

星载光学遥感成像系统复杂性分析*

余奇,王泽龙,谭欣桐,朱炬波

(国防科技大学文理学院,湖南长沙 410073)

摘要:为研究星载光学遥感成像系统的复杂性,由复杂系统的基本特征与系统研究的基本原则出发,通过对成像全链路流程的分析,确定光学遥感成像系统的复杂性来源及其表现形式。建立星载光学成像的数学模型,以系统重要参数——调制传递函数为基点,通过正过程建模分析和逆过程测量计算相结合的方式,分析了系统复杂性研究的基本原则,即还原论与整体论相结合、定性与定量相结合的过程。由正、逆过程的对比分析,一方面阐述了系统性能与各个环节参数之间的关系,另一方面又由正则化盲反卷积的方式得到图像中真实的调制传递函数。二者相辅相成,既能通过补偿系统复杂性因素影响提升系统性能,又能进一步指导系统优化设计。

关键词:星载光学遥感成像系统;系统复杂性;调制传递函数;盲反卷积;正则化方法

中图分类号:N945.15\N556.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)06-187-06

Complexity analysis of space borne optical remote sensing system

YU Qi, WANG Zelong, TAN Xintong, ZHU Jubo

(College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to analyze the complexity of space borne optical remote sensing system and the source of complexity and its forms of optical remote sensing system were determined by analyzing the whole imaging chain, and the mathematical model of this process was built starting with the basic characteristics and rules of complex system. Based on the important parameter, namely MTF (modulation transfer function), the fundamental research pathway of complex system was analyzed by combining mathematical modeling and computing, namely combing principle reductionism with principle holism and combing qualitative analysis with quantitative analysis. Through the contrasting of the mathematical model and the computing result, on the one hand, the relationship between system performance and these key parameters were figured out; on the other hand, the true MTF of the system was obtained by using regularization blind deconvolution method. These analyses can make great contribution to not only the image quality but also the optimization of remote sensing system.

Key words: space borne optical remote sensing system; system complexity; modulation transfer function; blind deconvolution; regularization method

遥感是一门涉及多个学科的综合探测技术,涵盖了能量的产生与传播、能量与物质的相互作用、能量探测及其数据处理与分析等多个层次。作为一个多层次庞大的系统,遥感系统具有极强的复杂性。星载光学成像遥感作为一种典型的遥感技术,在空间对地观测任务中扮演着十分重要的角色。经过近半个世纪的发展,星载光学遥感成像系统经历了从返回式到在轨式、单色传感到多/高光谱传感、低分辨率到高分辨率的不断进步,具有代表性的系统有 LANDSAT 系列、SPOT 系列、WorldView 系列,等等。我国的光学遥感成像也从最初的资源系列发展到高分、天绘系列等,

涵盖了高低轨道、多光谱段、不同分辨率等各技术层次,在资源监测、防灾救灾、国防军事等领域发挥着重大的作用。

作为一种包含多层次、多分系统的复杂系统^[1],星载光学遥感成像系统受到系统间、系统与环境之间各种非线性、不确定性因素的影响,最终作用于成像过程,会导致图像质量下降。因此,系统的成像质量是对系统复杂性的直接反映。可将关于系统的复杂性研究转化到关于系统成像质量的分析上,以反映成像质量的系统核心指标为着力点,研究星载光学成像系统的复杂性。通过定性与定量分析,一方面补偿各种系统复杂性因

* 收稿日期:2016-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61405251,61471369);国防科技大学基金资助项目(JC14-02-02)

作者简介:余奇(1994—),男,河南潢川人,博士研究生,E-mail:yqndt10@gmail.com;

王泽龙(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:zelong_wang@163.com

素的影响以提升成像质量;另一方面能指导系统参数设计,提升光学遥感成像系统设计水平。

1 星载光学遥感成像系统及其复杂性

1.1 典型星载光学遥感成像系统链路

星载光学遥感成像系统全链路^[2]流程如图 1 所示。入射太阳光首先作用于地面目标,携带目标信息的反射太阳光经过地球大气层,作用于星载光学成像系统,记录光学图像,完成了由信息物理机理层面到数据层面的转化;然后,由星上的数据处理系统对原始成像数据进行压缩处理,传输到地面接收站;最终,数据解压还原成目标图像,以供使用者使用,从而获得目标的信息,为使用者的下一步行动做指示与参考,这样就完成了由图像数据层面到用户层面的转化,如图 1 中的划分。

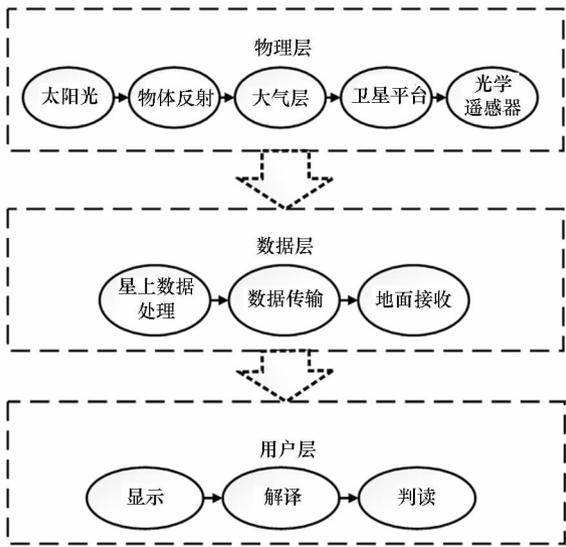


图 1 典型星载光学遥感成像系统构成

Fig. 1 Typical space borne optical remote sensing system

由上述分析可知,典型的星载光学遥感系统包含物理层、数据层、用户层这三个层次。每一个层次均由不同的子系统组成,如物理层中的物体反射效应、大气散射效应、光学传感器接收,等等。这些子系统相互作用,各自完成其独立的功能,最终使得各层次系统组成的整体呈现涌现性特征,即由物理原理层次的作用与堆积产生了数据层的目标信息,而由数据层的传播与处理获得了用户可以直观理解的目标信息,这都是整体涌现性行为的体现。涌现性不是通过简单的叠加作用产生的,而是通过各组分、各子系统、各层次之间的特定关系而产生的复杂性行为^[3-4]。涌现性的存在是复杂系统的重要标志,只有复杂系统及系统间的复杂相互作用才会产生出整体涌现性^[1,3-4]。

1.2 光学遥感成像系统复杂性

对于光学遥感成像系统而言,其复杂性根源于各层次、各子系统之间的非线性、随机性相互作用^[5],如物体反射效应、大气散射效应以及平台非线性振动、非线性光学系统等均将强烈的非线性相互作用引入到系统中,提高了系统的复杂性。随机性相互作用则更为普遍,不仅包含大气状态、环境参数的随机性,而且存在于系统各个环节的随机性噪声也会进一步地提高系统复杂性程度。

进行系统复杂性研究需要把握以下几个原则:整体论与还原论相结合、定性分析与定量研究相结合、确定性与不确定性相结合^[3]。具体到光学遥感成像系统,就要坚持正过程建模与逆过程分析相结合、定性分析与定量研究相结合、模型辨识与参数估计相适应的原则。以成像系统的核心指标为牵引,量化进行正过程建模,以反映不同非线性、随机性因素对成像质量的影响,同时对于实际系统辅以逆过程分析,从而确定由于随机性与非线性因素所共同作用下的具体模型与参数,以达到对于光学遥感成像系统复杂性的全面认识。

1.3 成像系统数学模型与关键参数

典型星载光学成像系统的数学模型为:

$$g = h * f + n \tag{1}$$

其中, f 为观测场景, g 为观测图像, h 为成像系统点扩散函数(Point Spread Function, PSF), n 为成像噪声。两边同时做 Fourier 变换,可以得到式(1)的频域表示为:

$$G = HF + N \tag{2}$$

由式(1)可知,成像过程是一个系统点扩散函数与观测场景的卷积过程,整个过程在频域表现为一个低通滤波,使得观测图像相比于原始场景高频成分对应的细节信息丢失,从而造成图像清晰度下降。

系统的点扩散函数是成像系统性能的重要表征,其傅里叶变换可以写成:

$$H = MTF^{iPTF} \tag{3}$$

调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)与相位传递函数(Phase Transfer Function, PTF)均是频率的函数,MTF 反映的是系统的幅-频响应特性,PTF 反映的是系统的相-频响应特性。当系统的 MTF 下降时,相应频率输入信号的高频信息将会丢失,对成像质量产生影响。一般地,由于图像是光场能量的表现,所以通常仅考虑系统的 MTF 作为星载光学成像系统

重要的评价指标。

系统 MTF 对图像频谱的影响如图 2 所示,可以发现,MTF 对图像的影响在频域表现为频谱区域的截断。观测图像和场景的对比说明,对应于频谱高频部分的图像细节信息经过观测 MTF 作用被平滑掉,观测图像相比于场景存在降质效应。

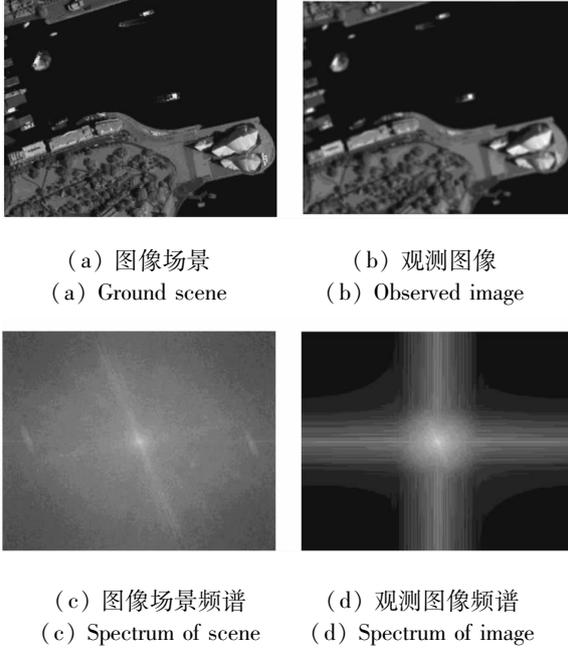


图 2 系统 MTF 对图像频谱的影响

Fig.2 Influence of MTF on image spectrum

以系统 MTF 建模与参数估计为核心,进行光学遥感系统的复杂性分析与研究。

2 星载光学遥感成像系统 MTF 建模与参数辨识

2.1 MTF 模型建立

由系统全链路流程图 1 可知,成像过程各个环节对系统的 MTF 均有影响,成像系统 MTF 的构成如图 3 所示。

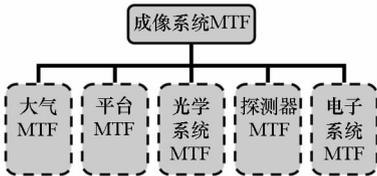


图 3 成像系统 MTF 构成

Fig.3 MTF of the image system

1) 大气环节 MTF。大气环节对于成像质量的影响十分复杂,且常常表现出极强的非线性,大气中存在的悬浮颗粒、云层等都会对图像质量产生影响,其主要表现为两个方面的效应:湍流和微粒散射^[8]。大气环节 MTF 可以写成二者乘积的

形式:

$$MTF_{\text{atmosphere}} = MTF_{\text{turbulence}} \times MTF_{\text{particle}} \quad (4)$$

其中,

$$MTF_{\text{turbulence}} = \exp\{-57.53\nu^{\frac{5}{3}}C_n^2\lambda^{-\frac{1}{3}}R\} \quad (5)$$

$$MTF_{\text{particle}} = \begin{cases} \exp\{-A_\alpha R - S_\alpha R(\nu/\nu_c)^2\}, \nu \leq \nu_c \\ \exp\{-(A_\alpha + S_\alpha)R\}, \nu > \nu_c \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\nu = f\omega$ 为角空间频率,表示每弧度内的周数, C_n^2 是折射率结构常数, λ 为波长, R 为光的传播距离, S_α 和 A_α 分别为大气微粒的散射系数与吸收系数, ν_c 为角空间截止频率。

2) 光学系统 MTF。

① 光波衍射的 MTF。由于光波的衍射,点光源发出的光在焦平面上会扩散成一个小圆,这种扩散会导致 MTF 的下降,其表达式为:

$$MTF_{\text{opt1}} = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right) - \frac{\nu}{\nu_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^2} \right] \quad (7)$$

式中, ν 为景物的空间频率, ν_0 为光学系统的空间截止频率。

② 像差系统的 MTF。其表达式为:

$$MTF_{\text{opt2}} = \exp(-2\pi^2\sigma^2\nu^2) \quad (8)$$

其中, $\sigma = 0.51r$, $r = 1.22\lambda F_N$ 为弥散圆半径。

③ 离焦的 MTF。焦点偏移,即电荷耦合元件 (Charge-Coupled Device, CCD) 光敏面偏离了光学系统的焦平面,将会导致 MTF 下降,其表达式为:

$$MTF_{\text{opt3}} = \frac{2J_1(2\pi\Delta N_A\nu)}{\pi\Delta N_A\nu} \quad (9)$$

式中, $J_1(\cdot)$ 为一阶 Bessel 函数, Δ 为轴向离焦量, N_A 为数值孔径。

将上述几个方面的 MTF 相乘即得到整个光学系统的 MTF^[6]:

$$MTF_{\text{optical}} = MTF_{\text{opt1}} \times MTF_{\text{opt2}} \times MTF_{\text{opt3}} \quad (10)$$

3) 平台 MTF。光学遥感器在空间工作时,卫星平台的姿态变化、太阳帆板调整等都会造成系统的振动,进而影响成像质量,这种影响由平台的 MTF 传递到成像过程中去。当平台振动幅度不大时,MTF 可以表示为:

$$MTF_{\text{platform}} = |\text{sinc}(\pi f t_e)| \quad (11)$$

式中, f 为空间频率, t_e 为曝光时间。当平台振幅较大时,高频振动的 MTF 可以表示为:

$$MTF_{\text{platform}} = J_0(2\pi f x_m) \quad (12)$$

4) 探测器 MTF。CCD 探测器件的 MTF 包括几何尺寸的 MTF、转移损失的 MTF 和扩散的 MTF。综合这三个方面的影响,探测器的 MTF 通

常建模为如下形式:

$$\begin{aligned} MTF_{\text{detector}}(u, v) &= \text{sinc}(ua) \text{sinc}(va) \\ &= \text{sinc}\left(\frac{u}{2f_N}\right) \text{sinc}\left(\frac{v}{2f_N}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $f_N = 1/2d$ 为 Nyquist 频率。

5) 电子系统 MTF。电子系统的 MTF 包括以下三个方面:放大器 MTF;电子滤波器 MTF;提升电路 MTF^[8],即:

$$MTF_{\text{electronic}} = MTF_{\text{amp}} \times MTF_{\text{filter}} \times MTF_{\text{boost}} \quad (14)$$

① 放大器的 MTF。放大器的响应可以等效为单级低通滤波器,其 MTF 可以表示为:

$$MTF_{\text{amp}}(f_e) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_e}{f_{e3dB}}\right)^2}} \quad (15)$$

② 电子滤波器的 MTF。通常采用 N 级巴特沃斯滤波器以近似理想低通滤波器。其滤波器 MTF 可以写作:

$$MTF_{\text{filter1}}(f_e) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_e}{f_{e3dB}}\right)^{2N}}} \quad (16)$$

③ 提升电路的 MTF。提升电路用于提高某一频段的响应。其对应的 MTF 为:

$$MTF_{\text{boost}} = 1 + \left(\frac{K_b - 1}{2}\right) \left[1 - \cos\left(\pi \frac{f_v}{f_{\text{boost}}}\right)\right]^{N_b} \quad (17)$$

其中, K_b 为提升幅度, N_b 为提升级数, f_{boost} 为提升频率。

于是,整个光学成像系统 MTF 为:

$$MTF = MTF_{\text{atmosphere}} \times MTF_{\text{platform}} \times MTF_{\text{optical}} \times MTF_{\text{detector}} \times MTF_{\text{electronic}} \quad (18)$$

由上述正过程建模可知,MTF 函数类型主要有三大类,高斯型、sinc 型与运动型。但式(18)和上述结论的得出并不代表系统不存在非线性、随机性的相互作用,仅需正过程建模就能够精确描述系统行为与系统性能。系统的复杂性体现在模型组合的复杂性以及模型参数的复杂性这两个方面。

实际过程中,模型不确定、参数不确定都是系统复杂性的体现。因此,对光学遥感成像系统的复杂性研究最终回归到系统 MTF 的模型辨识与模型参数估计上。

2.2 MTF 模型辨识与参数估计

MTF 模型辨识与参数估计主要包括两种途径:直接测量与盲卷积核估计。常用的直接测量

法有:脉冲法、狭缝法、刃边法等^[9-11]。盲卷积核估计则主要利用图像先验信息,通过优化方法进行求解^[12-13]。此处建立基于正则化方法的盲卷积核估计模型进行 MTF 辨识与参数估计。

对图像卷积模型(1),基于正则化的盲卷积图像复原一般模型为:

$$\min_{f, h} \frac{1}{2} \|h * f - g\| + \lambda \psi(f) + \beta \varphi(h) \quad (19)$$

其中: λ, β 为正则化参数; $\psi(f)$ 表示附加在待恢复图像上的正则化项; $\varphi(h)$ 表示核函数正则项用以约束核函数先验性质。

在此采用稀疏项加总变分项的方法进行正则化增强,即 $\psi(f)$ 取为总变分算子 $TV(f) = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$,而 $\varphi(h)$ 取作 1 范数稀疏项,即 $\varphi(h) = \|h\|_1$,于是模型(19)变为:

$$\min_{f, h} \frac{1}{2} \|h * f - g\| + \lambda TV(f) + \beta \|h\|_1 \quad (20)$$

其中,总变分项的作用是对图像梯度进行稀疏性约束,从而保持图像的边缘信息,而稀疏项 $\varphi(h)$ 则体现了作为卷积核函数的稀疏特性。

模型(20)的求解,可以通过交替方向迭代方法,分别求解关于待求解图像的 f 子问题和关于核函数的 h 子问题,迭代更新核函数与待恢复图像,最终能够同时得到图像的 PSF 和去除 PSF 影响后的重建图像。

正规化反卷积模型估计系统 MTF 如图 4 所知。由图 4(a)~(b)所示,利用先验信息对系统 MTF 进行估计,进而通过反卷积去除降质效果,能够补偿系统复杂性因素影响,图像细节特征得到提升。图 4(c)和图 4(d)的对比可明显看出,图像中点、线、面特征更为明显,图像质量得到提升。同时根据计算得到的系统 MTF(见图 4(e))以及成像系统 MTF(见图 4(f))可知,整个系统的 MTF 构成中主要模型为高斯分布模型 $ae^{[(x-b)/c]^2}$,估算得到的分布参数如表 1 所示,分布拟合结果如图 5 所示。

对于不同 MTF 模型,通过此方法也能进行模型辨识,进而计算出不同模型参数,如图 6 所示。

通过 MTF 的正向建模得到了系统的 MTF 与各环节之间的关系。以系统 MTF 为设计指标,即可对各个环节中影响 MTF 的参数进行规划设计,以此作为各个子系统设计的目标,能带动整个系统设计的细化,提升系统研制的可行性。



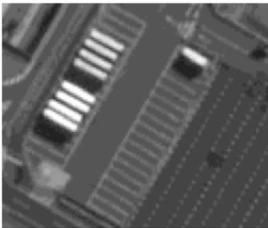
(a) 输入遥感图像

(a) Input image

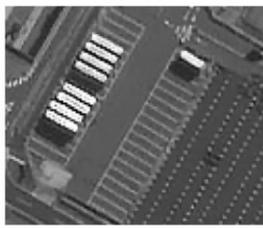


(b) 反卷积增强后图像

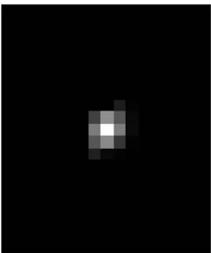
(b) Enhanced image through deconvolution



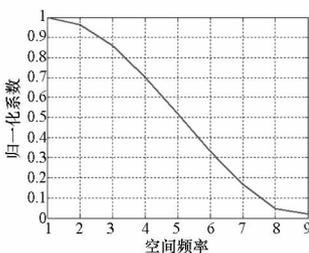
(c) 图(a)中区域放大图
(c) Zoomed-in of Fig. (a)



(d) 图(b)中区域放大图
(d) Zoomed-in of Fig. (b)



(e) 估计得到的 PSF
(e) Estimated PSF



(f) 成像系统 MTF
(f) MTF of Image System

图4 正则化反卷积模型估计系统 MTF
Fig. 4 Blind deconvolution method of MTF estimation

表1 高斯分布估计参数

Tab.1 Parameter of Gaussian distribution

分布参数	数值
a	0.961 3
b	1.349 5
c	4.155 4

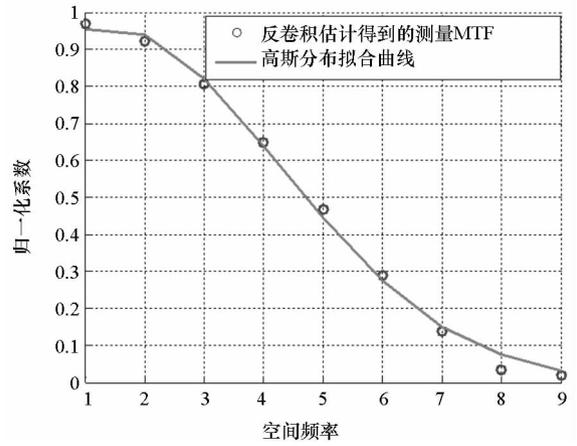
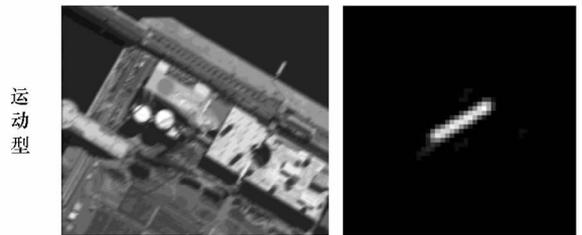
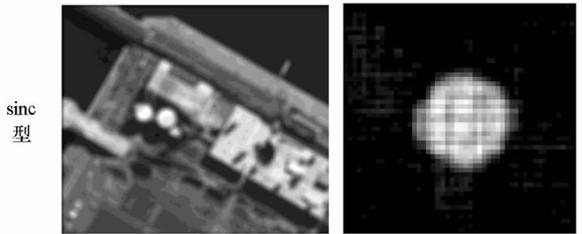


图5 系统 MTF 参数拟合

Fig.5 MTF fitting result of the system



运动型



sinc型



高斯型

(a) 光学系统获得图像 (b) 估算得到的 PSF
(a) Image from the system (b) Estimated PSF

图6 几种光学系统 MTF 类型的识别

Fig.6 Recognition of different MTF mode

此外,MTF 计算是对遥感成像系统设计的一种检验,通过遥感图像反演出系统的 MTF,是对系统实际性能的考验。有两个方面的作用,一是通过模型辨识确定 MTF 的主要影响因素,进而补偿各种复杂性因素的影响,直接提升遥感图像质量;二是与系统设计指标进行对比分析,寻找实际性能与设计指标之间的差距,结合正过程建模,确定造成实际性能下降的原因,不断迭代积累,提升遥感成像系统设计水平。

3 结论

通过对星载光学遥感成像系统复杂性问题的研究,以系统评价指标 MTF 为牵引,根据系统复杂性的研究方法,从还原论的 MTF 正过程建模和整体论的 MTF 计算两个方面分别进行定性与定量分析。研究表明,对光学遥感成像系统,必须坚持正向建模与逆向分析相结合的方法,利用数学模型与实际数据不断迭代改进,一方面能消除系统复杂性对系统成像性能的负面影响,另一方面能逐渐加深对系统的认识,为系统的优化设计奠定基础。

参考文献 (References)

- [1] 许国志. 系统科学与工程研究[M]. 上海:上海科技教育出版社, 2000.
XU Guozhi. System science and engineering: theories and application [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [2] 马文坡. 航天光学遥感技术[M]. 北京: 中国科技出版社, 2011.
MA Wenpo. Space optical remote sensing technology [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2011. (in Chinese)
- [3] 许国志. 系统科学 [M]. 上海:上海科技教育出版社, 2000.
XU Guozhi. System science [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [4] Lin Y, Duan X J, Zhao C L, et al. Systems science: methodological approaches [M]. USA: CRC Press, 2012.
- [5] Povey A C, Grainger R G. Known and unknown unknowns: uncertainty estimation in satellite remote sensing [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8 (11): 4699 - 4718.
- [6] 王芳. 光学遥感成像误差建模与图像质量提升方法[D]. 长沙: 国防科技大学, 2014.
WANG Fang. Error modeling and image quality improving method in optical remote sensing imaging [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] 黄巧林, 姜伟. 高分辨率航天光学遥感器发展新思路研究[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(4): 48 - 50.
HUANG Qiaolin, JIANG Wei. A study of the new direction of space-borne high-resolution optical remote sensor [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 28(4): 48 - 50. (in Chinese)
- [8] 卜凡. 光学遥感系统的建模仿真及图像处理技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014.
BU Fan. Study on modeling and simulation of optical remote sensing system and image processing technology [D]. Xi'an: the University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2014. (in Chinese)
- [9] Boreman G D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems [M]. Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2001.
- [10] Rossman K. Point spread-function, line spread-function, and modulation transfer function; tools for the study of imaging systems [J]. Radiology, 1969, 93(2): 257 - 272.
- [11] Helder D, Choi J, Anderson C. On-orbit modulation transfer function (MTF) measurements for IKONOS and quick bird [C]//Proceedings of the JACIE Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop, 2006: 14 - 16.
- [12] Almeida M S, Figueiredo M A. Parameter estimation for blind and non-blind deblurring using residual whiteness measures [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(7): 2751 - 2763.
- [13] 吴玲达, 郝红星. 一种图像去模糊正则化恢复算法参数确定方法 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(4): 79 - 84.
WU Lingda, HAO Hongxing. Research on the regularization parameter of image deblurring [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(4): 79 - 84. (in Chinese)