

文章编号 1004-924X(2017)09-2454-07

光学遥感卫星信息获取能力指数的评估

刘 锋^{1,2*}, 李 琳²

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190;
2. 北京市遥感信息研究所, 北京 100192)

摘要:提出了一种客观评估遥感卫星获取信息能力的指数模型。分析了影响遥感卫星信息获取能力的主要因素,包括运行轨道、成像分辨率、成像幅面、姿态机动能力等。以目标综合辨识量作为衡量标准,建立了涵盖成像分辨率、目标重访、姿态机动能力等要素的信息获取能力指数评价模型。介绍了模型的实现流程和具体步骤。该模型集成目标获取数量和目标获取精度两个维度信息,可实现遥感卫星信息获取能力的综合评估。以世界观测(Worldview)卫星系列、昴星团(Pleiades)和高景一号(Superview-1)等国内外光学遥感卫星为例进行了验证分析。结果表明,该指数模型能够对性能各异遥感卫星的信息获取能力做出准确评估,如 WorldView-3 的分辨率不到 WorldView-1 的分辨率的两倍,但信息获取能力却是其 3 倍多;Superview-1 分辨率比 Pleiades 高,但实际信息获取能力还不到后者的一半。得到的结果验证了提出模型的有效性,表明提出的模型可为综合评价光学遥感卫星遥感能力提供量化参考,为光学遥感手段的发展提供评估模型支持。

关键词:光学遥感;遥感卫星;信息获取;能力指数;评估模型

中图分类号:TP751 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172509.2454

Evaluation of information acquisition capability of optical remote sensing satellites

LIU Feng^{1,2*}, LI Lin¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China)

* Corresponding author, E-mail:ericrs@126.com

Abstract: A model for evaluation of the capability index of information acquisition in remote sensing was proposed. The main factors affecting the satellite remote sensing information acquisition ability, including orbit, imaging resolution, attitude maneuver ability were analyzed. By taking the comprehensive target identification as the standard, an evaluation model of ability index for the information acquisition which covers imaging resolution, target revisiting and attitude maneuver was established. The implementation process and the specific steps of the model were introduced. The model integrates two dimensions of target acquisition quantity and target acquisition precision, which could evaluate the practical physical significance comprehensively for remote sensing satellite information acquisition capability. With the Worldview series, Pleiades and a number of domestic and

收稿日期:2017-04-21;修订日期:2017-06-23.

基金项目:国家自然科学基金重点基金资助项目(No. 9140A22020215JB08339)

foreign optical remote sensing satellites as examples, the validity of the evaluation model was verified. The results show that the index model assess accurately the performance of different remote sensing satellites. It points out that the resolution of WorldView-3 is Less than twice as much as that of the WorldView-1, but its information acquisition capability is 3 times that of the WorldView-1. The resolution of Superview-1 is higher than that of the Pleiades, but its information acquisition capability is less than half of the latter. The validity of the evaluation model was verified, which demonstrates that evaluation model can provide a quantitative reference for the comprehensive evaluation of optical remote sensing satellites, and can provide a support for the evaluation of new optical remote sensing satellites.

Key words: optical remote sensing; remote sensing satellite; information acquisition; capability index; measurement model

1 引 言

近年来,光学遥感卫星正在向小型敏捷、灵活智能、优质高效方向发展,同时也逐步从低轨向中高轨延伸,光学遥感卫星的遥感能力一直在快速提升^[1-5]。在多种发展途径并存情况下,客观准确评价光学遥感卫星的遥感能力成为当务之急,这对于引领光学遥感卫星正确的发展方向 and 科学评估其关键技术的实现程度,进而提高卫星研制效益具有重大现实意义。

信息获取能力是评价遥感卫星系统效能的重要指标之一^[6-7]。常见的光学遥感卫星信息获取能力评价主要包括基于获取量的评价方式和基于获取精度的评价方式。前者以获取面积的计算和获取目标数量为重点,根据不同评价目的,分为一次成像覆盖宽度、条带成像长度、单位时间获取面积、单位时间获取目标数量等^[8-9],这种方法以获取量为评价重点,没有考虑获取精度的因素。后者以遥感图像的信息量计算为重点,一般综合考虑分辨率、灰度量级、图像噪声、像元相关性、多波段间相关性等因素,求解单像元的平均信息量^[10],这种方法以获取精度为评价重点,没有考虑遥感卫星在信息获取过程中的光轴指向调节约束、以及卫星重访对获取量的影响。由于获取精度和获取量处于不同维度,简单组合很难形成有实际物理含义的评价结果^[11-15]。因此,对信息获取效能做出完整评价,实现面向获取精度和获取量的综合评价,是卫星信息获取效能评价的难点。

本文从遥感卫星系统最终应用目的出发,提出了基于目标辨识数量的光学卫星信息获取能力评价指数模型,以目标发现识别确认数量的多少

作为衡量信息获取能力的标准,通过将目标重访周期、目标获取精度转换为数量维来进行评价,并综合考虑卫星运行轨道、传感器视场、指向调节能力等条件,实现信息获取效能的定量化评价。

文中首先分析了运行轨道、成像分辨率、姿态机动能力等影响光学遥感卫星信息获取效能的主要因素;其次对目标综合辨识度、单位时间获取次数等进行了研究,建立了基于目标综合辨识量的光学卫星信息获取效能评价模型;然后介绍了模型评价的基本流程和实施步骤;最后以WorldView、Pleiades、高景一号等国内外典型光学遥感卫星为例,进行了仿真评估,分析了性能各异的不同遥感卫星在信息获取能力上的综合表现,验证了信息获取效能评价模型的合理性,相关模型可为开展光学遥感卫星信息获取效能的综合评价提供参考,为新型遥感卫星发展论证提供重要支撑。

2 遥感卫星信息获取能力的主要影响因素

信息获取能力是衡量卫星系统在单位时间内获取有效信息多少的重要指数。影响该能力的因素首先是传感器自身性能参数,包括传感器种类、成像分辨率、成像幅面(传感器视场)等,其他因素还包括卫星运行轨道、载荷工作时间、传感器指向调节能力等。

(1)传感器种类。传感器种类决定了卫星每天可工作的时间段,可见光相机只能在白天且气象条件良好的条件下成像,而合成孔径雷达(SAR)传感器则可以全天时全天候成像,这就影响到目标获取效率。

(2)传感器视场。传感器视场决定了卫星观测时的瞬时成像范围,对于成像卫星主要对应于成像带宽;对于点目标观测,传感器视场通常足够大,一般一次过境就能完整覆盖目标。因此,传感器视场对单位时间目标获取数的影响不大。对于区域覆盖观测任务,传感器视场则直接决定单位时间的获取面积。

(3)在轨卫星数量。在轨卫星数量越多,对目标的观测机会就越多,相应目标获取能力就越强。但由于还受卫星部署位置、星间相位关系等其他因素影响,在轨卫星数量与目标获取效率之间并不是简单的线性关系。

(4)卫星运行轨道。卫星运行轨道的高度、偏心率等决定了卫星相对于旋转地球的速度,并影响到卫星的观测带宽,对于采用推扫工作方式的遥感卫星,就决定了其在单位时间内可获取的信息量。卫星轨道高度越高,观测带宽就越大,但卫星与地面的相对速度会越小。相应卫星在目标区上空的过顶时间越长,越有利于实施多目标观测。因此,卫星运行轨道对信息获取效率的影响是综合的。

(5)传感器指向调节能力。传感器指向调节能力包括指向调节范围和指向调节响应时间两个方面。传感器指向调节范围越大、指向调节响应时间越短,一次过顶的观测面积就越大,获取的目标数也越多。通过快速调节指向,卫星可以在同一圈次上对多个目标成像,或者获取多条带区域数据。特别是在点目标观测任务中,指向调节能力将直接决定卫星单圈能够获取的目标个数,其重要性尤为突出。

3 光学遥感卫星信息获取能力指数评价模型

上述因素对遥感卫星信息获取能力的影响呈现不同维度,成像分辨率是信息获取的精度维,成像幅面和传感器指向调节能力则是信息获取的数量维,而运行轨道既影响精度也影响数量。因此,需要寻找特定途径实现不同维度信息获取能力的综合评价。

考虑到遥感卫星系统主要用于辨识目标和地物,可以以目标发现识别确认数量的多少作为衡量信息获取能力的标准,建立基于目标辨识数量的信息获取能力评价指数模型,将目标重访周期、

目标获取精度转换为数量维来进行评价,实现信息获取能力的综合评价。

3.1 基于目标辨识数量的信息获取能力指数模型

信息获取能力指数是卫星单次过顶综合辨识目标数量与单位时间内重访次数的乘积,即:

$$G = R \times \sum_{\text{res}} (N_{\text{res}} \times L_{\text{max}}^{\text{res}}), \quad (1)$$

式中: G 为光学卫星信息获取能力指数,即光学卫星在单位时间内的综合辨识目标数量; N_{res} 为指定分辨率下的卫星单次成像目标综合辨识数量; $L_{\text{max}}^{\text{res}}$ 为一次过顶弧段内卫星最大成像次数; R 为单位时间内的目标重访次数。

3.2 卫星单次成像的目标综合辨识数量

目标信息提取任务通常是按照从发现到确认的层级进行定义,而不同分辨率等级下的目标发现识别确认等能力,主要受到分辨率变化的影响,随着分辨率的提升,可获取目标的细节信息更加丰富,可实现的目标信息提取分类层级更高。

对于不同的目标,某一具体的信息提取分类层级所对应的分辨率要求差别较大,此外,对于不同的观测视角,同样会对目标信息的提取分类带来影响。因此,关注目标集合的选择,并按照所需的分类层级,对各典型目标所需分辨率进行一定规模的统计,才能得到以该目标集合为基准的不同信息提取层级的概率统计结果。

由此,可利用目标信息提取层级来实现从目标获取精度到目标数量的转换,主要思路是针对某个指定分辨率,根据对已知目标集合在发现、识别等不同信息提取层级的概率,通过加权得到综合辨识率结果,最后由该目标集合得到综合辨识目标数量。

以包含发现、识别、确认等典型信息提取任务在内的分类层级为例,记某个典型目标集合中的目标数量为 $NUM_{\text{Target Set}}$,对目标集的发现率、识别率、确认率分别为 $S_{\text{Det}}^{\text{res}}$ 、 $S_{\text{Rec}}^{\text{res}}$ 、 $S_{\text{Ide}}^{\text{res}}$,则指定分辨率等级下的目标综合辨识率由发现率、识别率、确认率等共同决定。

将目标综合辨识率定义为 $S_{\text{Acq}}^{\text{res}}$,即有:

$$S_{\text{Acq}}^{\text{res}} = \rho_1 \times S_{\text{Det}}^{\text{res}} + \rho_2 \times S_{\text{Rec}}^{\text{res}} + \rho_3 \times S_{\text{Ide}}^{\text{res}}, \quad (2)$$

其中: ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别为发现率、识别率、确认率的权重系数,权重系数分配主要由不同层级信息提取任务的关注重要性确定。

则指定分辨率下的目标综合辨识数量 N_{Res} 为:

$$N_{\text{Res}} = S_{\text{Acq}}^{\text{Res}} \times NUM_{\text{Target Set}}. \quad (3)$$

3.3 卫星单位时间内获取目标次数

根据卫星运行特点,单位时间内的获取目标次数主要取决于单位时间内的卫星过顶次数和单次过顶的访问次数。前者可选择以天为单位,由于卫星重访的不均匀性,通常选择统计时段内的日均过顶次数为对象进行分析,此时在选择过顶弧段时不失一般性,均按照最大过顶弧段对单次过顶的访问次数进行分析。

考虑到实际目标的位置分布差异性对统计结果可能引入的影响,从规范化约束条件的目的出发,采用针对指定目标凝视观测次数的统计,用于表征指向调节能力对目标获取效能的影响。其中,若系统只有侧摆指向能力,此时单次过顶对于指定目标只有一次访问,考虑到系统具有的同轨多目标获取能力,可将其指向调节能力等效至俯仰方向,再对系统的目标获取效能进行衡量。

在过顶弧段中,记每次成像时长为 $T_{\text{Image Length}}$ 、最大转动角度为 α_{max} 、每次转动角度 α 对应的转动用时为 $T(\alpha)$,过顶弧段内成像次数为 $L_{\text{max}}^{\text{res}}$,则有:

$$L_{\text{max}}^{\text{res}} = F(T(\alpha), \alpha_{\text{max}}, T_{\text{Image Length}}). \quad (4)$$

由于不同指向方向上转动角度的不均匀性,上述函数难以实现显式表达,通常采用对卫星与目标点的可见性关系对过顶弧段内的可成像次数进行统计。

此外,在不同指向方向上成像时,由于指向角度的不同导致成像分辨率存在一定的差异,由此带来了目标综合辨识率的不同,同样需要对不同目标辨识率情况下的获取次数做分类统计。

4 典型遥感卫星目标获取能力指数评价分析

近年来,商业遥感卫星发展迅猛,多个国家研制发射了一系列高性能遥感卫星。其中,世界观测(WorldView)卫星是美国数字地球公司发展的高分辨率商业遥感卫星,先后于 2007 年、2009 年、2014 年、2016 年成功发射 4 颗,极大地增强了其全球地理信息收集能力以及在商业遥感卫星市场的竞争力;昴星团(Pleiades)卫星是法国军民两用遥感卫星,尽管重量不到 1 000 kg,但标称分辨率达到 0.7 m,经增强处理后,可进一步提高至 0.5 m;我国也于去年底发射了高景一号(Superview-1)商业遥感卫星,重量仅 560 kg,分辨率达到 0.5 m。

这些卫星的主要技术指标如表 1 所示^[1-2],其中,Worldview-4 卫星性能基本与 Worldview-3 相同。

表 1 典型商业遥感卫星性能指标
Tab. 1 Performance indexes of satellites

卫星	WorldView-1	WorldView-2	WorldView-3
轨道高度/km	496	770	617
分辨率/m	0.50	0.46	0.31
成像幅宽/km	17.7	16.4	13.1
指向调节能力	旋转 200 km 用时为 10 s	旋转 200 km 用时为 10 s	旋转 200 km 用时为 12 s
角度转动范围/(°)	±45	±45	±60
卫星质量/kg	2 500	2 615	2 800
卫星寿命/a	7	7	7
卫星	WorldView-4	Pleiades	高景一号
轨道高度/km	617	694	530
分辨率/m	0.31	0.70	0.50
成像幅宽/km	13.1	20	12
指向调节能力	旋转 200 km 用时为 12 s	侧摆 60° 用时为 25 s	侧摆 25° 用时为 20 s
角度转动范围/(°)	±60	±60	±45
卫星质量/kg	2 800	940	560
卫星寿命/a	7	5	8

(1) 卫星单次目标综合辨识

以桥梁、设施等典型目标为参考基准,根据发现、识别、确认等目标信息提取任务的重要性不同,设定权重系数为(0.2, 0.3, 0.5),由此得到上述 6 颗星相应分辨率等级时的目标综合辨识数量分别为:8.4、11.8、16.5、7.9 和 8.4。具体参数如表 2 所示。

表 2 不同分辨率对应的目标综合辨识数量
Tab. 2 Number of target comprehensive identifications

卫星	WorldView-1	WorldView-2	WorldView-3
成像分辨率	0.5	0.46	0.31
不同分辨率时 目标综合辨识数量	8.4	11.8	16.5
卫星	WorldView-4	Pleiades	高景一号
成像分辨率	0.31	0.7	0.5
不同分辨率时 目标综合辨识数量	16.5	7.9	8.4

(2) 卫星日均过顶次数

根据卫星轨道、指向调节范围等参数, WorldView 等 6 颗星对不同纬度目标的每天平均过顶次数如表 3 所示。显然, 轨道越高、指向调节范围越大, 目标所处纬度越高, 日均过顶次数越多。

表 3 卫星日均过顶次数统计
Tab. 3 Overhead times per day

卫星	WorldView-1	WorldView-2	WorldView-3
目标 1(40°)	0.59	0.92	1.04
目标 2(20°)	0.49	0.74	0.86

卫星	WorldView-4	Pleiades	高景一号
目标 1(40°)	1.04	0.82	0.57
目标 2(20°)	0.86	0.66	0.48

(3) 卫星单次过顶成像次数

根据实际运行经验, 不失一般性, 各星传感器指向调节成像响应时间随角度而线性变化。以 Worldview 系列卫星为例, 各星指向转动用时随转动角度的变化如图 1 所示。

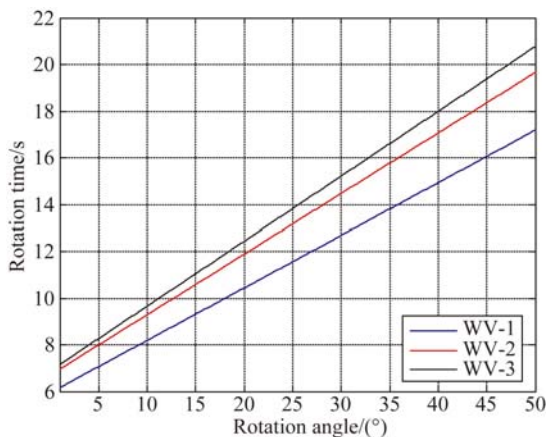


图 1 WorldView 系列卫星指向调节能力
Fig. 1 Pointing adjustment capability

基于指向调节成像响应时间的线性模型, 6 颗星一次过顶对星下点单个目标点的可成像次数如表 4 所示。

表 4 卫星一次过顶可成像次数

Tab. 4 Number of satellite imagings

卫星	WorldView-1		WorldView-2		WorldView-3	
过顶时长/s	154		273		296	
单次转动角度/(°)	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
	12.5	4.9	7.9	2.6	10.6	2
单次转动用时/s	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
	8.8	6.9	8.7	6.7	9.9	6.5
成像次数	较高	较低	较高	较低	较高	较低
	分辨率	分辨率	分辨率	分辨率	分辨率	分辨率
	8	3	15	4	9	11

卫星	WorldView-4		Pleiades		高景一号	
过顶时长/s	296		306		148	
单次转动角度/°	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
	10.6	2	9.2	2.4	14.6	2
单次转动用时/s	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
	9.9	6.5	6.2	6.0	19.2	10.5
成像次数	较高	较低	较高	较低	较高	较低
	分辨率	分辨率	分辨率	分辨率	分辨率	分辨率
	9	11	14	2	6	2

(4) 卫星日均综合辨识目标数量

综合不同分辨率对应的目标综合识别数量、卫星单次过顶成像次数, 以及卫星日均过顶次数, 可以得到 6 颗卫星的日均综合辨识目标数量, 即信息获取能力指数, 如表 5 所示。

表 5 卫星日均综合辨识目标数量

Tab. 5 Number of target comprehensive identification per day

卫星	WorldView-1		WorldView-2		WorldView-3	
成像分辨率	较高	较低	较高	较低	较高	较低
	0.5~0.75	0.75~0.91	0.46~0.75	0.75~1.24	0.31~0.5	0.5~0.94
对应目标综合辨识数量	11.8	8.4	11.8	8.4	16.5	11.8
单次过顶成像次数	8	3	15	4	9	11
单次过顶综合辨识目标数量	119.6		210.6		278.3	
日均综合辨识目标数量	目标 1 (20°)	目标 2 (40°)	目标 1 (20°)	目标 2 (40°)	目标 1 (20°)	目标 2 (40°)
	58.6	70.5	155.0	192.7	209.0	252.7

续表
Continued

卫星	WorldView-4		Pleiades		高景一号	
	较高	较低	较高	较低	较高	较低
成像分辨率	0.31~0.5	0.5~0.94	0.7~0.75	0.75~1.24	0.5~0.75	0.75~0.84
对应目标综合辨识数量	16.5	11.8	9.4	7.9	11.8	8.4
单次过顶成像次数	9	11	14	2	6	2
单次过顶综合辨识目标数量	278.3		147		87.6	
日均综合辨识目标数量	目标1 (20°)	目标2 (40°)	目标1 (20°)	目标2 (40°)	目标1 (20°)	目标2 (40°)
	209.0	252.7	97.0	120.5	42.0	49.9

以 20° 典型纬度的日均过顶次数为例,得到 WorldView-1 等 6 型卫星的日均综合辨识目标数量分别为:58、155、209、209、97 和 42。

(5) 评估结果分析

对比 WorldView 系列卫星,由于分辨率的提升,在星下点方向成像时,WorldView-3 卫星的目标综合辨识数量较 WorldView-1 提升了 6%,远端成像时提升了 40%,平均提升了 23%;由于轨道高度的提升以及转动角度范围的增大,与 WorldView-1 比较,对典型目标的过顶次数提升了 75%,单次过顶成像次数提升了 82%,加上不同指向方向的成像次数,WorldView-3 的日均综合辨识目标数量较 WorldView-1 提升了 2.5 倍是基本合理的。

高景一号和 Pleiades 相比,一是分辨率略有提升,由 0.7 m 提升至 0.5 m,但由于现有目标辨识表中分辨率档位划分较粗,导致在接近星下点方向成像时,目标综合辨识数量没有明显变化,远端成像时由于分辨率变化较大,目标综合辨识数量提升了 6%;二是由于轨道高度较低以及转动角度范围相对较小,日均访问次数略有下降,以 20° 典型纬度的目标为例,降低约 27%;三是指向

调节能力相差较大,加上轨道高度以及指向调节范围的差别,单次过顶最大成像次数减小了 50%。综合上述因素,高景一号的日均综合辨识目标数量和 Pleiades 相比,仅为后者的 43.3%。

高景一号和 WorldView-1 相比,一是分辨率相同,不同角度成像时的目标综合辨识数量没有明显变化;二是轨道高度接近,但转动角度范围相对较小,日均访问次数略有下降,如 20° 典型纬度目标降低了约 2%;三是指向调节能力相差较大,加上轨道高度以及指向调节范围的差别,单次过顶最大成像次数减小约 27%。综合上述因素,高景一号的日均综合辨识目标数量和 WorldView-1 相比,仅为后者的 71.7%。

可见,影响光学遥感卫星信息获取能力的各因素紧密关联,片面提高某一项指标,并不能确保整体信息获取能力水平得到应有提高,必须综合权衡各要素,保证各要素间协调匹配,才有可能实现整体最优。

5 结 论

本文分析了影响光学卫星信息获取效能的主要因素,提出了基于目标综合辨识量的光学卫星信息获取效能评价模型,从综合辨识目标量、单位时间获取次数等方面进行了分析实现。在此基础上,针对 WorldView 系列、Pleiades 和高景一号等国内外典型光学遥感卫星进行了仿真评估,结果表明,该指数模型能够对性能各异遥感卫星的信息获取能力做出准确评估,WorldView-3 的分辨率不到 WorldView-1 的两倍,但信息获取能力却是 3 倍多,高景一号分辨率比 Pleiades 高,但实际信息获取能力还不到后者的一半,结果验证了模型的有效性。该模型简洁实用,可为综合评价光学遥感卫星的遥感能力提供量化参考,为新型光学遥感手段发展论证提供评估模型支持。

参考文献:

- [1] 张绍华,徐大龙. 美国商业遥感卫星的发展[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(12):135-138.
ZHANG SH H, XU D L. The development of commercial remote sensing satellites in the United States [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(12):135-138. (in Chinese)

- [2] 徐伟,朴永杰. 从 Pleiades 剖析新一代高性能小卫星技术发展[J]. 中国光学, 2013, 6(1):9-19.
XU W, PIAO Y J. Analysis of new generation high-performance small satellite technology based on the Pleiades [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1):9-19. (in Chinese)
- [3] 徐伟,陈彦彤,朴永杰,等. 基于吉林一号遥感图像的星载目标快速识别系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1):255-262.

- XU W, CHEN Y T, PIAO Y J, *et al.*. Target fast matching recognition of on-board system based on Jilin-1 satellite image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1):255-262. (in Chinese)
- [4] 范国伟, 常琳, 戴路, 等. 敏捷卫星姿态机动的非线性模型预测控制[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(8):2318-2327.
FAN G W, CHANG L, DAI L, *et al.*. Nonlinear model predictive control of agile satellite attitude maneuver [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8):2318-2327. (in Chinese)
- [5] 崔爽, 郭立红, 王伟国, 等. 中低轨卫星高仰角时刻的轨道预测[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(1):245-251.
CUI SH, GUO L H, WANG W G, *et al.*. Orbit forecast of medium and low orbit satellite at the time of high elevation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1):245-251. (in Chinese)
- [6] 项磊, 杨新, 张扬, 等. 基于层次分析法与模糊理论的卫星效能评估[J]. *计算机仿真*, 2013, 30(2):55-61.
XIANG L, YANG X, ZHANG Y, *et al.*. Effectiveness evaluation for satellite system based on analytic hierarchy process and fuzzy theory [J]. *Computer Simulation*, 2013, 30(2):55-61. (in Chinese)
- [7] 刘东坡, 费爱国, 李革. C⁴ISR 系统信息优势度量研究[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(6):27-30.
LIU D P, FEI A G, LI G. Research on C⁴ISR information superiority measurement [J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(6):27-30. (in Chinese)
- [8] 钟季龙, 郭基联. 空中远程作战体系效能评估的组合分析方法[J]. *系统工程*, 2015, 33(11):140-145.
ZHONG J L, GUO J L. The portfolio-analysis methods for assessing effectiveness of system of long-range operation system [J]. *Systems Engineering*, 2015, 33(11):140-145. (in Chinese)
- [9] 施慧杰, 顾浩, 杜阳华. 海战场态势感知能力的度量方法研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2010, 32(3):28-31, 35.
SHI H J, GU H, DU Y H. Research on measurement of sea battlefield situation awareness [J]. *Command Control & Simulation*, 2010, 32(3):28-31, 35. (in Chinese)
- [10] 邓冰. 遥感影像信息度量方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2009:23-41.
DENG B. *Research on remote sensing image information measurement method* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009:23-41. (in Chinese)
- [11] 沈宇飞, 王轶博, 矫贺明, 等. 一类模糊评价模型与通信卫星效能评估[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(4):129-132.
SHEN Y F, WANG Y B, JIAO H M, *et al.*. A class of fuzzy evaluation model and the effectiveness evaluation of telecommunication satellites [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(4):129-132. (in Chinese)
- [12] 沈如松, 张育林. 光学成像侦察卫星作战效能分析[J]. *火力与指挥控制*, 2006, 31(1):16-20.
SHENG R S, ZHANG Y L. Analyses of operational effectiveness of optical imaging reconnaissance satellite [J]. *Fire Control and Command Control*, 2006, 31(1):16-20. (in Chinese)
- [13] 王伟, 郑重, 李鹏飞, 等. 面向任务的成像卫星传感器观测能力度量方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(12):1480-1483, 1498.
WANG W, ZHENG ZH, LI P F, *et al.*. A mission oriented measuring method for imaging satellite sensors' observing capabilities [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(12):1480-1483, 1498. (in Chinese)
- [14] 谢剑锋, 王鹏, 何川东, 等. 基于证据推理的卫星遥感探测效能评估[J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(2):98-101.
XIE J F, WANG P, HE CH D, *et al.*. Effectiveness evaluation for satellite remote sensing detect based on evidential theory [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2015, 36(2):98-101. (in Chinese)
- [15] 刘刚, 邹自力, 胡焰智, 等. 指挥信息系统作战运用效能评估指导模式研究[J]. *兵工自动化*, 2015, 34(7):65-70.
LIU G, ZOU Z L, HU Y ZH, *et al.*. Research on effectiveness evaluation guidance mode of operational application for command information system [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2015, 34(7):65-70. (in Chinese)

作者简介:



刘 锋(1974—),男,江西宜春人,研究员,1996年、1999年于国防科学技术大学分别获得学士、硕士学位,主要从事航天遥感系统总体设计、光学遥感质量仿真与分析及遥感卫星系统效能评估技术研究。E-mail:ericrs@126.com



李 琳(1977—),女,山东临沂人,研究员,2000年、2003年于解放军理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事遥感卫星总体设计、星上图像处理与检测技术研究。E-mail: thisisll@sina.com