

光谱与空间响应函数介绍

陈学泓¹, 杨伟², 陈晋¹

1. 北京师范大学 地理科学学部 遥感科学与工程研究院, 北京 100875;

2. 千叶大学 环境遥感中心, 千叶县 263-8522, 日本

1 定义

遥感传感器在测量地表像元的辐射信号时, 无法精确接收与响应来自理想像元方格和波段范围内的辐射能量。因此, 光谱与空间响应函数就被用于描述遥感像元实际响应的光谱与空间范围。

光谱响应函数SRF(Spectral Response Function), 或称相对光谱响应RSR(Relative Spectral Response), 用于表征遥感传感器对不同波长辐射的响应敏感度。光谱响应函数是一个随波长(λ)变化的函数(表示为 $f(\lambda)$), 其最大值为1, 半峰宽对应为波段宽度或光谱分辨率(图1)。经由光谱响应函数加权, 可将观测目标的光谱辐亮度(L_λ)或光谱反射率(ρ_λ)积分为传感器测得的波段辐亮度(L_{band})或波段反射率(ρ_{band}), 分别如式(1) — (2)所示(Liang, 2003):

$$L_{\text{band}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L_\lambda f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{band}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \rho_\lambda E_s(\lambda) f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} E_s(\lambda) f(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中, λ_{\min} 与 λ_{\max} 分别为传感器能产生响应的最小与最大辐射波长, $E_s(\lambda)$ 表示入射光的光谱辐照度。

空间响应函数, 用于表征遥感传感器像元对不同空间位置辐亮度的响应敏感度。空间响应函数可由空间域的点扩散函数PSF(Point Spread Function)或由频率域的调制传递函数MTF

(Modulation Transfer Function)刻画(Liang, 2003)。PSF从空间域刻画了遥感成像过程中空间模糊化的过程, 一般表示为二维高斯函数(图2(a)):

$$\text{PSF}(x, y) = \frac{1}{2\pi ab} \exp\left(-\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right) \quad (3)$$

式中, (x, y) 表示空间位置坐标, a 和 b 表示两个方向上(通常为交轨与顺轨方向)的PSF宽度。通过PSF卷积可将观测目标的实际辐亮度场($L(x, y)$)转换为遥感传感器观测得到的辐亮度影像($L_{\text{image}}(x, y)$):

$$L_{\text{image}}(x, y) = L(x, y) * \text{PSF}(x, y) \quad (4)$$

式中, $*$ 为卷积运算符。

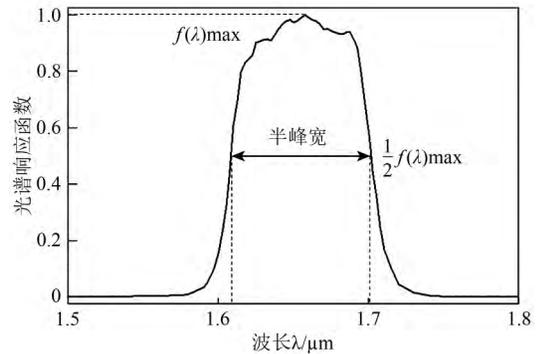


图1 光谱响应函数示意图

Fig.1 Schematic diagram of spectral response function

MTF则从频率域刻画传感器的空间响应, 是PSF经由傅里叶变换后的幅值部分(张熠, 2021):

$$\text{MTF}(\omega_x, \omega_y) = \left| \mathcal{F}(\text{PSF}(x, y)) \right|$$

式中, $\mathcal{F}(\cdot)$ 表示傅里叶变换, (ω_x, ω_y) 表示地物目标的二维空间频率。MTF的意义为不同空间频率

收稿日期: 2024-06-28; 预印本: 2024-08-09

编著者简介: 陈学泓, 研究方向为多源遥感数据融合、地表覆盖制图。E-mail: chenxuehong@bun.edu.cn

引用格式: 陈学泓, 杨伟, 陈晋. 2024. 光谱与空间响应函数介绍. 遥感学报, 28(10): 2694-2696

[DOI: 10.11834/jrs.20244258]

场景下影像对比度与实际场景对比度的比值。通常, MTF 函数可被解耦为交轨和顺轨方向上的两个函数, 它们均随着观测目标空间频率的提高而逐渐下降(图 2 (b))。

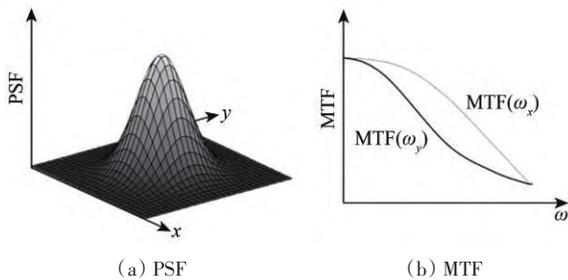


图2 空间响应函数示意图

Fig.2 Spatial response function diagram

2 测量与影响

遥感传感器的光谱响应函数通常在发射前由实验室进行精确标定并发布给用户。常用的遥感光谱定标技术是利用单色仪将光源发出的光分解为波段极窄的单色光, 进而检测传感器对不同波长单色光的响应量(金辉等, 2013)。传感器发射后, 由于环境变化与传感器老化, 光谱响应函数可能发生轻微变化(Sohn等, 2010; Wang等, 2010)。目前多数遥感传感器还不支持光谱响应函数的在轨定标, 无法精确追踪光谱响应函数随时间的变化(Barsi等, 2014)。但是, 针对MODIS传感器(少数搭载光谱定标设备的传感器之一)的分析发现, 光谱响应函数随时间的轻微变化对辐射定标影响不大(Twedt等, 2018)。不同传感器的光谱响应函数之间则可能存在较大差异, 导致不同传感器测得的辐亮度、反射率以及由此计算的光谱指数存在不可忽视的差异(Trishchenko等, 2002)。因此, 对不同传感器数据进行融合分析时, 光谱响应函数差异的校正是一个重要步骤(Claverie, 2023)。同一传感器内部不同探测单元也可能存在光谱响应差异, 这是推扫式传感器条带噪声的重要来源。特别对于高光谱影像, 这种条带噪声尤为明显, 因此条带噪声去除是高光谱遥感的重要预处理环节(Chang等, 2016)。

遥感传感器的空间响应函数同样可在实验室精确测定。但是由于其受光学系统、电子系统、图像运动等多方面复杂因素的综合影响, 实验室很难模拟在轨工作状态下的各种影响因素,

因此很有必要对空间响应函数进行在轨观测(Schowengerdt, 2007)。常用的在轨测量方法包括冲激法、脉冲法、刃边法等。这些方法通过对已知规则几何形状且反差明显的地面目标(点状、线状、边缘等)在遥感影像上的信号进行拟合来得到空间响应函数(Kabir等, 2020; 徐伟伟等, 2020)。不同遥感传感器的空间响应函数可能存在差异, 导致相同空间分辨率的遥感影像在空间清晰度上仍会存在差距。同时, 空间响应函数的存在意味着遥感像元观测到的信号还会来自于地面像元之外的地物, 给像元尺度的定量遥感反演与亚像元尺度的地表覆盖制图带来额外的不确定性(Huang等, 2002; Weiss等, 2007; Wang和Atkinson, 2017)。

3 作用和意义

光谱响应函数与空间响应函数与遥感数据的光谱与空间分辨率紧密相关, 是对光谱分辨性能与空间分辨性能的更精细表达。理解这两种响应函数的概念与影响对于遥感影像的模拟、多源数据融合分析、以及遥感影像解译都具有重要意义。

参考文献(References)

- Barsi J, Lee K, Kvaran G, Markham B and Pedelty J. 2014. The spectral response of the Landsat-8 operational land imager. *Remote Sensing*, 6(10): 10232-10251 [DOI: 10.3390/rs61010232]
- Chang Y, Yan L X, Wu T and Zhong S. 2016. Remote sensing image stripe noise removal: from image decomposition perspective. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(12): 7018-7031 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2594080]
- Claverie M. 2023. Evaluation of surface reflectance bandpass adjustment techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 198: 210-222 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.03.011]
- Huang C Q, Townshend J R G, Liang S L, Kalluri S N V and DeFries R S. 2002. Impact of sensor's point spread function on land cover characterization: assessment and deconvolution. *Remote Sensing of Environment*, 80(2): 203-212 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00298-X]
- Jin H, Jiang H L, Zheng Y Q and Ma H T. 2013. Spectral calibration of the hyperspectral optical remote sensor. *Chinese Journal of Luminescence*, 34(2): 235-239 (金辉, 姜会林, 郑玉权, 马洪涛. 2013. 高光谱遥感器的光谱定标. *发光学报*, 34(2): 235-239) [DOI: 10.3788/fgxb20133402.0235]
- Kabir S, Leigh L and Helder D. 2020. Vicarious methodologies to assess and improve the quality of the optical remote sensing images: a critical review. *Remote Sensing*, 12(24): 4029 [DOI: 10.3390/

- rs12244029]
- Liang S L. 2003. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc: 15-20 [DOI: 10.1002/047172372X]
- Schowengerdt R A. 2007. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. 3rd ed. Burlington: Academic Press: 95-103
- Sohn B J, Kim B R and Lee S S. 2010. Possible shift of spectral response function of the MODIS 6.8 μm water vapor channel causing a cold bias of 2-3 K. Atmospheric Measurement Techniques, 3 (6): 1667-1672 [DOI: 10.5194/amt-3-1667-2010]
- Trishchenko A P, Cihlar J and Li Z Q. 2002. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors. Remote Sensing of Environment, 81(1): 1-18 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00328-5]
- Twedt K A, Angal A and Xiong X X. 2018. Effects of time-varying relative spectral response on the calibration of MODIS reflective solar bands//Proceedings Volume 10764, Earth Observing Systems XXIII. San Diego: SPIE: 338-347 [DOI: 10.1117/12.2321255]
- Wang Q M and Atkinson P M. 2017. The effect of the point spread function on sub-pixel mapping. Remote Sensing of Environment, 193: 127-137 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.002]
- Wang T X, Yan G J, Ren H Z and Mu X H. 2010. Improved methods for spectral calibration of on-orbit imaging spectrometers. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(11): 3924-3931 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2067220]
- Weiss M, Baret F, Garrigues S and Lacaze R. 2007. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. Remote Sensing of Environment, 110(3): 317-331 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.001]
- Xu W W, Zhang L M, Yang B Y and Wang J X. 2020. On-orbit modulation transfer function estimation of optical satellite camera. Acta Optica Sinica, 40(22): 2228001 (徐伟伟, 张黎明, 杨宝云, 王戟翔. 2020. 光学卫星相机在轨调制传递函数检测方法. 光学学报, 40(22): 2228001) [DOI: 10.3788/AOS202040.2228001]
- Zhang Y. 2021. Principles of Remote Sensors. Wuhan: Wuhan University Press: 97-100 (张熠. 2021. 遥感传感器原理. 武汉: 武汉大学出版社: 97-100)