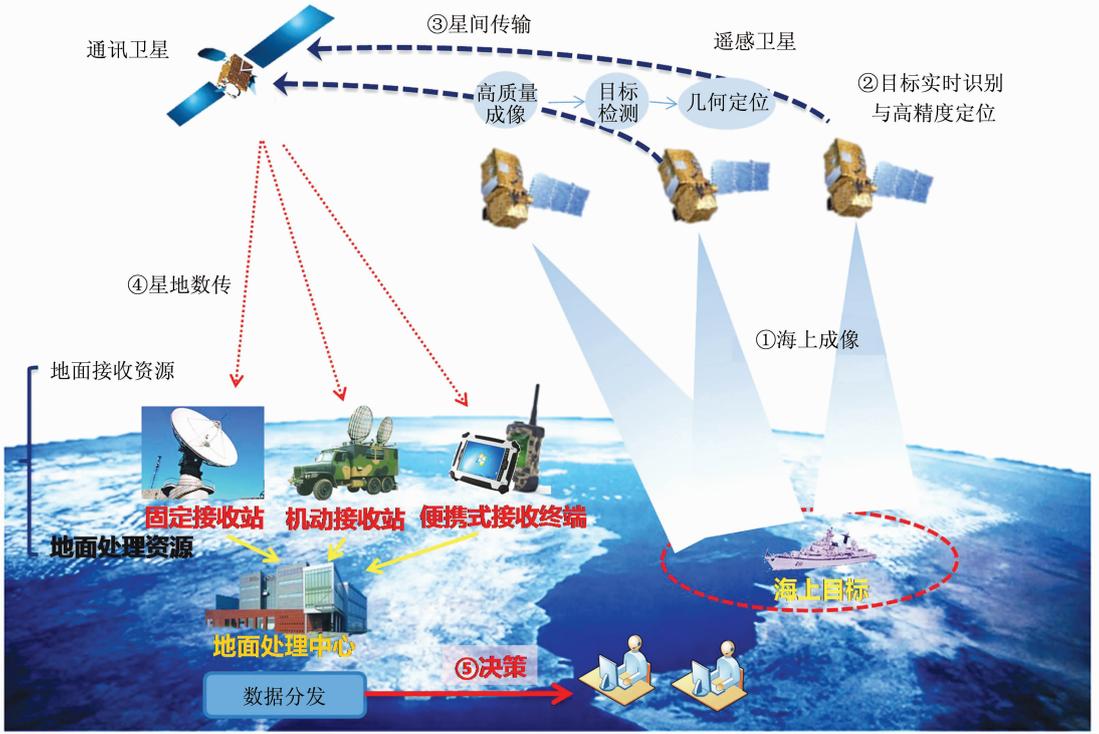


图 2 海洋目标检测与定位智能观测架构

Fig. 2 Ocean Target Detection and Location of Intelligent Observation Architecture

4 结论与展望

经过近十几年高分辨率遥感卫星的快速发展,对地卫星观测模式由最初的单星模式发展为现在的轻小型卫星组建星座,实现了全天候、全方位的对地观测,使得观测重访周期更短、覆盖范围更大以及可以基于特定任务目标需求的快速响应、持续动态监测等。当今对地卫星观测系统有良好的测量、定标、数据获取等能力,但缺乏感知、认知能力。对于未来具有感知、认知能力的智能化对地观测卫星系统的发展,本文提出了对地观测脑的概念,详细介绍了对地观测脑的内涵及需要解决的关键技术,为对地观测脑的实现指明了研究方向。

对地观测脑是基于事件感知的智能化对地观

测系统,为不同领域用户提供实时增强导航、精密授时、快速遥感(视频)增值、天地一体移动宽带通信、智能感知认知等服务。可以想象,未来全球对地观测脑的用户只需通过终端设备,可以随时随地获得全球任何地区的空间信息,这将无疑大大推动对地观测脑的大众化、商业化。但是,我们应该认识到对地观测脑中诸多技术与设备目前还没有实现,需要广大科研人员投身到对地观测脑的研究中,为对地观测脑的早日全面实现做出一份贡献。

参 考 文 献

[1] Li Deren. Introduction to Photogrammetry and Remote Sensing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2001(李德仁. 摄影测量与遥感概论[M]. 北京:测绘出版社, 2001)

- [2] Li Deren. Development Prospect of Photogrammetry and Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12):1 211-1 215(李德仁. 摄影测量与遥感学的发展展望[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(12):1 211-1 215)
- [3] Li Deren. Toward the Development of Remote Sensing and GIS in the 21st Century[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 25(2):127-131(李德仁. 浅论 21 世纪遥感与 GIS 的发展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 25(2):127-131)
- [4] Li Deren, Shen Xin. On Intelligent Earth observation System[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2005, 30(4): 9-11(李德仁,沈欣. 论智能化对地观测系统[J]. 测绘科学,2005,30(4):9-11)
- [5] Zhang Bing. Intelligent Remote Sensing Satellite System[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(3):415-431(张兵. 智能遥感卫星系统[J]. 遥感学报,2011,15(3):415-431)
- [6] Li Deren, Tong Qingxi, Li Rongxing, et al. Some Advanced Scientific Problems of High Resolution Earth Observation[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 42(6): 805-813(李德仁,童庆禧,李荣兴,等. 高分辨率对地观测的若干前沿科学问题[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(6):805-813)
- [7] Li Deren. Towards Geo-spatial Information Science in Big Data Era[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(4):379-384(李德仁. 展望大数据时代的地球空间信息学[J]. 测绘学报,2016,45(4): 379-384)
- [8] Li Deyi. AI Research and Development in the Network Age[J]. *CAAI Transaction on Intelligent Systems*, 2009, 4(1):1-6(李德毅. 网络时代人工智能研究与发展[J]. 智能系统学报,2009,4(1):1-6)
- [9] Zhou Haotian, Fu Xiaolan. Cognitive Science — the Science Frontier of New Millennium[J]. *Advances in Psychological Science*, 2005, 13(4): 388-397(周昊天,傅小兰. 认知科学——新千年的前言领域[J]. 心理科学进展,2005,13(4): 388-397)
- [10] Wang Xiaodong, Zhang Lichun, Xiao Xinyu. Exploration of the Potential of Brain in Learning; Research on Cognitive Neuroscience[J]. *Open Education Research*, 2011, 17(5):40-51(汪晓东,张立春,肖鑫雨. 大脑学习探秘——认知神经科学研究进展[J]. 开放教育研究,2011,17(5):40-51)
- [11] He Rongqiao, Liu Li. Current Situation and Frontier of Brain and Cognitive Science Research [J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2016, 43(4): 295-296(赫荣乔,刘力. 脑与认知科学研究的现状与前沿[J]. 生物化学与生物物理进展,2016,43(4): 295-296)
- [12] Li Deren, Shao Zhenfeng. The New Geographic Information Age[J]. *Science China Information Sciences*, 2009, 39(6):579-587(李德仁,邵振峰. 论新地理信息时代[J]. 中国科学,2009,39(6):579-587)
- [13] Pei L, Guinness R, Chen R Z, et al. Human Behavior Cognition Using Smartphone Sensors [J]. *Sensors*, 2013, 13(2): 14 02-1 424
- [14] Li Deren. On Space-Air-Ground Integrated Earth Observation Network[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2012, 14(4): 419-425(李德仁. 论天地一体化对地观测网络[J]. 地球信息科学学报,2012,14(4): 419-425)
- [15] Li Deren, Shao Zhenfeng. The Intrinsic Property of Geo-informatics is Service[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2008(4):88-98(李德仁,邵振峰. 信息化测绘的本质是服务[J]. 测绘通报,2008(4):88-98)
- [16] Li Deren. Surveying and Mapping Development Trend and Our Mission in 21 Century[J]. *China Surveying and Mapping*, 2005(2):36-37(李德仁. 21 世纪测绘发展趋势与我们的任务[J]. 中国测绘,2005(2):36-37)
- [17] Di Kaichang, Li Deyi, Li Deren. Cloud Theory and Its Application in Spatial Data Mining and Knowledge Discovery[J]. *Journal of Image and Graphic*, 1999, 4(11):930-935(邸凯昌,李德毅,李德仁. 云理论及其在空间数据挖掘和知识发现中的应用[J]. 中国图象图形学报,1999,4(11):930-935)
- [18] Li Deren, Li Qingquan. The Technique Integration of the Spatial Information and Communication[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(Z2):61-62(李德仁,李清泉. 论地球空间信息技术与通信技术的集成[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2001,26(Z2):61-62)

From Earth Observation Satellite to Earth Observation Brain

LI Deren^{1,2} *WANG Mi*^{1,2} *SHEN Xin*^{1,2} *DONG Zhipeng*¹

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

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

Abstract: As we entered the 21 century, after more than ten years of rapid development of high resolution remote sensing satellite, the earth observation satellite system has developed from the original single satellite observation model to the present light and small satellite constellation observation model. All-weather and all-directional earth observation can be realized. The satellite constellation, communication satellites, navigation satellites and aircrafts are linked through dynamic linking network to form space-based information network to realize intelligent earth observation in the future. To make the system more intelligent and improve perception and cognition of system as well as quick response ability, earth observation brain (EOB) is proposed in this paper. EOB is the intelligent earth observation system based on events perception. In this paper, the concept model of EOB and the key technologies needed to be solved are introduced in detail, and an example is given to illustrate the process of perceptual cognition in the primary stage of the EOB. In the future, EOB can observe when, where, what change of what object to push these right information to right people in the right time and right place. Globally all kinds of users will obtain related geospatial data, information and knowledge in real time through EOB.

Key words: earth observation satellite; earth observation brain; intelligent earth observation system; spatial perception and cognition; quick emergency ability; space-air-ground co-observation

First author: LI Deren, PhD, professor, academician of Chinese Academy of Science and Chinese Academy of Engineering, specialize in theory and methodology of geomatics. E-mail: drli@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41371430,91438203.

