

## 基于低空图像的 Worldview-1 全色波段仿真

张冬英<sup>1,2</sup>, 易维宁<sup>1</sup>, 洪津<sup>1</sup>, 方薇<sup>3</sup>

- (1. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽合肥 230031;
2. 解放军陆军军官学院, 安徽合肥 230031;
3. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 对地资源探索是遥感技术的追求目标, Worldview-1 是高精度商业卫星之一, 星下点分辨率为 0.5 m。提出一种基于图像的 Worldview-1 全色波段仿真方法。以低空飞行的可见近红外图像为数据源, 利用大气校正或经验线性法进行反射率反演得到地面反射率图; 然后经过以下四个步骤: 辐射传输模拟、光谱波段匹配、空间分辨率仿真和传感器调制传递函数 MTF 仿真, 仿真出 Worldview-1 全色波段图像。通过以飞艇为平台的外场试验获取数据, 将仿真图像与 Worldview-1 全色波段图像从相似度及图像纹理参数进行对比, 结果显示这种模拟地物、大气、传感器特性的图像仿真方法可以应用于 Worldview-1 全色波段图像的仿真。

**关键词:** 图像仿真; 大气辐射传输; 全色; 光谱波段合成

**中图分类号:** TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0620-05

## Panchromatic image simulation of Worldview based on low-level flight images

Zhang Dongying<sup>1,2</sup>, Yi Weining<sup>1</sup>, Hong Jin<sup>1</sup>, Fang Wei<sup>3</sup>

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China;
3. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Earth science research and application requirements have often been driven by currently available remote sensing technology. Worldview-1 is the highest-resolution commercial remote sensing satellite now operating, offering panchromatic imagery with 0.5 m resolution at nadir. An image simulation method for Worldview-1 panchromatic band was mentioned. Firstly, the visible and near infrared images obtained by low-level flight were accepted as data resources. After atmospheric correction or empirical linear method the reflectivity of ground could be deduced. Then through four steps simulation: radiative transfer, spectral band synthesis, spatial resolution simulation, modulation transfer function simulation, the panchromatic image of Worldview-1 could be evaluated. Experimentation was carried out to test the method using an airship as platform. Though similarity and texture analysis between simulated image and real Worldview-1 image, the result showed the method that simulated the

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 中国科学院方向性创新基金(KGCX-SW-413)

作者简介: 张冬英(1975-), 女, 讲师, 博士, 主要从事光学遥感信息获取和处理方面的研究工作。Email: emilyzdy@sina.com

interactions between parameters of objects, atmosphere and the characteristic of sensor enables one to effectively reproduce the panchromatic image of Worldview-1.

Key words: image simulation; radiative transfer; panchromatic; spectral band synthesis

## 0 引言

由于受观测条件的限制,获取多种条件下的各类卫星遥感数据十分困难。光学遥感图像仿真技术,因其不受时空限制、无破坏性、可多次重复、安全性和经济性而对遥感器的设计、优化、定标、测试、误差估计和应用等方面具有重要应用价值<sup>[1-3]</sup>。

模拟技术早期主要是物理仿真。1998年 Banon 等基于 SPOT 星图像为的 CBERS 波段 4 图像。2001年 Borner 等开发仿真软件 SENSOR<sup>[4]</sup>,其特点是模拟了观测场景、大气环境和传感器特性等条件下遥感成像过程。2003年, G.A. Boggione 等应用 TM 的多波段图像模拟全色波段。2005年, DIRS 实验室开发了数字成像与遥感图像生成软件,主要研究了基于辐射传输理论的可见到热红外的图像仿真。文中介绍了一种基于低空飞行获取的图像进行 Worldview-1 全色波段仿真方法,通过对光学遥感成像过程中的主要环节——大气辐射传输、地物反射特性和传感器性能的相互作用模拟实现遥感图像仿真。

## 1 仿真原理

考虑到卫星垂直对地观测和传感器的不同性能,仿真需要经过以下 4 个步骤:辐射传输模拟、光谱波段匹配、空间分辨率仿真和传感器调制传递函数 MTF (Modulation Transfer Function) 仿真。

### 1.1 辐射传输模拟

光学遥感成像过程包括了从辐射源-大气层-地球表面-大气层-探测器的一系列复杂的传输过程。在可见光波段,一般认为传感器接收到的辐射信息由 3 部分组成:(1)大气程辐射,即入射的太阳光未到达地面就被大气散射到传感器视场内的辐射;(2)来自目标像元的辐射,包括目标对太阳直射光的反射和目标对天空漫射光的反射;(3)来自邻近像元的辐射,即经大气散射而进入传感器观测立体角内的周围环境的漫反射。

首先忽略邻近像元的影响,根据大气辐射传输理论有:

$$\rho^{(1)} = \frac{\pi[d^2(c_0 + c_1 \cdot DN) - L_p]}{\tau_v E_g(\rho_r = 0.15)} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为地物地面反射率; $L_p$  为程辐射; $E_g$  为  $\rho_r = 0.15$  时的地面辐照度; $\tau_v$  为大气总透过率; $c_0, c_1$  为传感器定标系数(截距和斜率); $DN$  图像数字值; $d^2$  日地距离校正因子。

像元邻近区域平均反射率为:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N \rho_{i,j}^{(1)} \quad (2)$$

式中: $N$  是半径,为  $R$  的邻近像元的数目。

扣除目标背景的影响,得到反射率:

$$\rho^{(2)} = \rho^{(1)}(x,y) + q(\rho^{(1)} - \bar{\rho}(x,y)) \quad (3)$$

其中

$$q = \tau_{\text{diff}} / (\tau_v - \tau_{\text{diff}}) \quad (4)$$

式中: $\tau_{\text{diff}}$  是漫射透过率。

由于电磁波辐射与大气相互作用的理论非常复杂,在实际应用中,通常都是用近似的方法并做简化来求解。常用的大气辐射传输计算模型有 LOWTRAN、MODTRAN、6S 等。

6S 是模拟太阳反射光谱区(0.25~4.0  $\mu\text{m}$ )传感器信号的辐射传输软件。可以计算任意海拔高度的目标,模拟任意高度的航空观测,光谱积分间隔为 2.5 nm,针对不同的经纬度和季节气候,共提供了 7 种大气模式,每种大气模式定义了各自的大气压、大气廓线、温度和湿度等,另外还提供两种用户自定义模式。同样,对于气溶胶也提供了 7 种模式和一个自定义方式。6S 固有精度 1%。

文中利用大气辐射传输模型 6S 计算出程辐射、地面辐照度和大气透过率。

### 1.2 光谱波段匹配

Worldview 全色波段的波段范围是 400~920 nm,而图像数据源是带宽为 20 nm 的连续多光谱图像,如图 1 所示。因此从窄波段的连续图像仿真到宽波段的全色图像必须进行波段匹配。用下式求得其波段反射率:

$$\rho^e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (5)$$

式中： $\rho^e$  为全色波段反射率； $S_i(\lambda)$  是波段  $i$  的光谱响应函数，波段范围是  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ，在这个波段范围以外的光谱响应等于 0。

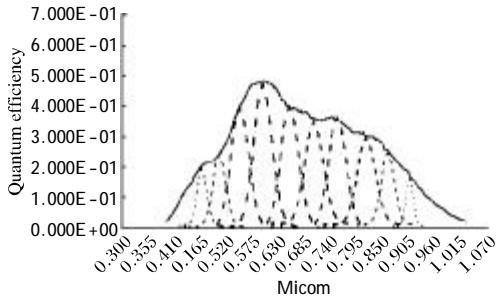


图 1 光谱合成示例

Fig.1 Illustration of spectral band synthesis

### 1.3 空间分辨率仿真

空间分辨率仿真的主要目的是将观测高度仿真后的图像的分辨率调整到与被仿真的卫星的地面分辨率一致。

空间分辨率仿真后的图像可以表示为：

$$g(x,y) = \frac{1}{M} \sum f(x,y)H(r,s) \quad (6)$$

式中： $g(x,y)$  为空间分辨率仿真后图像； $f(x,y)$  为原始图像； $H(r,s)$  为加权函数； $M$  为加权和。

### 1.4 MTF 仿真

调制传递函数 MTF 在物理光学中，是光学系统成像性能的综合评价指标。MTF 是遥感器的一个重要的物理性能指标，遥感器 MTF 的变化将直接影响到成像结果和图像质量。

对于一个线性系统在空域中输出图像可以用下式给出：

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) \quad (7)$$

式中： $g(x,y)$  为输出图像； $f(x,y)$  为原始图像； $h(x,y)$  为传感器脉冲响应函数；“\*”表示卷积运算。

对于空域的卷积运算，可以利用傅里叶变换转换为频域运算。

$$G(\mu,v) = F(\mu,v) * M(\mu,v) \quad (8)$$

式中： $G(\mu,v)$  为输出图像的傅里叶变换； $F(\mu,v)$  为原始图像的傅里叶变换； $M(\mu,v)$  为调制传递函数。

## 2 Worldview-1 传感器特征

Worldview-1 是 2007 年 9 月 18 日发射的高精

度商业卫星，推扫成像方式，星下点分辨率为 0.5 m。在仿真中需要用到传感器的辐射特性参数、光谱响应函数和 MTF。

### 2.1 辐射特性

将大气顶部的光谱辐射亮度值转换成图像的 DN 值称为辐射定标，Worldview 图像只有经过定标才能与其他传感器图像比较。表 1 为 Worldview-1 的绝对定标系数<sup>[5]</sup>。

表 1 Worldview-1 绝对定标系数

Tab.1 Worldview-1 absolute radiometric calibration factors

TDI Level	Absolute calibration factor
8	0.339 051 0
16	0.167 847 0
32	0.082 662 6

### 2.2 光谱响应函数

图 2 为 Worldview-1 的光谱响应函数<sup>[6]</sup>。

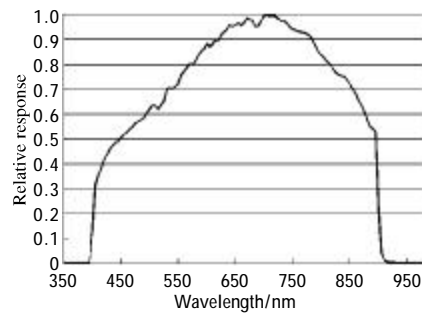


图 2 Worldview-1 波段响应函数

Fig.2 Worldview-1 spectral response

### 2.3 图像质量

图 3<sup>[7]</sup> 为 DigitalGlobe 网站提供的 worldview-1 全色波段 2007 年在轨测量的 MTF 曲线图。

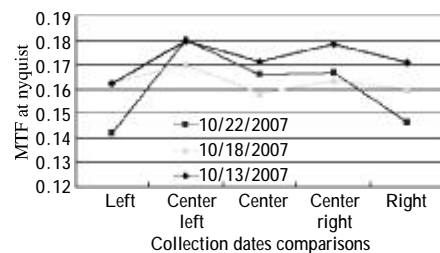


图 3 Worldview-1MTF 曲线图

Fig.3 Worldview-1MTF

### 3 试验分析与结论

2008 年夏福建地区以飞艇为平台, 搭载高光谱成像系统进行了飞行。该系统成像装置有两个相机, 一个相机由一组光学镜头、一个液晶可调谐滤光片(LCTF) 和一个 CCD 相机组成, 试验中 LCTF 从 420 nm 调谐到 720 nm, 间隔 20 nm, 一组数据共 16 个波长; 另一个为近红外相机, 相机前置 4 个滤光片, 3 个近红外波段光谱覆盖范围 720~950 nm 和一个全色波段, 滤光片采用机械转轮切换波段。该成像装置被安装在飞艇底部, 垂直观测地面。飞艇飞行高度 500 m, 地面分辨率 0.1 m, 获取了高光谱立体图像数据。地面同步测量地物反射率和大气光学厚度。

以获取的高光谱立体图像数据为数据源, 进行了针对 Worldview-1 全色波段的仿真, 具体步骤为:

(1) 进行辐射传输仿真, 将图像仿真到 450 km 高度, 大气模式采用中纬度夏季, 气溶胶模式采用乡村模式, 能见度 13 km;

(2) 根据公式(5)对 Worldview-1 光谱响应函数逐线积分进行光谱波段匹配;

(3) 空间分辨率仿真, 将原图 0.1 m 的地面分辨率仿真到 0.5 m;

(4) MTF 仿真, 应用 Worldview-1 全色波段的 MTF 曲线, 对图像逐个像元进行卷积运算, 实现图像降质仿真。

将仿真的图像与 2008 年 6 月 23 日的一景 Worldview-1 全色波段图像进行了对比, 主要从图像的相似度及图像的纹理参数进行比较。图像相似度可以描述为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W f(i,j) \cdot g(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W f(i,j)^2 \cdot \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W g(i,j)^2}} \quad (9)$$

式中: H 为图像高; W 为图像宽; f(i, j) 为卫星图像; g(i, j) 为仿真图像。

图像的纹理参数主要从能量、熵、惯性矩和局部平稳进行描述。图像能量能够反映纹理的粗细和方向性的特征; 熵是图像信息量的总体度量, 图像纹理复杂度越高图像信息量就越大, 其熵也越大; 惯性矩能反映出图像灰度复杂度, 其值越大, 图像沟纹越明显, 图像越清晰; 反之越小图像沟纹越弱, 图像越模糊。

能量的算法如下:

$$f = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p^2(i,j) \quad (10)$$

图像熵的算法如下:

$$f = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p(i,j) \log p(i,j) \quad (11)$$

惯性矩的算法如下:

$$F = \sum_{i=0}^L \sum_{j=1}^L P_d(i,j)(i-j)^2 \quad (12)$$

局部平稳的算法如下:

$$S = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \frac{1}{1+(i-j)^2} P_d(i,j) \quad (13)$$

图 4 为仿真图像, 图 5 为 worldview 全色波段图像, 表 2 分别给出了仿真图像与 Worldview-1 全色波段图的最大相似度及纹理特征值的差异。



图 4 仿真图像

Fig.4 Simulated image



图 5 Worldview-1 图像

Fig.5 Worldview-1 image

表 2 仿真图像与 Worldview-1 全色波段图像对比效果

Tab.2 Comparison between Worldview-1 image and simulated image

	Worldview image	Simulated image
Angular secondmoment:	0.271	0.270
Entropy:	1.869	1.926
Inertia quadrature:	1.458	2.078
Inverse difference moment:	0.681	0.656
Similarity	0.884	

图中主要包括了道路、操场、植被以及人工地物 4 类地物, 从表 2 中可以看出两幅图像的最大相似度可以达到 88.4%, 纹理特征值差异不大。

### 4 结论

从比较的结果来看, 这种方法可以应用于 Worldview-1 全色波段的仿真。这种通过辐射传输模

拟、光谱波段匹配、空间分辨率仿真和 MTF 仿真四个步骤的模拟技术获取的模拟图像能够较为真实的替代多种条件限制下的遥感图像。文中提出的方法仿真精度受传感器性能参数的影响,在已知被模拟的传感器的各种性能参数情况下,上述仿真手段是一种可靠性强的方法。上述仿真方法可以获取各种条件下的遥感数据的方法,易于实现,能满足遥感研究的需要。

#### 参考文献:

- [1] Gao Yang, Lei Jie, Yu Hong, et al. Technology of simulation for high precision echo laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 196-199. (in Chinese)  
高阳, 雷杰, 虞红, 等. 半实物仿真中的高精度激光回波模拟技术[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 196-199.
- [2] Shi Kun, Hao Yingming, Wang Mingming, et al. Real-time simulation method of Infrared sea background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012,41(1): 25-29. (in Chinese)  
石坤, 郝颖明, 王明明, 等. 海面背景红外实时仿真[J]. *红外与激光工程*, 2012,41(1):25-29.
- [3] Qing Huiping, Yi Weining, Pan Banglong, et al. Simulation of terrain optical remote sensing imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1177-1180. (in Chinese)  
秦慧平, 易维宁, 潘邦龙, 等. 山地光学遥感成像仿真的实现[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(6): 1177-1180.
- [4] Borner A, Wiest L. Sensor: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 55(6):299-312.
- [5] Park Stephen K, Schowengerdt Robert, Kaczynski Mary - Anne. Modulation -transfer -function analysis for sampled image systems [J]. *Applied Optics*, 1984(23): 2572-2582.
- [6] Philip N Slater, Stuart F Biggar, James M Palmer, et al. Unified approach to absolute radiometric calibration in the solar -reflective range [J]. *Remote Sensing of Enviroment*, 2001, 77(3):293-303.
- [7] Keith S Krause. WorldView -1 pre and post -launch radiometric calibration and early on-orbit characterization[C]// *SPIE*, 2008,7081: 708116-1-1.