

DOI:10.13203/j.whugis.20180202



文章编号:1671-8860(2018)12-1954-08

# 卫星成像质量可靠性研究初探

张 过<sup>1</sup> 管志超<sup>1</sup>

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

**摘 要:**将可靠性理论引入到航天摄影测量中,研究卫星成像质量可靠性问题。提出了卫星成像可靠性即是在规定条件和时间内,卫星的成像质量达到规定要求的能力;卫星成像质量可靠性分为可靠性设计、测试、增长和保持 4 个部分,并对可靠性的分析方法和流程进行叙述。对国外主流光学/合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)卫星成像质量可靠性研究情况进行了概述,针对国产卫星成像质量可靠性进行初步的研究和分析,验证了卫星成像质量可靠性理论与方法在国产卫星应用的有效性。

**关键词:**卫星成像质量;可靠性;光学;SAR

**中图分类号:**P236; P237 **文献标志码:**A

卫星遥感信息已经成为我国经济建设与国家安全的基石,应用越来越广泛深入,《中国制造 2025》提出坚持“创新驱动、质量为先”的基本方针<sup>[1]</sup>。但在轨卫星受发射震动、空间环境变化、电子元器件老化、部件运动等诸多因素影响,卫星成像质量一般都会发生变化。而遥感应用都希望针对一颗卫星任何时候获取的产品的几何质量和辐射质量均保持在一定水准上,也就是获取可靠稳定的遥感数据,这就要求成像卫星在轨运行的全生命周期之内产出的产品质量保持不变。因此,提高遥感产品的可靠性是一项系统性、基础性的

工作。

遥感卫星主要有光学成像卫星与合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)成像卫星<sup>[2]</sup>。光学/SAR 成像卫星研制、发射、地面接收、处理和应用是一项规模庞大、系统复杂、技术密集、工艺精密的现代系统工程<sup>[3]</sup>,以光学卫星在轨成像与地面处理链路为例(见图 1),包含了平台、载荷、数传、定标、处理等多个环节<sup>[4]</sup>。有效的卫星成像质量保障有利于提升遥感卫星对地观测质量,并有利于遥感在资源普查、城市规划、地质灾害监测等领域更加广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。

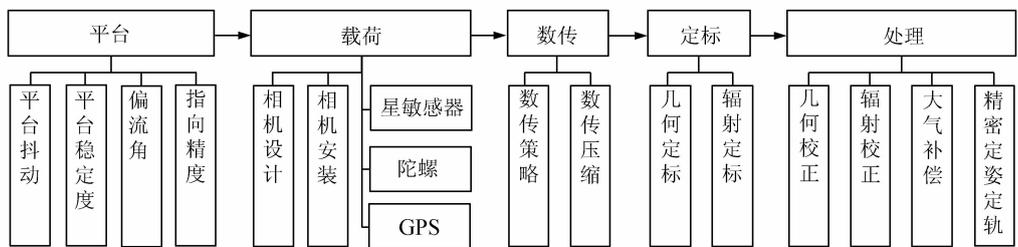


图 1 光学系统成像与处理链路

Fig. 1 Optical System Imaging and Processing Links

可靠性概念是由美国电子设备可靠性咨询组于 1957 年首先提出,指的是产品在规定的条件和时间内,能够完成规定功能的能力<sup>[7]</sup>。20 世纪 60 至 70 年代的 Duane 等学者提出了 Duane 和美国陆军装备系统分析中心(Army Material Systems

Analysis Activity, AMSAA)可靠性增长模型,被称为可靠性增长技术发展史上重要的里程碑<sup>[8]</sup>。自从可靠性概念提出以来,可靠性理论得到充分发展,已经渗透到各学科领域,例如航空航天、武器装备、机械元件、电子设备、车辆产品、软件和网

收稿日期:2018-10-10

项目资助:国家重点研发计划(2016YFB0500801);国家自然科学基金(41501383,91538106,41501503,41601490)。

第一作者:张过,教授,主要从事遥感卫星成像处理研究。guozhang@whu.edu.cn

通讯作者:管志超,博士。guanzhichao@whu.edu.cn

络等方面<sup>[9-10]</sup>。

# 1 卫星成像质量可靠性的定义与分析方法

## 1.1 卫星成像质量可靠性的定义

卫星成像质量可靠性可定义如下:成像卫星的遥感产品在规定的条件和规定的时间内,达到规定精度要求的能力。例如通常以传感器校正产品的无控定位精度和几何内精度来衡量光学成像卫星影像几何质量优劣,如果在轨期间大部分几何定位精度均可以达到一定的要求,则可以认定该卫星产品的几何质量可靠性较高。

在卫星在轨测试阶段,成像卫星按照在轨测试大纲对卫星系统、测控系统、数传系统和地面系统进行测试,该阶段通过可靠性增长手段,使得卫星成像质量的可靠性得到提升,一般在交付使用前,卫星成像质量满足相关指标的要求。依据浴盆理论<sup>[11]</sup>(见图 2),如果不继续采用可靠性增长手段,在在轨测试交付使用后,随着运行时间的增加,卫星影像成像质量会逐步下降。如资源三号 01 星在 2012 年发射后,仅采用在轨测试期间首次几何定标获取的偏置矩阵进行几何精度补偿,资源三号 01 星从 2012 年 1 月 14 日至 2012 年 11 月 1 日共 55 轨正视影像绝对几何精度统计显示,资源三号 01 星的几何定位精度随时间呈现下降趋势<sup>[12]</sup>,且多轨影像几何精度下降到指标以下,影响了资源三号的应用效果。

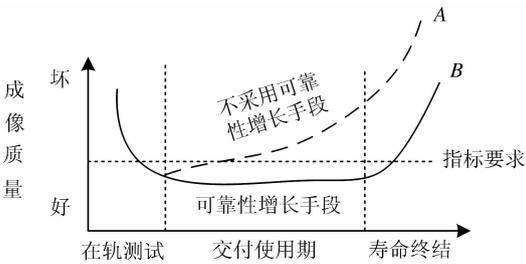


图 2 可靠性浴盆理论

Fig. 2 Reliability Bathtub Theory

本文引入可靠性理论中的平均失效间隔时间<sup>[13]</sup>(mean time between failure, MTBF)公式,定义 MTBF 为卫星成像工作时间内出现不合格影像产品的平均间隔时间(单位为 d、h 或 min),以 d 为单位,MTBF 表示为:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\left(\frac{T}{N}\right)} = \frac{N}{T} \quad (1)$$

式中, $\lambda$  为产品不合格率; $T$  为成像时间段内获取

的影像产品景数; $N$  为未达到指标要求的影像景数。此时,MTBF 表示产品不合格出现的平均间隔天数。

## 1.2 卫星成像质量可靠性研究方法

如图 3 所示,成像卫星质量可靠性的研究方法是利用一定数量的卫星影像产品对各个几何辐射指标进行测试,称为可靠性测试;然后经过统计获得卫星成像质量评估结果,根据评估结果采用定标等手段补偿可能的系统误差,使得成像卫星的几何辐射质量得到提升,为可靠性增长;在此基础上,获得卫星成像质量变化模型进行补偿,维持成像质量,称为可靠性保持,让用户持续获得几何辐射质量稳定的序列产品;通过成像卫星评估剥离耦合因素,分析卫星系统和任务规划系统等影响几何辐射质量的因素,改进卫星系统设计和卫星任务规划策略,进一步提升卫星成像质量的可靠性。

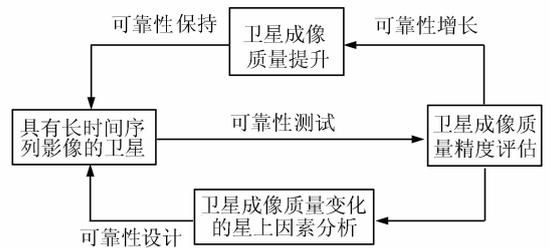


图 3 在轨卫星成像质量可靠性分析方法

Fig. 3 Satellite Imaging Reliability Method

### 1.2.1 可靠性测试

根据光学/SAR 卫星成像几何辐射模型,通过几何辐射定标场、成像卫星产品真实性验证场等测试卫星影像产品的几何辐射质量,并与研制总要求的各项指标进行比较,统计是否达到可靠性要求。

光学成像卫星质量指标主要包括几何与辐射两大类,几何指标主要包含无控定位精度和几何内精度等,辐射指标主要包含相对辐射精度和绝对辐射精度;SAR 成像卫星质量指标包括几何、辐射与相位 3 大类。几何、辐射指标与光学成像卫星相同,相位质量主要是为了保证成像精度。

### 1.2.2 可靠性增长

利用几何辐射定标场,采用场地定标<sup>[14-15]</sup>、交叉定标<sup>[16-17]</sup>和无场定标<sup>[18-19]</sup>等技术手段,计算成像卫星系统的几何、辐射等定标参数,将参数配置于遥感地面系统中使得卫星拍摄的影像几何、辐射、相位质量得到提升,称之为可靠性增长。

### 1.2.3 可靠性保持

由于成像卫星在轨运行过程受空间环境变化、器件老化等因素的影响,几何、辐射质量均会

下降,经典方法是采用一定周期重新定标更新补偿参数才能满足质量可靠性指标要求。利用对典型卫星全生命周期在轨几何及辐射质量下降测试数据、卫星任务规划数据、卫星关键器件可靠性数据,反演和验证几何、辐射相位质量变化模型;对其他同类卫星利用少量关键点数据,反演该卫星的成像质量变化模型参数,将参数配置于遥感地面系统中,使得几何、辐射质量下降的影像产品质量得到提升,称为可靠性保持。

#### 1.2.4 可靠性设计

利用卫星成像质量可靠性测试、可靠性增长和可靠性保持的模型和数据,分析成像卫星相关因素(包括轨道部件、姿态部件以及空间环境等)对其造成的影响,为成像卫星设计提供依据;分析卫星成像任务规划系统对成像质量的影响,改进任务规划策略和模型;利用在轨几何、辐射等质量变化模型,改进成像卫星地面系统处理策略,统称可靠性设计。

由图3以及对可靠性研究方法4个方面的论述,卫星成像质量可靠性分析方法迭代循环过程,多个过程共同作用可使得卫星成像质量可靠性保持在一个较好的水准。

## 2 国外卫星成像质量可靠性评价

### 2.1 Landsat 系列卫星

Landsat 系列卫星自1972年发射以来,持续对地观测,由于其可靠性测试、可靠性增长和可靠性保持方面优良的工作,使得成像质量可靠性得到保障。

以Landsat-7卫星几何质量为例,如文献[20]中图2所示,在2001年之前,通过可靠性测试,发现少量影像在沿轨向定位精度低于75 m,垂轨向低于50 m,而在2001和2002年一段时间内,部分影像的定位误差超过100 m。Landsat-7团队利用几何定标更新2002年的安装矩阵<sup>[20]</sup>,解决几何质量下降问题,定位精度得到提升,验证了可靠性测试和可靠性增长等手段的必要性。

对于Landsat系列卫星的辐射质量,Landsat团队采用地表反射率的准确度、精确度和不确定性等几个指标对Landsat-5的TM和Landsat-7的ETM+辐射质量进行可靠性测试,结果如文献[21]中图6所示,分别表示可见光、近红外和短波红外等6个波段的准确度、精确度和不确定性等辐射质量指标随时间的变化规律<sup>[21]</sup>,反映了Landsat卫星在地面系统采用可靠性设计手段,利用陆地卫星生态系统干扰自适应处理系统<sup>[21]</sup>(landsat ecosystem disturbance adaptive proces-

sing system,LEDAPS)后,辐射质量得到保障,也就是通过可靠性测试和可靠性设计使得成像辐射质量得到保障。

### 2.2 Worldview 和 Quickbird

为了保障Worldview和Quickbird卫星质量,该卫星保障团队每个月进行两次几何质量评估<sup>[22-23]</sup>,其结果如文献[22]中图4和图5所示,Quickbird-2几何精度稳定在14~20 m(CE90)的范围内,而Worldview-1几何精度稳定在4~5.5 m(CE90)范围内,可认为Worldview和Quickbird通过可靠性测试,具有较高的质量可靠性。根据这两图还可以发现,Worldview和Quickbird的几何质量均有季节变化规律,如果拟合其规律进行季节缓变误差的补偿,其几何质量可能得到进一步提升,可称为可靠性保持。

### 2.3 ERS-1 和 ERS-2 卫星

ERS-1和ERS-2是由欧洲空间局(European Space Agency, ESA)研制和运营的SAR卫星。利用可靠性测试手段,选取了ERS-1从1992年到1999年的影像、ERS-2从1995年到1999年的影像,评估其距离向和方位向的定位精度随时间变化趋势<sup>[24-25]</sup>(如文献[24]中图4所示)。ERS-1的距离向定位精度维持在2 m到-6 m范围之内,且有精度下降趋势;ERS-2距离向定位精度维持在2 m到-2 m之内,随机分布。ERS-1方位向定位精度在1992年有个比较大的跳动;ERS-2方位向定位精度基本维持在10 m到-10 m之内,随机分布。可认为ERS卫星通过可靠性测试发现成像卫星几何辐射质量趋势,为可靠性增长和可靠性保持提供数据基础。

### 2.4 小结

在光学成像卫星方面,Landsat系列卫星是国际最早进行成像质量可靠性研究的遥感卫星,其几何质量和辐射质量一直保持比较高的水准,后续高分辨率Worldview等系列光学卫星均开展了可靠性测试分析工作,几何质量和辐射质量均保持在较高的水准。在SAR成像卫星方面,ERS卫星的可靠性测试贯穿卫星全生命周期,ERS的质量保持较高的几何水准。

由国外尤其是美国和欧洲各颗光学和SAR成像卫星的文献调研可知,国外卫星较早地对卫星的各项指标进行了长周期的统计分析,也就是可靠性测试,并分析质量变化的原因,获得成像质量可靠性增长的手段,使得各个成像卫星在全生命周期内都能产出质量较为理想的影像。这对国内卫星影像的质量可靠性研究具有借鉴意义。

### 3 国产卫星成像质量可靠性

本文采集了多颗国产光学/SAR 卫星长时间序列影像,并对影像成像质量进行了评估,提出了遥感卫星成像质量短周期的震荡规律、长周期的衰变规律,通过建模进行了初步的抑制与补偿,使产品的可靠性得到了保持。

#### 3.1 光学成像卫星几何质量可靠性保持初步实验

在不采用可靠性保持手段时,资源三号 01 星

长时间的定位精度监测结果表明(见图 4),资源三号 01 星的几何定位精度随时间呈现下降趋势;高分九号卫星双星敏光轴间夹角时序监测表明,该夹角存在轨道周期性变化(见图 5),影响一轨之内的定位精度。综上所述,需要采用可靠性保持手段来提升影像的定位精度。

本文构建了顾及长时段衰变和短时间周期性变化的时变补偿模型,来提高光学卫星的无控定位精度:

$$\vartheta = f(t) + g(t) \tag{2}$$

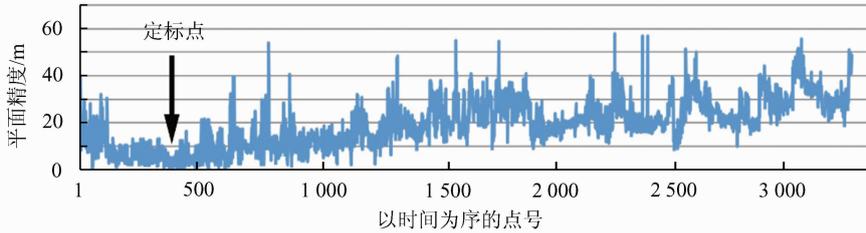


图 4 资源三号 01 星 1 a 内无控定位精度变化规律

Fig. 4 Geolocation Accuracy Without GCPs of ZY3-01 in One Year

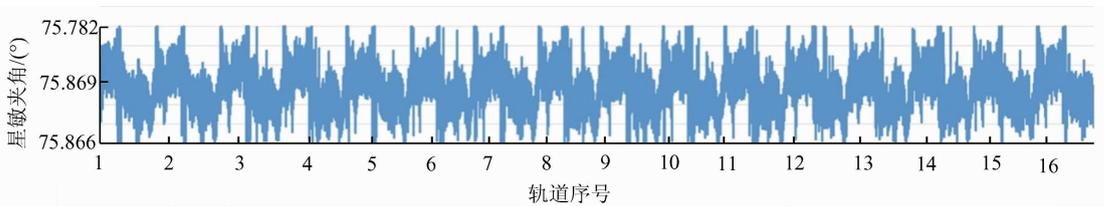


图 5 高分九号星敏传感器夹角变化

Fig. 5 Angle Change Between Two Star Sensors of Gaofen-9

式中, $\vartheta$  表示卫星 3 轴任意一个角; $f(t)$  是以 d 甚至月为单位的长时间姿态缓慢变化(区域相关性弱),基本表现出随时间自变量变化的特性; $g(t)$  则主要是以轨道为主的周期性姿态低频漂移(区域相关性强)。

##### 3.1.1 基于长时布控的可靠性保持

采集资源三号 01 星 2012 年 2 月 3 日嵩山、2 月 18 日天津、5 月 2 日天津、9 月 18 日嵩山 4 次影像作为定标影像,采用线阵推扫几何定标模型,求得各次的偏置矩阵<sup>[19]</sup>。以首次定标偏置为基准,各定标点偏置角的变化情况如表 1 所示。

表 1 资源三号定标偏置角变化

Tab. 1 ZY-3 Calibration Parameters Change

时间	地区	偏置角差异/(°)		
		$\varphi_u$	$\omega_u$	$\kappa_u$
2 月 3 日	嵩山	0	0	0
2 月 18 日	天津	0.5	3.2	1.7
5 月 2 日	天津	3.9	-25.6	13.6
9 月 18 日	嵩山	4.7	-26.1	-3.3

采集了资源三号 01 星 2012 年分布于全国不

同地区的多景产品来进行验证,传感器校正<sup>[26]</sup>后的无控定位精度结果如图 6 所示。在采用可靠性保持手段即分段建模前,仅用 2 月 3 日的嵩山定标参数补偿系统误差,从图 6 可知,定位精度随时间基本呈线性下降趋势,且无控定位精度在一年内降低到 30 m 以上。采用表 1 的标定偏置,进行分段线性建模的可靠性保持手段,用拟合定标参数对星上误差进行补偿,无控定位精度在全年范围内提升到了 10 m 以内。依据该次可靠性保持手段,资源三号 01 星地面系统采用 3 个月进行一次几何外定标的方式,保持资源三号 01 星的几何质量可靠性,其无控定位精度维持在优于 10 m 的区间。

##### 3.1.2 基于广域布控的可靠性保持

采集了资源三号 02 星 11 轨条带影像,实验数据轨道号按照从北到南的顺序为:5043 轨、4130 轨、405 轨、4311 轨、3758 轨、3757 轨、4935 轨、4844 轨、1089 轨、4738 轨、344 轨,数据分布纬度范围为  $-40^{\circ} \sim 71^{\circ}$ 。对 11 轨条带内每景影像

进行几何精度可靠性测试,沿轨向和垂轨向的定位误差变化结果如图7所示。沿轨无控精度随纬度变化比较剧烈,呈现较为简单的正余弦特征;垂

轨无控精度随纬度变化缓慢,呈现抛物线特征。通过对该变化规律拟合补偿后,资源三号02星无控精度提升到5m之内(见图7)。

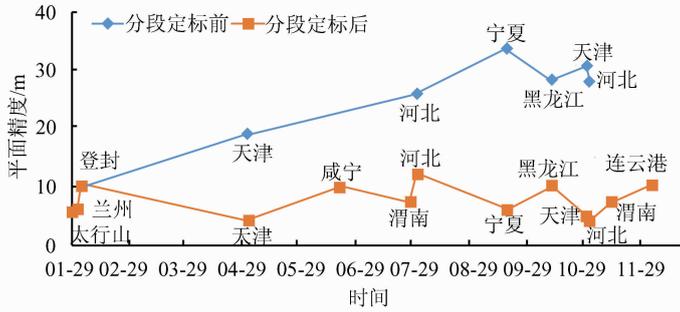


图6 分段线性建模前后各地区无控定位精度对比(2012年)

Fig. 6 Geolocation Accuracy Without Control Before and After Piecewise-Linear Modeling(2012)

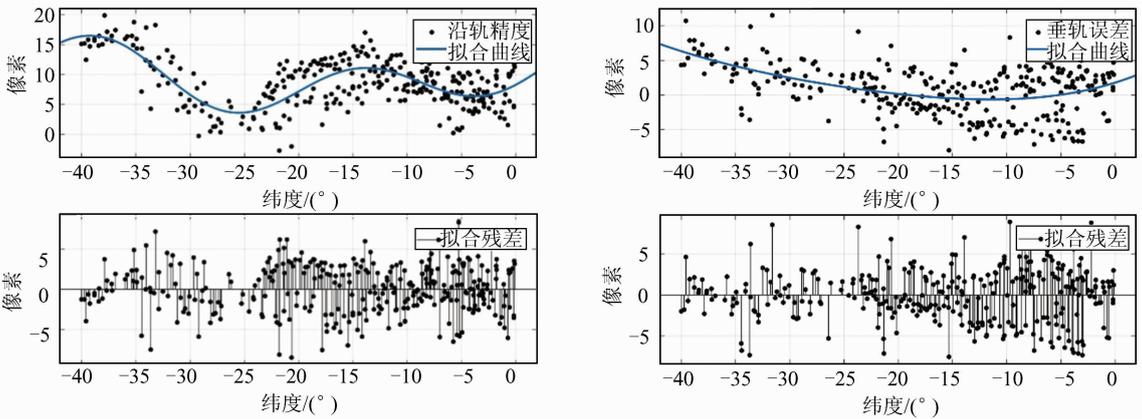


图7 无控定位像点偏移规律图

Fig. 7 Pixel Shift Without Control

### 3.2 光学成像卫星辐射质量可靠性测试初步实验

对资源三号01星多光谱传感器辐射质量采用基于场地定标<sup>[27-28]</sup>和基于全球伪不变目标两种方法进行可靠性测试,结果表明,资源三号01星多光谱传感器在轨一年衰减量最大约4%,两种测试方法结果相符。该结果揭示了资源三号01星多光谱传感器衰减规律,为其辐射质量可靠性保持提供依据。

### 3.3 SAR成像卫星几何质量可靠性测试初步实验

采集嵩山定标场国产SAR卫星遥感13A条带模式11景数据,利用自动角反射器进行几何定标<sup>[29]</sup>,逐次定标结果如表2所示,斜距改正精度为0.609m,满足斜距标定精度0.8m的指标要求。对斜距改正值按时间进行分析,结果如图8所示,其斜距改正值有逐渐变大趋势,可采用可靠性保持进一步提升定位精度。

进一步采集遥感13A国内17个区域的数据和对应的地面控制点(分布于张掖、渭南、成都、郑州、邢台、北京、天津、烟台、合肥、南京、武汉、上海、

宁波、赣州、厦门、湛江、文昌),进行几何质量可靠性测试,成像时间跨度为2015年12月7日至2017年7月20日。图9为实验区所有SAR影像数据的几何定位误差随成像时间的变化趋势,均在1.5m左右范围波动,最大定位误差2.9695m,最小定位误差0.3454m,无明显衰减现象存在。

表2 遥感13A条带模式几何定标  
Tab. 2 Strip Mode Geometry Calibration

成像日期	方位向改正系数	距离向改正	
		斜距改正/m	时延改正/ns
2015-12-28	0.000 063 80	17.11	114.19
2016-01-03	-0.000 162 00	18.46	123.19
2016-01-16	0.000 000 23	17.58	117.32
2016-01-18	-0.000 028 00	18.62	124.23
2016-01-19	-0.000 019 00	17.28	115.33
2016-03-03	0.000 098 00	18.65	124.45
2016-03-11	0.000 053 00	18.57	123.94
2016-03-26	-0.000 086 00	18.14	121.05
2016-03-27a景	-0.000 017 00	18.03	120.34
2016-03-27b景	0.000 019 00	19.18	127.99
2016-03-29	0.000 120 00	17.81	118.86

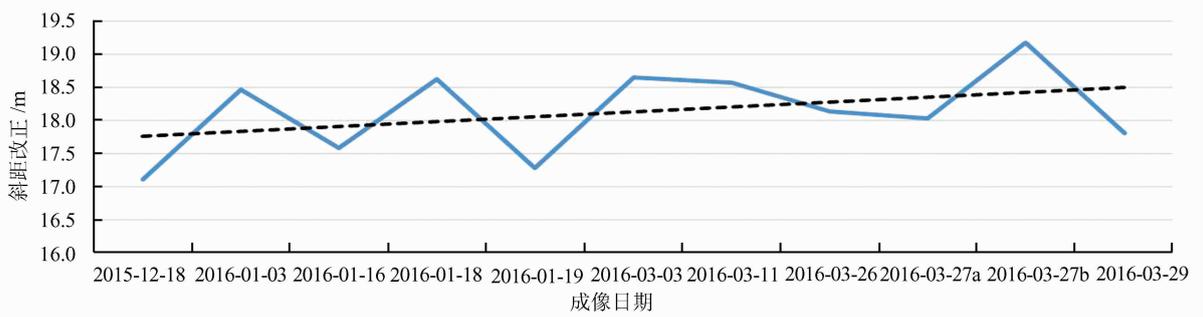


图 8 距离向斜距改正趋势  
Fig. 8 Deviation Correction Trend

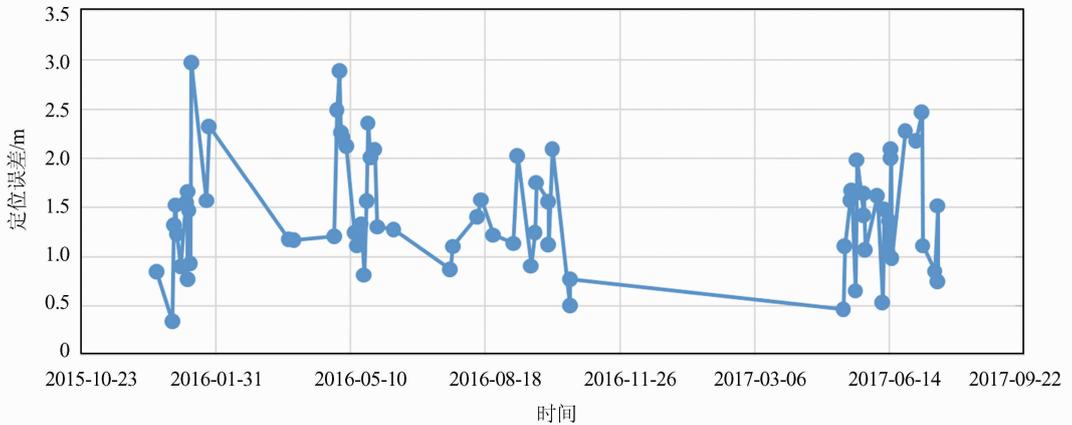


图 9 几何定位误差随成像时间的变化  
Fig. 9 Geolocation Error of 13A by the Time Series

### 3.4 小 结

通过光学成像卫星几何质量可靠性测试,发现国产光学成像卫星几何质量具有长时间缓变和短时间震荡的规律,通过可靠性保持手段,资源三号 01 星无控定位精度优于 10 m,资源三号 02 星无控精度优于 5 m。

针对光学成像卫星辐射质量可靠性测试,发现国产光学成像卫星辐射质量具有长时间缓变下降趋势,可为辐射质量可靠性保持模型的建立提供依据。

对遥感 13A 条带模式斜距改正结果和无控定位精度进行验证发现,其可靠性始终保持较高水平,但斜距精度有下降趋势,可通过可靠性保持手段进一步改善定位精度。

## 4 结 语

本文首先定义了卫星成像质量可靠性的概念和内涵,提出卫星成像质量可靠性的研究方法包括可靠性设计、测试、增长和保持等 4 个方面;分析了国外多颗成像卫星在轨运行期间,采取多种

可靠性措施,提升了成像质量可靠性;利用资源三号光学卫星和遥感 13A SAR 卫星,对成像质量可靠性的研究方法进行初步验证,提升了卫星成像质量可靠性,促进我国遥感卫星可靠性工程从器件、组件可靠性跨越到遥感卫星系统可靠性,为我国卫星遥感系统可用性奠定基础。

### 参 考 文 献

- [1] Zhou Ji. Intelligent Manufacturing: Main Direction of "Made in China 2025" [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(17): 2 273-2 284(周济. 智能制造:“中国制造 2025”的主攻方向[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(17): 2 273-2 284)
- [2] Shu Ning. Principles of Microwave Remote Sensing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003(舒宁. 微波遥感原理[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2003)
- [3] Xu Yanli, Shen Huairong. Performance Analysis and Simulation Technology of Satellite [C]. Academic Symposium on System Simulation Technology and Applications, Hefei, China, 2006(徐艳丽, 沈怀荣. 卫星性能分析与仿真技术研究[C]. 系统仿真技术及其应用学术交流会, 合肥, 2006)

- [4] Hu Xin, Wang Yu. Affections Analysis on Imaging Quality in the Full Link of Optical Remote Sensing Satellite[J]. *Geomatic Science and Engineering*, 2011, 37(2): 1-5(胡莘, 王昱. 光学遥感卫星全链路成像质量影响因素分析[J]. *测绘科学与工程*, 2011, 37(2): 1-5)
- [5] Li Deren, Wang Mi, Shen Xin, et al. From Earth Observation Satellite to Earth Observation Brain [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 143-149(李德仁, 王密, 沈欣, 等. 从对地观测卫星到对地观测脑[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(2): 143-149)
- [6] Zhang Guo, Li Deren, Qin Xuwen, et al. Key Technologies of Data Processing for Spaceborne SAR and InSAR Based on RPC Model[J]. *China Science and Technology Achievements*, 2013, 22: 58-61(张过, 李德仁, 秦绪文, 等. 基于RPC模型的星载SAR和InSAR数据处理关键技术[J]. *中国科技成果*, 2013, 22: 58-61)
- [7] Pan Yong, Huang Jingyong, Hu Ning. Introduction to Reliability[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2015(潘勇, 黄进永, 胡宁. 可靠性概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015)
- [8] Guo Jianying, Sun Yongquan, Yu Xiaoyang. Annotation of Reliability Growth Technology Development Trends[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2011, 16(2): 1-11(郭建英, 孙永全, 于晓洋. 可靠性增长技术发展动态诠释[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2011, 16(2): 1-11)
- [9] Shi Wenzhong, Chen Pengfei, Zhang Xiaokang. Reliability Analysis in Geographical Conditions Monitoring [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 620-1 626(史文中, 陈鹏飞, 张效康. 地理国情监测可靠性分析[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1 620-1 626)
- [10] Elsayed E A. Reliability Engineering [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012
- [11] Jiang R, Murthy D N P. A Study of Weibull Shape Parameter: Properties and Significance[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(12): 1 619-1 626
- [12] Li Deren, Zhang Guo. Achieving Great Leap of Remote Sensing Satellites in China with Adhering to the Model of Government, Industry, Academy, Research, and Users[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 28(S): 25-32(李德仁, 张过. 坚持政产学研用, 实现我国遥感卫星质量的飞跃[J]. *中国科学院院刊*, 2013, 28(增刊): 25-32)
- [13] Lienig J, Bruemmer H. Fundamentals of Electronic Systems Design[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2017
- [14] Zhao R, Zhang G, Deng M, et al. Geometric Calibration and Accuracy Verification of the GF-3 Satellite[J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 1 977-1 990
- [15] Jiang Y H, Zhang G, Tang X, et al. Improvement and Assessment of the Geometric Accuracy of Chinese High-Resolution Optical Satellites[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2017, 8(10): 4 841-4 852
- [16] Jiang Y, Zhang G, Wang T, et al. In-Orbit Geometric Calibration Without Accurate Ground Control Data[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2018, 84(8): 485-493
- [17] Deng M, Zhang G, Zhao R, et al. Improvement of Gaofen-3 Absolute Positioning Accuracy Based on Cross-Calibration [J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 2 903-2 917
- [18] Jiang Yonghua, Xu Kai, Zhang Guo, et al. A Method of Exterior Auto Calibration for Linear CCD Array Pushbroom Optical Satellites [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(8): 1 266-1 271(蒋永华, 徐凯, 张过, 等. 线阵推扫光学卫星外方位元素自检校方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(8): 1 266-1 271)
- [19] Jiang Y, Cui Z, Zhang G, et al. CCD Distortion Calibration Without Accurate Ground Control Data for Pushbroom Satellites [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 142: 21-26
- [20] Lee D S, Storey J C, Choate M J, et al. Four Years of Landsat-7 On-orbit Geometric Calibration and Performance[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(12): 2 786-2 795
- [21] Claverie M, Vermote E F, Franch B, et al. Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ Surface Reflectance Products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 390-403
- [22] Smiley B. The Absolute and Relative Geolocation Accuracies of QB02 and WV019 [C]. ASPRS Annual Conference, Baltimore, Maryland, 2009
- [23] Krause K S. WorldView-1 Pre and Post-Launch Radiometric Calibration and Early On-orbit Characterization [C]. The International Society for Optical Engineering, Longmont, CO, USA, 2008
- [24] Mohr J J, Madsen S N. Geometric Calibration of ERS Satellite SAR Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4): 842-850
- [25] Zhang Guo. High Accuracy Geometric Process for Linear CCD Array Pushbroom Optical Satellites [M]. Beijing: Science Press, 2016(张过. 线阵推扫式光学卫星几何高精度处理[M]. 北京: 科学出

版社, 2016)

- [26] Tang Xinming, Zhou Ping, Zhang Guo, et al. Research on a Production Method of Sensor Corrected Products for ZY-3 Satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(3):287-294(唐新明, 周平, 张过, 等. 资源三号测绘卫星传感器校正产品生产方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(3):287-294)
- [27] Gu Xingfa. Principles and Methods of Radiometric Calibration for Space Optical Remote Sensors[M]. Beijing: Science Press, 2013(顾行发. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2013)
- [28] Fu Qiaoyan, Min Xiangjun, Li Xingchao, et al. In-flight Absolute Calibration of the CBERS-02 CCD Sensor at the Dunhuang Test Site[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(4):433-439(傅俏燕, 闵祥军, 李杏朝, 等. 敦煌场地 CBERS-02 CCD 传感器在轨绝对辐射定标研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(4):433-439)
- [29] Weng Yinkan, Li Song, Yang Jinglin, et al. Fast Solution to the RCS of Corner Reflector for the SAR Radiometric Calibration[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11):1 551-1 556(翁寅侃, 李松, 杨晋陵, 等. SAR 辐射定标中角反射器 RCS 的快速求解[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(11):1 551-1 556)

## Primary Research on Reliability of Satellite Imaging Quality

ZHANG Guo<sup>1</sup> GUAN Zhichao<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The reliability theory is introduced into space photogrammetry, and the reliability of satellite imaging quality is studied. The reliability of satellite imaging is defined as the ability of satellite imaging quality to meet the specified requirements under specified conditions and time. The reliability of satellite imaging quality is divided into four parts: Reliability design, testing, growth and maintenance. In this paper, the research status of imaging quality reliability of optical/SAR satellites is summarized. Various reliability measures are taken to improve the reliability of imaging quality when many commercial remote sensing satellites of other countries are in orbit. The reliability of imaging quality of optical satellite of Ziyuan-3 and SAR satellite of Yaogan 13A in China is preliminarily studied and analyzed. The result show that under 4 parts of reliability, Ziyuan-3 01 can have a geometric accuracy of less than 10 meters and 5 meters for Ziyuan-3 02. The research promotes China's remote sensing satellite reliability engineering from devices and components reliability to remote sensing satellite system reliability, which lay a foundation for our country satellite remote sensing system availability.

**Key words:** satellite imaging quality; reliability; optical; SAR

**First author:** ZHANG Guo, professor, specializes in imaging process of remote sensing satellite. E-mail: guozhang@whu.edu.cn

**Corresponding author:** GUAN Zhichao, PhD. E-mail: guanzhichao@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0500801; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41501383, 91538106, 41501503, 41601490.