

用于铁路勘察的机载 LiDAR 数据 生产 DEM 方法研究

韩祖杰^①, 张弛^②, 赖旭东^{②③}

(^① 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142; ^② 国家遥感中心, 北京 100036;

^③ 武汉大学, 武汉 430079)

摘要: 机载 LiDAR 数据是一种比较好的 DEM 生产的数据源, 尽管生产流程基本成熟, 但其中的一些关键技术还不能满足生产需求, 需要在行业应用时加以深入研究。针对铁路勘察的具体特点和要求, 提出了一种综合使用专业软件和多种航空摄影测量技术手段, 满足铁路勘察设计需求的机载 LiDAR 数据生产 DEM 方法, 并将其运用在生产实践中, 大规模生产的结果表明, 本流程和方法是可行的。

关键词: 铁路勘察; 机载激光雷达; 滤波; DEM

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.03.011

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)115-0061-06

Research on DEM Production Based on Airborne LiDAR Data for Railway Survey

HAN Zujie^①, ZHANG Chi^②, LAI Xudong^③

(^① *The Third Railway Survey and Design Institute, Tianjin 300142;*

^② *National Remote Sensing Center of China, Beijing 100036;*

^③ *Wuhan University, Wuhan 4300789*)

Abstract: The airborne LiDAR data is a useful source of DEM production, although their production processes matured, but some of the key technologies can not meet the production needs. So, further study is needed in industry oriented applications. For the specific characteristics and requirements of railway investigation, this paper proposed a DEM generation method of combining specialized software with a variety of aerial photogrammetry technology to meet the needs of the railway survey and design, and apply this method to the production practice. The results of large scale production show that the processes and methods are feasible.

Key words: railway survey; airborne LiDAR; filter; digital elevation model

1 引言

使用机载 LiDAR 数据生产 DEM 是一种比较新的生产手段, 具有较好的行业应用前景^[1]。目前, 我国已经有许多行业和部门使用机载 LiDAR 技术生产 DEM, 尽管使用目的和精度需求各不相同, 这些实验性的生产都获得了不同程度的成果^[2~4]。目

前, 铁路建设任务十分繁重, 给铁路勘察设计工作带来了巨大压力。铁路勘察设计具有工期紧、精度高等特点, 需要进行大规模的航空摄影测量工作, 以快速高效地获取地面信息。虽然经过几十年的发展, 航空摄影测量技术的生产流程和作业方式比较固定和成熟, 但是由于航测资源有限、航空作业受天气、空域协调影响, 以及航测方法本身的条件限制(树木

收稿日期: 2010-05-15 修订日期: 2010-11-24

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2009CDB229), 数字制图与国土信息应用工程国家测绘局重点实验室开放研究基金资助项目(GCWD201006)。

作者简介: 韩祖杰(1972~), 男, 高级工程师, 主要从事摄影测量与遥感在铁路勘察设计中的应用工作。

E mail: hanzujie@tsdig.com

遮挡、高程精度等),使许多铁路勘察项目无法保证工期。机载 LiDAR 技术能够快速获取高精度 DEM,具有数据获取简单、高程精度高、受天气影响小等特点,能够很好地满足铁路勘察设计的需求^[5]。机载 LiDAR 技术应用到铁路勘测中,能够大大减轻人力资源,提高勘测质量和效率,同时推动铁道勘察设计、至施工、运营等阶段的建设,经济效益和社会效益十分显著,目前在铁路行业中已经开始较大规模地使用机载 LiDAR 数据生产 DEM 产品。但是,尽管机载 LiDAR 数据生产 DEM 的流程基本形成,但其中的关键技术仍然需要进一步研究,尤其是如何提高滤波的精度和自动化程度,以及后续工作中如何提取出特征线和特征点。

本文针对铁路勘察设计的特点,综合使用 TerraSolid 软件和其他航空摄影测量处理手段,探讨满足铁路勘察设计需求的机载 LiDAR 数据生产 DEM 方法,并将其运用在生产实践中,已经完成的大量生产证明本流程和方法是可行的。

2 机载 LiDAR 数据生产 DEM 方法

2.1 TerraSolid 软件滤波方法

TerraSolid 软件滤波使用的是基于不规则三角网(TIN)的滤波算法,这种算法是由 Axelsson 于 2000 年提出的^[6],其原理为:首先,获取一定的地面种子点组成初始的稀疏不规则三角网(TIN, Triangulated Irregular Network),然后对各点进行判断,如果该点到三角面的垂直距离及角度小于设定的阈值,将该点加入地面点集合,实现地面点的增加。接着使用所有确定的地面点,重新计算不规则三角网,然后再对非地面点集合内的点进行判别。如此迭代,直到不再增加新的地面点,或者满足给定条件为止。

TerraSolid 软件生产 DEM 的步骤如下:

- (1) 点云分块。将大数据量的点云数据依据点云密度,分成合适的大小;
- (2) 分离低奇异点。采用局部统计分析的方法,剔除高程明显低于周围点高程的错误点;
- (3) 分离地面点。采用基于 TIN 的滤波算法,得到地面点;
- (4) 地面点优化。再次运用步骤(2)的方法,对地面点进行处理,剔除低于真实地面的点;
- (5) 地面点约简。对地面点集,按照给定的精度进行约简,得到关键点,以减少数据量;
- (6) 生成 DEM。

处理的关键是选取阈值,使用不同的阈值会产生不同的滤波结果。在处理过程中,有很多参数需要设置。这些参数包括:去除奇异点时,设置搜索半径,限定搜索范围;设置限差,限定划分为奇异点的阈值;设置点数,限定需要比较的点的数量。确定地面种子点时,设置最大建筑物尺寸,即设定确定种子点的范围。分离地面点时,设置迭代角度和迭代距离,迭代角度表示当前点与其投影所在三角形面最近顶点的连线与三角面的夹角(α , β , γ)中的最小值,迭代距离表示当前点与其投影所在三角形面的垂距(图 1)。针对测区的植被覆盖和地形起伏情况,必须找到分离地面点的最佳迭代角度和迭代距离参数^[7]。

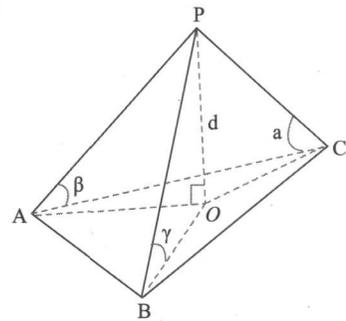


图 1 TerraSolid 滤波中需要设置的参数

2.2 TerraSolid 软件滤波的特点

作为目前主流的机载 LiDAR 数据处理商业软件, TerraSolid 生产 DEM 的优点在于:具有相对稳定的结果;可以使用宏命令的方式对大数据进行处理,自动化程度较高;可以使用 MicroStation 平台的工具,对数据和处理结果进行观察和评估;提供了一些编辑工具和方法,具有一定的交互功能。但是,这种生产 DEM 的方法也有明显的缺点,如有大量的参数需要设置,这些参数的意义需要掌握并不断进行调试;由于地形地物的复杂性,参数对不同区域的数据没有普适性,地形分区太大则无法使用一组参数得到较好的结果,地形分区太小则大大增加劳动强度。因此,仅仅通过自动分类,很多情况下无法满足工程的需要,需要人工参与,使用手动分类的方式对自动分类结果进行修正,以满足生产的需要。

3 针对铁路勘察的机载 LiDAR 点云滤波方法和流程

3.1 铁路勘察的特点及对 DEM 的需求

铁路大中型建设工程在项目决策阶段开展预可研和可研性研究,在实施阶段开展初步设计和施工

图设计。预可研主要是对线路方案进行规划,确定线路的大致走向,对工程数据精度要求较低,一般需要搜集小比例尺的地形图和低精度的 DEM 数据即可。可研性研究根据国家批准的铁路中长期规划或项目建议书开展初测,确定建设工期和投资估算,论证项目建设的可行性,这一阶段需要进行中等比例尺的测绘工作。实施阶段需要的初步设计文件是确定建设规模和投资的主要依据,要根据批准的可行性研究报告开展定测,主要有平面和高程控制测量、中线测量、横断面测量及相关专业测量等工作,这一阶段需要精确的 DEM 等数据。

铁路勘察设计中 DEM 的应用主要包括两个方面:基于 DEM 的可视化分析,包括大面积铁路选线与方案对比选择;重点工点和工程地形数据计算,包括基于 DEM 的横纵断面提取、等高线绘制、地形图制作等。

在铁路勘察应用中,应根据不同设计要求选择不同形式和精度的 DEM 数据。在进行大面积铁路选线和方案比较时,可以采用规则格网 DEM 形式,格网间距 5m~10m。将 DEM 制作成以浮点型数据类型保存的 Tiff 格式文件。在 Tiff 格式的 DEM 上进行线路方案的展示、查看线路周边地形地貌、地形填挖计算和填挖之后的效果展示等。对于重点工点和工程数据计算则应采用“TIN 进行构网+特征线”的形式,格网间距 1m。在绘制横断面、纵断面时,需要精确的沟坎等地形突变点信息,并通过三角网求交运算,获取所有地形突变点,得到精确的断面。

总体而言,铁路勘察对 DEM 的要求是,以带状成图为主,在铁路中线附近需要高精度的平面和高程数据,在离中线较远处的精度可以做适当降低,在大面积的铁路选线时,可以使用更小比例尺的 DEM 数据。

3.2 针对铁路勘察的机载 LiDAR 点云滤波流程和方法

根据应用目的不同,点云滤波可分为两类:区域点云滤波和带状点云滤波。区域点云滤波则是主要考虑以生产 DEM 和等高线为目的进行的点云滤波方式,带状点云滤波主要是考虑工程中以纵横断面为生产目的进行的有针对性的点云滤波方式,两种滤波方式的主要区别在“线”和“面”,因涉及的范围不一样,滤波过程中考虑的重点也不一样。针对铁路测量的特点以及生产实践中的经验,本文提出一种能够兼顾铁路勘察效率和精度需要的 DME 生产流程。

种能够兼顾铁路勘察效率和精度需要的 DME 生产流程。

3.2.1 主要流程

(1) 分区处理。通常铁路勘察设计的比较线方案较多,勘察范围较大,采集的数据量较大,应对整个测区进行分区处理,分区时,应根据软硬件条件和测区地形起伏、植被等实际情况进行确定。当分块过大,地形起伏和植被分布情况不均匀时,会造成大量的错分现象(黑色为地面点,白色为非地面点);将该区域分成 4 个小块,分别进行滤波操作,会大大改善滤波质量(图 2)。

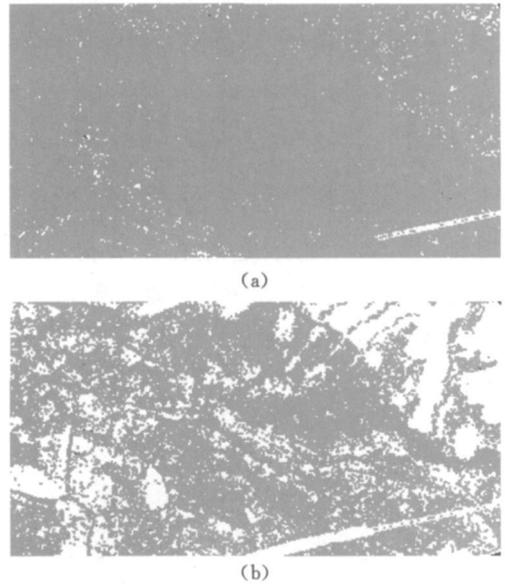


图 2 分区处理前(a)和后(b)效果比较

(2) 去除植被。使用多次回波信息,将多次回波中的首次回波和中间次回波点(主要是植被)剔除,这样可以减少大量的数据处理工作。

(3) 自动滤波。使用 TerraSolid 进行自动处理,包括单个低点和群低点剔除、奇异高点的剔除和地面点分离。应根据分区内地形地物的实际情况,设置各种参数,再使用宏命令的方式,对机载 LiDAR 数据进行自动处理,得到初步的地面点。在这个过程中,需要通过拉断面、叠加 DOM 或立体观测等方法对结果进行审查,根据滤波结果调整参数,以达到最好的滤波效果。

(4) 人工精细分类。经过基于宏命令的自动滤波处理后的数据,在局部会存在错分和漏分的情况,尤其是在铁路设计中线附近,其质量无法满足工程的需要,还需要人工进行更为精细的分类,以满足生产要求。

流程框图见图 3:

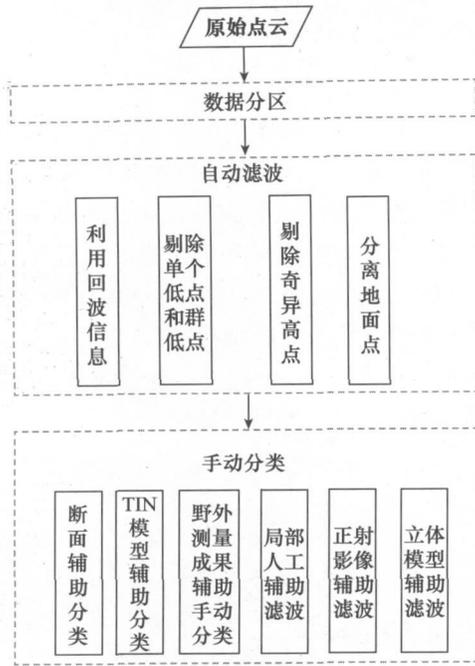


图3 流程框图

3.2.2 机载 LiDAR 数据手动分类方法

为了保证 DEM 质量,手动分类至关重要,需要生产单位重视和研究。本文重点对这些方法做总结和探讨。

(1) 断面辅助滤波法

断面辅助滤波是最常用的手动滤波方法,利用拉断面工具沿直线拉断面,并在单独的视窗中显示,通过观察投影到断面的点云情况来判断自动分类的正确性,不正确的分类点需要使用点云分类工具进行手工编辑,重新划分。

(2) TIN 模型辅助滤波

TIN 模型辅助滤波是利用分离出来的地面点生成能实时更新的 TIN 模型,从 TIN 模型的表面粗糙情况判断滤波的结果。

(3) 手工圈定 AOI 滤波

地形千差万别,即使在很小的范围内,也很难通过自动滤波一步到位。例如在山区,不同的山头坡度不一样,同一个山头不同方向的坡度也不一样,导致同一套参数对同一个山头地形误判的情况。可以手工圈定需要重新滤波的范围(AOI),调整参数,再进行自动滤波,提高滤波质量。

(4) 正射影像辅助滤波

采用与激光点云严格配准后的 DOM 辅助手动分类。将分类结果叠加到正射影像上,判断滤波效果。如图 4,房顶上的激光点被误分为地面点,就需要手动纠正分类。

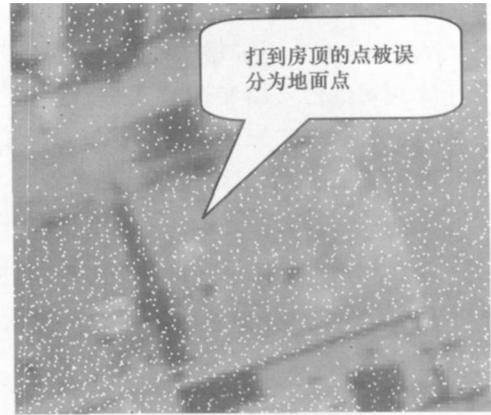


图4 正射影像辅助滤波

(5) 野外测量成果辅助滤波

在植被茂密的地区,地面激光点比较少,不足以构建真实地面模型,可以加入野外实地测量点与激光脚点进行比较,来辅助分类。图 5 中白色小方框表示野外实测的地形点,借助该野外地形点则可以大致判断地形的走势(下图中白色折线),从而对附近的点进行正确分类。



图5 使用外业点辅助滤波

(6) 立体模型辅助滤波

有些情况下仅通过横断面、TIN 模型等无法判断点云滤波结果的正确性,在立体模型下进行三维可视观测,就能够较好地判别激光脚点的类别,提高点云滤波的精度。立体模型的来源主要有两种:一是量测型相机获取的航空立体像对;二是机载 LiDAR 系统携带的非量测相机获取的数码相片生成的立体模型。

4 实验及分析

经过摸索和总结,本文提出一种满足铁路勘察需求的 DEM 生产流程。首先根据先验知识设定参数库,根据地形等级、植被密集程度、建筑物数量、数据采集季节、激光脚点数量等划分为不同的类别,每组类别对应一组经过验证效果较好的参数,这些参数构成了参数库。在作业时,首先依据参数库中的参数进行设置,实现快速自动滤波,再根据铁路勘察的不同阶段,对滤波结果进行处理。如果是铁路选线阶段,则根据滤波结果的三维视图进行观察,对比较大的错漏之处做适当调整即可。进行定测生产时,先使用 TerraSolid 提供的手工编辑工具对滤波

结果进行处理,一般是先进行观察三维场景,配合拉断面观察的方法,手工圈定有成片错漏的地方,调整参数,进行自动滤波,对于零散的点,可以使用点编辑工具进行去除。经过调整后,可以使用正射影像辅助滤波,对滤波效果进行观察和修正。对于铁路中线附近的数据,由于精度要求很高,采用野外测量成果辅助滤波和立体模型辅助滤波的方法,这些方法都是具有铁路特点的方法,利用了铁路勘察前期获取的资料,具有精度高、操作性强、成果稳定可靠等优点,缺点是需要专业操作人员,还有仪器设备等硬件要求,时间和财力的花费都要多些。

使用上述方法,本文在铁路实际项目中进行了生产实验,并对结果进行了分析。实验区位于湖南省境内,全线约450km,以山区为主,地势崎岖,地形破碎复杂,多属于II、III级地形,而且植被异常茂密,呈高、中、低多层分布。采用Leica ALS50激光扫描仪和RCD数码相机对该实验区进行了数据采集,扫描频率为90Hz,脉冲频率为150KHz,扫描角度为75°,飞行平台为运五飞机。考虑到植被对数

据获取的影响,实验通过重复飞行以加大点云密度,航飞里程为2620km,航飞面积为1880km²。

4.1 精度分析

铁路工程应用上的DEM精度评定主要采用外业实测高程点作为评定参考,通过内插出外业实测平面位置处的高程与实测高程进行对比,计算其较差和中误差。检查点选取:按照不同地貌类型(平坦地区、山地和丘陵),不同地表覆盖类型(裸地、稀疏植被、茂密植被),不同地物类型(桥下、建筑物下)均匀布设高程检查点,用全站仪或RTK测量检查点高程,用来检核DEM内插时的误差,精度计算公式(式1)和精度统计(表1)如下:

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - H_0)^2}{n}} \quad (1)$$

rms- DEM 高程中误差

n- 检查点个数

H_i- 根据外业实测点的平面坐标在DEM上内插后点的高程

H₀- 外业实测高程

表1 高程精度统计

点类型	数量	$\Delta \leq 0.1m$	$0.1m < \Delta \leq 0.2m$	$0.2m < \Delta \leq 0.3m$	$\Delta > 0.3m$	中误差
硬路面	200	148	49	2	1	0.092
其他高程点	276	195	75	6	0	0.087
茂密树下	68	39	24	3	2	0.147
草坪中	130	67	50	11	2	0.136
线位中心	78	46	32	0	0	0.101
线位外50m	102	98	4	0	0	0.041
无植被软土地	50	8	29	6	7	0.212
茂密软土草地	31	31	0	0	0	0.039
路边草地	80	71	3	6	0	0.079

经对表1进行分析,得出如下结论:

(1) 无植被或少植被软土地检测点的高程中误差达到了0.212m。其原因主要为:泥土的反射率较低,例如,对波长为0.9μm的激光,其反射率为24%,而落叶树到达了60%,这会影响到LiDAR的测距精度^[8];激光点可能会穿透浮土,造成测距误差;外业实测高程点时,架设设备产生沉降,造成实地数据采集不准确。

(2) 其余类型的高程检测中误差均在0.2m之内,且大部分在0.1m之内,能满足1:500地形图对I级地形高程精度的需要^[9]。

4.2 经济效益分析

采用机载LiDAR技术进行铁路定测,生产高精度DEM,能够极大地减少外业工作量,加快生产速度,节约生产成本。据统计,仅沪昆铁路长沙至芷江段全长400余公里的勘测任务,采用机载LiDAR技术比传统方法缩短勘测周期70%,减少人力投入30%,还降低了环境污染,节省了能源,实现了高效、环保的铁路勘测。

5 结束语

针对铁路勘察设计定测环节的特点和要求,

本文提出了一种机载 LiDAR 数据生产 DEM 的流程和方法,该流程进行的生产实践证明,使用机载 LiDAR 数据生产 DEM 产品能够满足铁路勘察设计的需求,减少外业工作量,加快生产速度,节约生产成本,推动生产效率的提高。在数据采集和加工生产的过程中,需要针对实际地形和需求的不同,进

行不同的处理和选择,尤其是对于无植被或少植被软土地,需要增加实测点的数量,对 LiDAR 数据进行纠正和控制,以满足规范精度。对于大多数地形类型,直接使用机载 LiDAR 数据,按照本文提出的本流程和方法进行生产,能够满足现阶段大规模铁路勘察设计的需求。

参考文献

- [1] Liu XY. Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues[J]. Progress in Physical Geography, 2008, 32(1): 31-49.
- [2] Stephen A. White. Utilizing DEMs derived from LIDAR data to analyze morphologic change in the North Carolina coastline[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(1): 39-47.
- [3] Shan Jie. Urban DEM generation from raw lidar data: A labeling algorithm and its performance[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2005, 71(2): 217-226.
- [4] Murphy PNC. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: A comparison and field verification[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(12): 1737-1754.
- [5] 王长进. 机载激光雷达铁路勘察技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [6] Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2000(33): 110-117.
- [7] TerraSolid Introduces. 2008.
- [8] 张小红. 机载激光扫描测高数据滤波及地物提取[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [9] 铁路勘测细则[Z]. QJSSy034-2000.

我国空间信息技术及软件产业在“十一五”期间取得快速发展

“十一五”期间,在国家“863”计划、支撑计划等科技计划支持下,我国空间信息技术及软件产业取得了巨大发展。网格地理信息系统、真三维地理信息系统、高可信地理空间数据库管理系统、统计遥感和多源遥感数据综合处理与服务等系列技术系统被列为国家重点科研项目,网格环境下海量数据空间分析与处理服务、空间信息快速获取与自动化处理、网络化分发服务、多时态真三维地理信息数据库构建与整合、多源空间数据集成应用、自适应空间数据引擎、规模可伸缩空间数据模型、高分辨率多源卫星遥感、多种卫星导航定位数据获取与服务、特殊地区高精度智能导航定位等一批核心和关键技术获得了突破,取得了120项专利和550项著作权,改变了我国空间信息核心技术受制于人的被动局面,为“十二五”的大发展奠定了坚实的技术基础。

在“863”计划等国家科技计划的持续支持下,我国已经确立了结构优化、布局合理、市场有序的空间信息软件体系,研发出以MapGIS、SuperMap、BeyonDB、GeoBean、GeoGlobe、Titan、GeoWay、DPGRID等为代表的国产自主品牌软件,形成了与国际品牌软件竞争的新态势。国产空间信息技术软件已在全国30多个领域、众多行业部门以及国民生活中得到广泛应用,特别是在我国地质信息调查、铁矿资源潜力预测与评价网格应用等多个国家重点领域得到系统性推广,有效促进了国家信息化建设,形成了以航空遥感和卫星遥感为主体的遥感应用框架、以智能导航定位为内容的大众化服务体系,率先策划并倡导了“低碳遥感”大规模高分辨率航空遥感影像自主采集新模式,空间信息理论探索、规范制定、区域性试验、信息系统建立、行业应用和人才队伍建设取得飞跃发展,实现了以框架数据生产、服务系统开发、信息资源整合为内容的国家、省、市多级空间信息共享服务平台,建成了由“一个网”(全球卫星定位综合服务网)、“一张图”(国家基本比例尺地形图)、“一个平台”(国家空间信息公共服务平台)组成的多维一体化“数字中国”,形成了具有自主知识产权的空间信息软件和应用服务体系。近年来,空间信息软件产业规模和效益显著提高,空间信息资源得到高效利用,它在上游带动了计算机、网络、移动通信产品、测绘仪器等设备的生产和制造,以及各种系统软件和工具软件产业的发展;中游直接带动了地理信息系统产业、遥感产业、卫星导航定位产业的发展,带动了地理信息数据生产、技术服务和地理信息系统应用市场的发展;下游带动了各个领域、各行业的信息化建设。产业增幅超过300%,产值突破1000亿元,建立了60个省市级产业基地,造就了一批具有国际竞争力的空间信息软件企业和集团,显著提高了我国空间信息软件产业的创新服务能力。

“十一五”成果的广泛应用,将有力地推动政府决策、资源管理、环境监测、军事战略、反恐、紧急事务处理、个人位置服务等各行各业的国家信息化进程,全面实现国产空间信息软件产业自主创新和跨越式飞速发展。