坚持政产学研用 实现中国遥感卫星质量的飞跃
——以我国第一颗民用测绘卫星“资源三号”为例*

李德仁 张 过

(武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430079)

摘要 近来,“资源三号测绘卫星”的成功发射和规模化应用引起了高度关注,成果入选2012年中国高等学校十大科技进展。文章简要阐述“资源三号测绘卫星”从立项到应用的历程,探讨政产学研用协同创新模式,叙述“资源三号测绘卫星”的主要性能指标和应用范围。通过与国外同类卫星的比较,表明我国有能力发展一流水平的高分辨遥感卫星,实现我国卫星遥感从有到好的重大转变,推进我国遥感卫星的产业化发展。

关键词 政产学研用,资源三号测绘卫星,几何精度,几何检校

DOI:10.3969/j.issn.1000-3045.2013.Z01.003

李德仁院士

随着改革开放的不断深入,我国卫星事业发展经历了从无到有、由弱到强的历程,至今共发射约100多颗不同类型的人造卫星,目前在轨飞行工作的卫星约50多颗,包含气象、海洋、环境减灾、资源和测绘等遥感卫星;北斗导航定位卫星;通讯卫星;科学试验卫星;探月和载人飞船等。在轨运行1年的“资源三号测绘卫星”(简称“资源三号”)遵循政产学研用,实现了我国卫星从有到好的历史性转变。

卫星测绘是当代测绘科技发展的必然趋势,是我国测绘事业以及国家安全保障的迫切需求,也是一个国家对地观测水平的重要标志。但长期以来我国卫星影像的精度不高,基本无法测图,与国外相比存在巨大差距。我国一直依靠航空影像和国外卫星影像进行测图,国产高精度卫星数据获取与处理技术已成为制约我国测绘和地理信息发展的最大瓶颈。

2012年1月9日,长征四号乙运载火箭,成功将我国第一颗高分辨率立体测图卫星“资源三号”送入太空,火箭点火起飞约12分钟后,西安卫星测控中心传来的数据表明,“资源三号”卫星与火箭分离,进入高度约500公里、倾角约97.5度的太阳同步轨道,卫星发射取得圆满成功。1月11日上午,4台相机成功开机,获取了第一批卫星图像。“资源三号”是我国自主设计和发射的第一颗民用高分辨率立体测图卫星,主要用于1:5万立体测图及更大比例尺基础地理产品的生产和更新以及开展国土资源调查与监测。“资源三号”的成功发射和规模化应用,开创了我国卫星立体摄影测量的新纪元,对我国测绘事业的发展具有革命性意义。

* 收稿日期:2013年3月15日

1 立项阶段:政产学研

2005年1月7日,在国家测绘局向国务院领导汇报工作会议上,李德仁院士提出发射我国系列测绘卫星的建议,得到了国务院领导的支持。2006年9月,根据我国航天卫星平台的发展和应用经验,对比了各种卫星平台的特点和测绘卫星的高精度要求,决定“资源三号”采用我国资源卫星系列使用的大卫星平台,卫星平台的主要参数如表1[1-3]。

表1 “资源三号”测绘卫星平台参数

平台指标	指标参数
卫星重量	2 650千克
星上固存容量	1TB
平均轨道高度	505.984公里
轨道倾角	97.421度
降交点地方时	10点30分
轨道周期	97.716分钟
回归周期	59天
设计寿命	5年

“资源三号”上搭载4台光学相机,其中3台全色相机按照前视22度、正视和后视22度设计安装,构成了三线阵立体测图相机;另一台多光谱相机包含红、绿、蓝和红外4个谱段,用于与正视全色影像融合和地物判读与解译。为了保证卫星影像的辐射质量,4台光学相机的影像都是按照10比特进行辐射量化,4台相机的主要参数如表2[2,3]。

在此基础上,国家测绘地理信息局组织中国测绘科学研究院、航天科技集团第五研究院、武汉大学等相关部门研究人员,进行测绘卫星指标分解、指标论证和验证等工作。首次建立了高分辨率光学遥感卫星辐射几何一体化仿真平台,解决了测绘卫星总体技术指标设计的仿真难题。发展了基于姿态运动学的姿态仿真模型,研发了功率谱合成等方法,实现了不同姿态确定精度、不同稳定度、长短周期变化以及高频颤振等姿态模拟;对轨道误差、内方位元素误差和时间同步误差分别建立了轨道动力学仿真模型、内方位元素拟合模型和TDI时间积分模型;构建了全链路辐射仿真技术,发展了光学系统成像退化模型和电子系统成像退化模型,实现了地面辐亮度场建模、全色相机和多光谱相机辐射响应模拟、静态/动态MTF模拟、SNR模拟、TDICCD成像数值积分器模拟;基于逆向蒙特卡罗光线追踪等方法,自主构建了辐射几何一体化仿真平台,实现了卫星总体技术指标设计的定量化。在

表2 “资源三号”测绘卫星载荷主要参数

载荷参数	三线阵相机	多光谱相机
光谱范围	0.5—0.8μm	蓝:0.45—0.52μm 绿:0.52—0.59μm 红:0.63—0.69μm 近红外:0.77—0.89μm
地面像元分辨率	下视:2.1m 前后视:3.5m	5.8m
焦距	1 700mm	1 750mm
量化比特数	10bit	10bit
像元尺寸	下视24 576(8 192*3)×7μm; 前后视16 384(4 096*4)×10μm;	9 216(3 072*3)×20μm
静态传函	优于0.2	优于0.2
幅宽	52km	52km
视场角	6°	6°

该平台模拟了大量的平面影像、立体影像和多光谱影像，对多种条件下生成的仿真数据进行了立体测图精度的评价，构建了星地闭环验证的卫星精度指标预估体系。

在详细指标论证和产业部分能力分析的基础上，2008年，“资源三号”批复立项，进入研制阶段。

2 研制阶段：产学研

2.1 研制总要求论证

测绘卫星是用于高精度三维立体测图的遥感卫星，其特点是天地一体化程度高，设计难度大，精度要求高，是遥感卫星中技术难度极大的卫星。因此需要解决的关键问题是在核心载荷元器件受限于国外情况下，如何打破国产卫星系统定位精度长期停留在200m，内精度只达到3—4像元的现状，使“资源三号”影像测图的平面和高程精度达到米级的要求。

针对1∶5万立体测图的应用需求，武汉大学和中国测绘科学技术研究院研究人员推导了包括相机分辨率、光学系统误差、焦平面误差以及星敏感器姿态测量误差、陀螺系统误差和漂移误差、姿态稳定度和卫星颤振、轨道实时和事后处理误差、时间同步误差、基高比等在内的全链路成像过程误差公式，建立了严密的光学卫星线阵多中心投影摄影测量模型，形成了高精度光学立体测图卫星精度分析理论体系。与航天科技集团第五研究院一起，提出了采用2—5米分辨率三线阵测绘相机进行1∶5万比例尺立体测图的技术方案，制定了《“资源三号”卫星研制总要求》，构建了总体技术指标体系。

研究人员针对卫星下传的影像数据质量，提出了一套面向测绘等卫星应用的遥感影像压缩及质量评价方法，构建了我国光学遥感卫星影像压缩质量评价体系。自主研发了JPEG2000、SPIHT、JPEG-LS等压缩算法，实现了星上数据高保真、可调压缩技术；自主设计了影像构像质量的综合性评价指标，对多种压缩比、采用多种数据、运用多种方法、对多种应用目标进行了上千幅影像的压缩试验和评价。提出了我国光学测绘卫星影像压缩比一般不应超过4∶1的指标，改变了国产高分辨率卫星长期采用8∶1压缩比的现状。该研究成果填补了国内空白，达到国际先进水平。

2.2 精心研制和精细质量控制

为了满足《“资源三号”卫星研制总要求》中高精度和高稳定性要求，航天科技集团研制队伍采用双频GPS作为轨道测量设备，采用2个国外星敏和1个国产星敏加上高精度的陀螺作为姿态测量设备，并率先采用记录每行成像时刻方式获取准确的每行成像时间，进而获取可以精确计算每行的外方位元素；在相机内部采用精确的主动温控措施来保证相机内方位元素不因卫星外热流变化而变化，保证影像质量和内方位元素检校结果长期有效，姿态测量设备和相机进行一体化安装，保证外检校结果长期有效。

在航天科技集团和国家测绘地理信息局支持下，国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心和武汉大学相关科研人员对卫星研制的每个节点的测试经过进行分析和论证，及时进行载荷研制中的指标控制，保证了卫星研制的质量。

2.3 星载几何检校场建设

在轨卫星的高精度几何检校是卫星能否测图的前提。以前国产高分辨率卫星的无控制点定位精度和国外同类卫星的定位精度存在较大的差距，如“资源一号”02B星定位精度1公里、“资源二号”03星等卫星的定位精度200米，传感器内部几何检校几乎是空白。而国外卫星SPOT5、ALOS等定位精度达到几十米，近年发射的更高分辨率的Geo-Eye和WorldView等卫星的无控制点定位精度在10米以内。

卫星几何检校是高精度测绘的瓶颈问题，一直是国外不公开的核心技术。中国测绘科学研究院和武汉大学相关科技人员深入研究了卫星几何检校原理，自主提出了天地一体化几何检校技术和几何检校场建设方案。从卫星传感器对几何检校场面积、地形、气象、人工几何靶标和自然标志点、地物波谱等6个方面出发，完成了“资源三号”地面几

何检校场建设方案。在国内遴选出新疆、黑龙江、内蒙、河北、河南等地区作为我国测绘卫星高精度几何检校场的区域，武汉大学联合解放军信息工程大学等单位在河南登封首次建立了我国光学遥感卫星几何检校场。

在研究法国、美国等卫星在轨几何精度的基础上，首次提出采用1:2 000数字高程模型和数字正射影像并辅以人工靶标进行国产光学卫星高精度几何检校。构建了广义指向角模型、多CCD拼接拟合和CCD线阵畸变综合处理等模型，实现了内方位元素的精确标定；采用相位配准的方法，突破了“资源三号”影像和高精度数字正射影像的亚像元匹配技术；提出了波尔兹曼曲线拟合人工靶标像点坐标的方法，提取精度达到1/20像元；针对卫星的上千个技术参数提出了对姿轨参数误差和设备安装误差分步求解的策略，解决了内外方位元素之间的强相关性问题；提出了多检校场、多类型控制点联合标定技术和方案，解决了外方位元素的动态变化问题。

3 在轨测试阶段：产学研

2012年1月9日，“资源三号”卫星成功发射，1月11日，第一轨数据成功下传，辐射质量优异，测绘卫星进入为期3个月的在轨测试期。

武汉大学和国家测绘地理信息局卫星中心相关研究人员，利用自主研制的高分辨率光学遥感卫星的几何检校系统，全面攻克了我国光学遥感卫星几何检校的技术难题，建立了光学遥感卫星检校技术体系，实现了我国高分辨率卫星几何检校技术的重大创新。利用华北等多个地区的高精度数字高程模型和数字正射影像以及人工靶标数据，对“资源三号”影像进行了在轨几何检校[4]。首次检校后，三线阵全色相机的内方位元素标定精度达到0.25像元以内，影像无控制点定位精度从检校前的900米提高到25米[3-5]。提出了多光谱影像虚拟化技术，解决了谱段间高精度配准问题，谱段间配准精度达到0.15像元，比原有国产资源卫星的配准精度提高60%以上[6]。

针对“资源三号”下传的轨道、姿态、星敏以及陀螺数据，科研人员突破了卫星事后定姿、发射后定轨技术；提出了星载和地面一体化联合精密定轨方法和卫星轨道系统误差标定方法，实现了卫星高精度GPS事后定轨，三维定轨精度达3—4厘米[7]；发展了双向卡尔曼滤波算法，形成了星敏相机偏置矩阵模型和星敏陀螺联合定姿方法，“资源三号”姿态后处理精度达到1角秒[8]。

在推扫式多中心投影理论的基础上，提出了“资源三号”严密成像模型建立方法，建立了国内精度最高的有理函数模型（RPC）[5,9,10]。对卫星的姿态变化、TDI CCD积分时间不连续、成像系统变化等不规则成像问题，首次提出虚拟重成像技术，构建了理想线阵无畸变虚拟CCD成像模型[5,9,10]。严密成像模型到有理函数模型的转换误差优于0.0015像元，大大优于0.05像元的平均水平。

国家测绘地理信息局卫星中心和航天科技集团等相关研究人员研发了三线阵立体影像辐射校正技术，提出了自适应动态求解相对辐射定标参数的方法，解决了多CCD光谱差异、死像元剔除、抽头平滑等关键技术问题。“资源三号”影像相对校正精度优于1%，大大优于3%的国产卫星水平。

针对海量遥感影像处理和复杂计算的瓶颈问题，自主研制了从原始影像到测绘产品的全流程并行数据处理系统。对辐射校正、传感器校正、内外方位元素标定、成像模型参数计算、三线阵影像匹配等每个处理功能进行针对性的并行优化，解决了I/O密集型和计算密集型的负载均衡问题，实现了三线阵影像辐射和几何的并行化处理、自动化调度以及流程控制，传感器校正产品的生产效率达到20秒/景（15个计算节点）。

采用同类误差合并处理原则，建立了满足测绘以及相关行业需求的国际通行的测绘遥感影像产品体系。根据“资源三号”影像全色、立体、多光谱等数据特点，制定了测绘产品生产工艺流程，首次研发了附带严密成像几何模型和RPC模型的传感

器校正产品、系统几何纠正产品、精纠正产品以及核线产品等不同等级、不同精度的测绘产品，实现了业务化生产运行[11,12]。

4 应用阶段：学研用

4.1 几何精度提升

2012年7月“资源三号”交付国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心使用，进入应用阶段。

由于卫星在轨运行中物理环境的种种变化，载荷安装等动态参数误差均可能发生变化，致使几何定位精度下降。图1是用2012年1月14日—11月1日共55轨“资源三号”正视影像统计的几何定位精度随时间的变化趋势（纵轴为平面精度，横轴为按时间顺序排列的轨道号），该55轨影像在几何定位中均采用“资源三号”发射后首次检校获取的偏置矩阵。

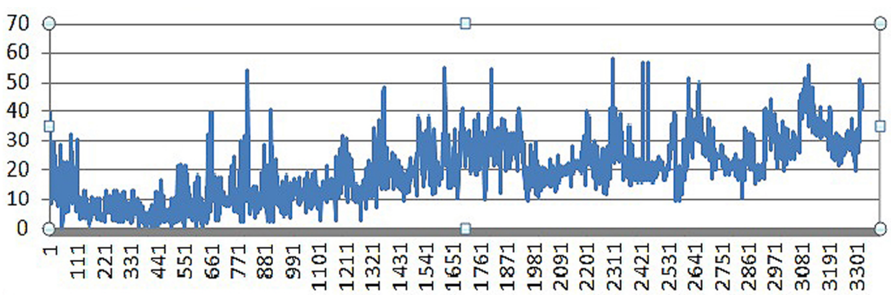

图1 “资源三号”测绘卫星几何定位精度变化趋势

从上图可以明显看到，仅采用首次检校获取的偏置矩阵进行补偿，几何定位精度呈现整体下降趋势。为了保证“资源三号”无控定位精度，约每3个月更新一次偏置矩阵，获取了2012年2月、2012年5月、2012年9月的偏置矩阵，生产时按时间临近关系选择合适的偏置矩阵进行补偿。多次检校后影像的无控制点定位精度达到10米，影像直接定位精度提升90倍，多区域试验结果具体见表3。经过检校，“资源三号”影像无控制点定位精度已超过法国SPOT5、日本ALOS和印度P5等卫星，居国际同类卫星的首位，具体比较见表4。

利用以上技术，“资源三号”影像的精度达到：

（1）稀少控制点时，平面精度优于3米，高程精度优于2米，全面超过1:5万测图精度指标，可进行1:2.5万立体测图，还可用于1:1万部分地形要素的更新；

（2）无控制点时，平面精度优于10米，高程精度优于5米。影像直接定位精度从900米提高到10米以内，可直接用于1:5万基础地理信息更新，甚至可用于全球1:5万无控制立体测图。测图精度全面优于法国SPOT5、日本ALOS和印度P5等国外立体测图卫星，不仅结束了我国卫星难以测图的历史，而且使得自主卫星的测图精度处于国际同类卫星的领先水平。

4.2 “资源三号”产品应用

“资源三号”测绘成果已经全面应用于国家重大测绘工程。为国家1:5万基础地理信息更新工程提供了850万平方公里影像，为国家海岛礁测绘工程提供了45万平方公里的影像，为“天地图”基础地理信息公共服务平台提供了150万平方公里的国内外影像。成果已经全面应用于我国省级基础地理信息产品生产，相继为河南、山西、内蒙古、江苏、贵州、陕西、四川、浙江、福建等省区测绘地理信息部门提供了300万平方公里影像。成果还广泛应用于国土、水利、地矿、农业、林业、防灾减灾、城市建设等多个领域，已提供影像数据1 600万平方公里，大大提升了我国的国土资源调查与监测能力。“资源三号”影像不仅在国内达到外国卫星数据,并且成功应用于国际交流与合作，向包括美国、法国、德国、澳大利亚等30多个国家和地区提供了卫星影像产品，在国际上产生巨大影响。

5 结论

“资源三号”从立项到应用，在政府机构的规划、监管、保障下，在目标用户需求方向的引领下，企业集团、高等院校、研究机构遵循协同创新的原则，紧密合作优势互补，出色完成了“资源三号”的

表3 多区域"资源三号"测绘卫星产品精度验证结果表

试验区	轨道号	地区	无控制点				有控制点(检查点精度)				
			X	Y	H	检查点	X	Y	H	控制点	检查点
1	2479	湖北咸宁	6.169	7.896	4.250	23	0.376	0.429	1.219	4	19
2	351	甘肃兰州	6.066	1.699	5.021	8	2.258	1.861	2.078	4	4
3	350	委内瑞拉	3.823	6.042	3.710	8	1.599	1.987	1.063	4	4
4	1749	齐齐哈尔	5.574	8.587	5.192	21	2.595	2.512	1.343	4	12
5	4364	齐齐哈尔	10.716	3.675	2.720	35	2.669	2.780	2.303	4	31
6	305 381 457	太行山	3.88	4.06	6.59	645	1.882	1.839	2.364	11	634
7	381	登封	9.838	2.271	1.883	36	1.583	2.059	1.583	4	32
8	609	安平	7.201	13.290	8.297	474	1.291	1.110	1.494	4	470
9	3064 4699 4858	渭南	5.3011	5.1983	8.6565	63	3.1326	3.3277	3.7611	9	54
10	5033	连云港	10.1565	1.9155	6.5170	18	2.7055	3.0400	2.7913	4	14
平均					5.0				2.0		

表4 "资源三号"测绘卫星和国际同类卫星性能比较

比较项目	美国 GeoEye-1	法国 SPOT5	日本 ALOS	印度 IRS-P5	中国 资源三号
分辨率	0.41m	2.5m	2.5m	2.5m	正视2.1m 前后视3.5m
基线高度比		0.82	1.0	0.62	0.89
灰度量化值	10bit	8bit	8bit	10bit	10bit
地物分辨能力	很好	较差	较差	较好	很好
无控制精度	10—15m	50m	200m	80m	10m
有控制精度	3m	5—10m	3—5m	5m	2—3m

研制和应用,实现了我国卫星从有到好的历史性转变。有了这样的基础,我国高分辨率对地观测卫星遥感将会走上产业化市场运营的轨道。

参考文献

1 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. 中国科学: 地球科学,2012,42(6):805-813.

2 李德仁. 不停歇的思索——李德仁院士文集. 武汉:武汉大学出版社,2008.

3 李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星——资源三号卫星. 测绘学报,2012,41(3):317-22.

4 蒋永华,张过,唐新明等. 资源三号测绘卫星三线阵影像高精度几何检校. 测绘学报,(即将出版).

5 唐新明,张过,祝小勇等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证, 测绘学报,2012,41(2):592-597.

6 蒋永华,张过,唐新明等. 资源三号测绘卫星多光谱影像高精度谱段配准. 测绘学报,(即将出版).

7 Zhao Q L,Liu J N,Ge M R. High precision orbit determination of CHAMP satellite. Geo-Spatial Information Science, 2006, 9(3):180-186.

8 谢俊峰,江万寿,龚健雅. 顾及星像点分布的恒星相机在轨检校. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(10):1 272-1 276.

9 张过,刘斌,江万寿. 虚拟CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接. 中国图象图形学报,2012,17(6):696-701.

10 潘红播,张过,唐新明等 资源三号测绘卫星影像产品精度分析与验证. 测绘学报,(即将出版).

11 张过,秦绪文,潘红播等. 高分辨率光学卫星标准产品分级体系研究. 北京:测绘出版社,2012.

12 潘红播,张过,唐新明等. 资源三号测绘卫星影像产品精度分析与验证. 测绘学报,(即将出版).

李德仁 中国科学院院士,中国工程院院士,国际欧亚科学院院士,武汉大学教授,摄影测量与遥感学家。江苏省丹徒人,1939年12月出生于江苏泰县。德国斯图加特大学博士。中国测绘学会副理事长、中国图像图形学会副理事长、中国地理学会环境遥感分会副理事长。已发表论文700余篇,出版专著11部。提出了地球空间信息科学的概念和理论体系,长期从事以遥感(RS)、全球卫星定位系统(GPS)和地理信息系统(GIS)为代表的空间信息科学与技术的科研教学工作,并致力于高新技术的产业化发展。E-mail: drli@whu.edu.cn

Achieving Great Leap of Remote Sensing Satellites in China with Adhering to the Model of Government, Industry, Academy, Research, and Users

——our nation's first civil surveying and mapping satellite ZY–3 for an example

Li Deren Zhang Guo

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

Abstract Recently, the ZY-3 mapping satellite, which has been launched successfully and widely used in topographic mapping, remote sensing, and GIS, has attracted great attention. Its achievements were selected into the top ten scientific and technological progress of Chinese colleges and universities in 2012. This paper briefly describes the process of the satellite ZY-3 from the initiation to the application, explores the collaborative innovation model of government, industry, academy, research, and users, and introduces the performance indexes and range of application. Enterprise groups, colleges and universities, and research institutions have accomplished the development and application of the satellite ZY-3 following the principle of cooperative innovation under the supervision of the government and the requirements of the users. Compared with similar foreign satellites, it indicates that it is possible to develop world-class level of high-resolution remote sensing satellites for China and achieve a significant shift to pro-

mote the industrialization development of remote sensing satellites.

Keywords government, industry, academy, research, users,ZY-3 mapping satellite, geometric calibration, geometric accuracy

Li Deren earned an MSc in photogrammetry and remote sensing from Wuhan Technical University of Surveying and Mapping (China) in 1981, and Doctor of Engineering in photogrammetry and remote sensing in from Stuttgart University (Germany) in 1985. He was elected academician of CAS in 1991, CAE and Euro-Asia Academy of Sciences in 1995. He was president of ISPRS Commissions III and VI. He was the first president of Asia GIS association from 2002 to 2006. He is now the academic committee chairman of the State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing at Wuhan University. His scientific interests are in the fields of spatial information science and technology including remote sensing, GPS & GIS and their integration. E-mail: drli@whu.edu.cn

（接49页）

cessfully the Very High Resolution Radiometer and the Ten-channel Scanning Radiometer for FY-1 Meteorological Satellites and the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer for Shenzhou Spacecrafts.He held the post of the chief designer of the application system in the Manned Spacecraft Project of China from 1992 to 1994 and the post of the director of Expert Committee of Aeronautics and Astronautics of National Hi-Tech R&D Program in China from 2001 to 2006 for promoting the development of space application technologies in China. He was elected an academician of the Chinese Academy of Engineering in 1995 and was elected a valid member of the International Eurasian Academy of Sciences. E-mail:hxgong_sitp@yahoo.com.cn