

基于信号模拟的 LAI 最佳遥感探测波段设计方法

李丽^{1,2}, 乔延利¹, 顾行发^{2*}, 余涛², 叶泽田³

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学院遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

3. 中国测绘科学研究院, 北京 100039)

摘要: 基于地物光谱库和生物参数模型技术, 模拟生成具有已知 LAI 的地物光谱模拟信号, 顾及到大气状况、遥感探测器光谱响应特性等因素的影响, 采用计算机模拟技术模拟生成了星载传感器遥感模拟信号. 在此基础上进一步分析了 CBERS-1、SPOT-1 HRV1、LANDSAT-5 TM 和 NOAA-14 AVHRR 传感器在探测 LAI 方面的性能差异. 最后以对 LAI 的敏感性为准则, 设计和模拟试验了 LAI 的最佳探测波段, 提出了一种基于模拟信号的多波段遥感探测器参数设计方法. 该方法对遥感器通道选择与优化设计具有一定的实用价值.

关键词: 信号模拟; LAI 探测波段; 探测敏感性; 地物光谱模拟; 大气模拟

中图分类号: TP702 文献标识码: A

Methods for best LAI-detecting band design in remote sensing based on signal simulation

LI Li^{1,2}, QIAO Yan-Li¹, GU Xing-Fa^{2*}, YU Tao², YE Ze-Tian³

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the technologies of both object spectrum database and biological parametric models, the ground-object spectrum simulation signals were derived with the known LAI values. By use of computer simulation methods, effects of atmospheric condition and remote sensing detectors with assigned spectral sensitivity characteristics were simulated, and RS simulated signals on satellite level were produced. Furthermore, the performances of different sensors in detecting LAI were analyzed and compared, including CBERS-1, SPOT-1 HRV1, LANDSAT-5 TM and NOAA-14 AVHRR. Finally, on the criterion of LAI-detecting sensitivity, the paper designed and tested the best LAI-detecting band, and proposed the method of multiband remote sensing detector's parameter design based on digital simulated signal. The method has certain practical meanings in both the choices and optimums for sensor channels.

Key words: signal simulation; LAI-detecting band; detecting sensitivity; object spectrum simulation; atmospheric simulation

PACS: 42.79.Pw, 42.79.Qx

引言

遥感探测器设计是遥感对地观测系统建设中的关键技术. 如何设计探测器的参数使之对感兴趣的目标能够取得最佳的探测效果是探测器设计的主要目的之一. 植被叶面积指数(LAI)是表征植被生长

状况的重要物理参数, LAI 测定在遥感探测中具有重要的意义. 不同遥感探测器的设计参数不同, 其探测植被 LAI 的性能之间会存在一定差异. 从传感器最佳探测的角度来看, 已有传感器并不一定是最佳的 LAI 探测传感器, 因此如何设计最佳的 LAI 探测器, 如何评估 LAI 探测器的效果都是迫切需要进行

收稿日期: 2010-05-04, 修回日期: 2010-10-12

Received date: 2010-05-04, revised date: 2010-10-12

基金项目: 中科院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-303); 国防科学技术工业委员会项目(KJSX0401)

作者简介: 李丽(1978-), 女, 博士研究生, 研究方向为定量遥感, E-mail: lili_1452@163.com.

* 通讯作者: E-mail: guxingfa@irsa.ac.cn.

研究的课题。

遥感探测器的设计涉及到设计准则、评价标准及信号探测过程。计算机模拟可生成遥感模拟信号,并对探测过程进行仿真和研究。地面波谱库^[1]、生物参数模型和遥感图像模拟可生成地物模拟信号源,如地物波谱库可用于支持进行地物植被参数的遥感定量反演^[2]。在生物参数模型方面,国内外的研究表明^[3],叶片的叶绿素等含量与反射率之间存在着密切关系。植被冠层的反射率与 LAI、含水量及结构参数也有很强的相关性^[4]。表征植被各种参量与反射率之间关系的参数模型主要有 PROSPECT 模型、冠层反射率模型(SAIL)等^[5,6]。遥感图像模拟利用超光谱(或高光谱)遥感器系统的资料模拟生成中低光谱遥感器系统图像^[7],其结果可用于比较不同传感器系统的差异^[8]。

利用地物波谱库和 PROSAIL 模型,模拟具有确定 LAI 值的地物光谱信号,顾及到大气影响和遥感探测器光谱响应特性影响,生成星载遥感模拟信号,并用于分析 CBERS-1、SPOT-1 HRV1、LANDSAT-5 TM 和 NOAA-14 AVHRR 等传感器在探测 LAI 方面的性能差异。最后以对 LAI 探测敏感性为准则,设计和模拟试验 LAI 的最佳传感器探测波段,提出了一种基于数字模拟信号的遥感探测器波段参数设计方法。

1 遥感信号模拟

遥感信号模拟主要包括地物波谱信号模拟、顾及大气影响的传感器入瞳处遥感信号模拟和传感器光谱响应模拟。

1.1 地物波谱信号模拟

生物参数光谱模拟模型 PROSPECT、SAIL 的组合模型 PROSAIL 可用来模拟具有指定 LAI 值的地物波谱信号。该信号被作为遥感探测性能分析处理的基础数据。实验中,PROSPECT 模型的输入参数为:波长 500~1500 nm,形态结构参数 N 为 1.5,叶绿素含量 Cab 为 40,水含量 Cw 为 0.012,蛋白质含量 Cms 为 0.005。SAIL 模型的输入参数为:叶面积指数 LAI 的取值分别为 0~5,叶面倾角为 45°,观测天顶角 23°,太阳天顶角 18°,观测方位与太阳方位间夹角 130°。

1.2 传感器入瞳处遥感信号模拟

对星载遥感器进行探测性能分析,需要顾及到诸多因素包括大气条件、几何观测条件和传感器本身特性对遥感数据获取产生的影响。为得到传感器

入瞳处的模拟信号,需要进行大气影响模拟。地物光谱反射率数据通过模拟加入大气状况的影响后,得到传感器入瞳处的光谱亮度信号。

在反射波段内,星上传感器入瞳处的信号包含了大气散射和大气吸收的影响。如果将地表反射面看作为一个朗伯平面,则星上传感器入瞳处的光谱亮度 L^* 可以表述为^[9]:

$$L^* = A\rho/(1 - \rho_e S) + B\rho_e/(1 - \rho_e S) + L_a^* \quad (1)$$

式中 ρ 是地物光谱反射率; ρ_e 是地物邻域环境的光谱反射率; S 是半球光谱反照率; L_a^* 是大气的后向散射光谱亮度; A, B 是与大气状况和几何成像条件有关的两个系数。

实验中,MODTRAN 模型的主要参数包括 MID-LAT SUMMER 大气温度和压力模型,RURAL 气溶胶模型,太阳天顶角 18°,观测天顶角 23°,传感器高度 30.1km,地面目标高度 0.1km,波长范围用波数表示为 5880~25000(cm^{-1})。

1.3 遥感器的光谱响应模拟

在传感器入瞳处光谱亮度信号的基础上进行传感器光谱响应模拟,生成传感器像素处的探测信号。对于连续波谱来说,假设传感器待模拟波段的波长范围为 (λ_1, λ_2) ,待模拟传感器的光谱响应为 $S(\lambda)$,源数据的光谱能量谱为 $L(\lambda)$,则传感器待模拟波段的光谱能量 $E(\lambda_1, \lambda_2)$ 可表达为^[7]

$$E(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

对于传感器的每一个待模拟波段,分别按照式(2)计算即可得到待模拟传感器的光谱模拟信号。如果以经过大气模拟处理输出的光谱亮度信号作为上式中的 $L(\lambda)$,那么其输出结果既反映了大气的影 响,同时也反映了传感器光谱响应的影响。

2 基于遥感模拟信号的不同传感器对 LAI 响应的比较分析

基于遥感模拟信号,本文分别对 4 种不同的遥感器 CBERS-1、SPOT-1 HRV1、LANDSAT-5 TM 和 NOAA-14 AVHRR 探测地物 LAI 的效果进行了对比分析。由于 NDVI 与 LAI 的高度相关性^[10],采用传感器 R 波段、NIR 波段的遥感信号首先计算其相应的 NDVI 值,并以传感器星上 NDVI 的变化来表征传感器探测地物 LAI 的敏感性。

根据上述方法,本文模拟计算了 CBERS-1、SPOT-1 HRV1、LANDSAT-5 TM 和 NOAA-14 AVHRR 四种传感器探测的星上 NDVI 值。四种传感器对应

的 R 波段范围分别为 630 ~ 690 nm、610 ~ 690 nm、580 ~ 740 nm、500 ~ 1110 nm,其 NIR 波段范围分别为 770 ~ 890 nm、790 ~ 890 nm、730 ~ 950 nm、680 ~ 1100 nm.

利用上述 4 种传感器探测 NDVI 的模拟结果所做的 LAI 探测敏感性数据见表 1. 表 1 中 LAI1-0 表示 LAI=1 对应的 NDVI 与 LAI=0 对应的 NDVI 值之差,类似地 LAI2-1、LAI3-2、LAI4-3 和 LAI5-4 分别表示相应的 LAI 增量为 1 时,对应的 NDVI 的增量. MEAN0-4 表示 LAI 分别为 0~4 而 Δ LAI=1 时对应的 Δ NDVI 的平均值,MEAN0-3 表示 LAI 分别为 0~3 而 Δ LAI=1 时对应的 Δ NDVI 的平均值,MEAN1-3 表示 LAI 分别为 1~3 而 Δ LAI=1 时对应的 Δ NDVI 的平均值.

表 1 传感器探测 LAI 的敏感性分析
Table 1 Analyses of LAI detecting sensitivity

	SPOT-1 HVR1	LANDSAT-5 TM	CBERS-1	NOAA-14 AVHRR
LAI1-0	0.25173	0.19873	0.2111	0.03747
LAI2-1	0.10127	0.08494	0.07826	0.01455
LAI3-2	0.04161	0.03792	0.0308	0.00633
LAI4-3	0.01979	0.01928	0.0143	0.0032
LAI5-4	0.01094	0.01101	0.00778	0.00184
MEAN0-4	0.10069	0.070376	0.068448	0.012678
MEAN0-3	0.10360	0.0852175	0.083615	0.0153875
MEAN1-3	0.05422	0.04738	0.04112	0.0080266

从表 1 可以看出,上述四种传感器探测 LAI 时,其对 LAI 变化的敏感度从高到低的顺序依次为 SPOT-1 HVR1、LANDSAT-5 TM、CBERS-1、NOAA-14 AVHRR. 换言之,上述 4 种传感器中,SPOT-1 HVR1 传感器对探测 LAI 是最敏感的.

3 LAI 最佳遥感探测波段的设计

为验证 SPOT-1 HVR1 传感器的波段设置是否为 LAI 的最佳遥感探测波段,在上述分析的基础上,对 LAI 最佳遥感探测波段的确定进行了模拟实验.

模拟实验中,首先固定 R 波段,波长范围为 610 ~ 690 nm,即与 SPOT-1 HVR1 传感器的 R 波段参数设置相同. 同时将 NIR 波段的波段宽度固定为 100 nm,波段的变化范围取为 700 ~ 1250 nm,其中心波长以 10 nm 步距递增,相应的波段个数为 46,波段索引号范围设置为 2 ~ 47.

LAI 取值 0 ~ 5 整数时,用上述波段设置计算的 NIR 波段号与相应的 NDVI 值的分布情况见图 1,其中从下向上的 6 条曲线依次表示 LAI 分别取值

0~5 整数值时,近红外波段索引号与相应的 R/NIR 波段组合探测的 NDVI 的对应关系,每条曲线反映了指定 LAI 取值时不同 R/NIR 波段组合探测 NDVI 的性能情况.

LAI 取值 0 ~ 5 整数值时,用上述波段设置计算的 NIR 波段号与相应的 NDVI 增量 (Δ NDVI) 值的分布情况见图 2,其中横轴为 R/NIR 组合中近红外波段索引号,纵轴为 NDVI 增量值. 从上往下的 5 条曲线分别表示 LAI 分别取值 1 ~ 5 整数时,近红外波段号与相应的 R/NIR 波段组合探测的 NDVI 增量之间的对应关系.

不同 LAI 取值时, NIR 波段号与相应的 NDVI 值、 Δ NDVI 值的分布情况见图 3,其中上部的三条曲线反映了 LAI 取值 1 ~ 3 时, NIR 波段号与相应的 NDVI 探测值之间的关系,下部的三条曲线反映 LAI 取值 1 ~ 3 时, NIR 波段号与相应的 NDVI 增量值之间的关系.

从图 1 可看出,在实验波长范围内,NDVI 分布具有 2 个峰值点,它们对应的 NIR 波段号分别为 12 和 30. 作者认为,当 NIR 波段参数取值为 12# 波段或 30# 波段对应的参数值时,可使该组合探测的 NDVI 取得较大数值,但不一定能使该组合获取最大的 LAI 探测敏感性.

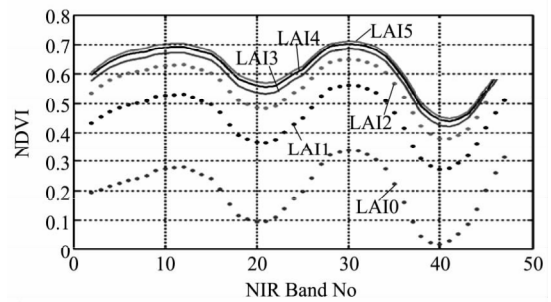


图 1 不同 LAI 时 NIR 波段号与 NDVI 的关系
Fig. 1 Relationship of NIR band and NDVI

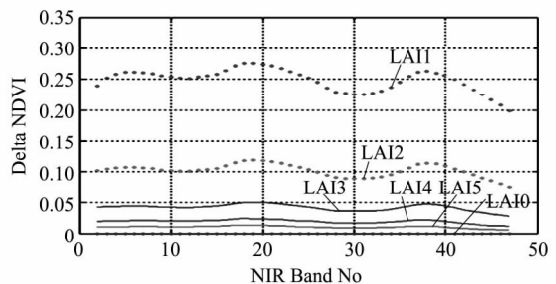


图 2 不同 LAI 时 NIR 波段号与 NDVI 增量的关系
Fig. 2 Relationship of NIR band and Delta NDVI

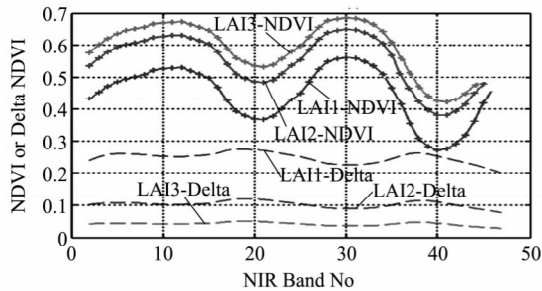


图3 探测 LAI 时 NIR 最佳波段设计
Fig.3 The best LAI-detecting NIR band design

从图2可以看出, Δ NDVI 值分布也具有2个峰值点, 分别对应 NIR 波段号 18 和 38. 因为每条曲线上 Δ NDVI 的大小反映了传感器探测特定 LAI 的敏感性, 当 NIR 波段参数取值为 18# 波段或 38# 波段对应的参数值时, 可使该组合获取最大的 LAI 探测敏感性.

从图3可以更清晰地看出 NDVI 值及 Δ NDVI 值与 NIR 波段号之间的关系. 作者认为, 以该图为基础, 可根据需要对探测 LAI 的 NIR 最佳波段进行设计. 可从两个角度来设计分析传感器探测 LAI (或 NDVI) 的性能, 一个角度是设计传感器的波段组合使之能获取最大的 NDVI 值; 另一个角度是使得传感器的波段组合能够对 LAI 的变化更为敏感.

从上述 40 多种波段组合的模拟实验结果来看, 当 R 波段的波长范围为 610 ~ 690 nm 时, 与实验中的 12 号波段对应的 NIR 的波段组合能使传感器探测的 NDVI 值最大化, 其波长取值范围为 800 ~ 900 nm, 中心波长为 850 nm. 这个结果与 SPOT-1 HRV1 的波段设置接近. 当需要使传感器的 R/NIR 波段组合设计能够对 LAI 的变化更为敏感时, 其最佳的 NIR 波段为实验中的 18 号波段和 19 号波段, 其对应的 NIR 波段范围分别为 860 ~ 960 nm 和 870 ~ 970 nm. 换言之, 当 R 波段设置为 610 ~ 690 nm 时, NIR 波段范围设计为 860 ~ 970 nm 时传感器波段组合将对地物的 LAI 变化最为敏感.

4 结论

模拟实验表明 SPOT-1 HVR1 的波段设置是 SPOT-1 HVR1、LANDSAT-5 TM、CBERS-1、NOAA-14 AVHRR 4 种传感器中对 LAI 探测最为敏感的. 最后提出和实验了一种以探测 LAI 最佳敏感性为准则的 R/NIR 波段最佳组合的传感器设计方法. 该方法目

前是针对可见光和近红外波段进行研究和实验的, 为了提高传感器设计参数的准确性和对其他光谱段的适应性, 还需要对地物光谱模拟、传感器的 MTF 模拟以及传感器光谱响应模拟等信号模拟模型进行更深入的研究.

REFERENCES

- [1] SU Li-Hong, Li Xiao-Wen, LIANG Shun-Lin, *et al.* Data frame and spectral simulation for remote sensing spectral data base[J]. *Geo-information Science* (苏理宏, 李小文, 梁顺林, 等. 典型地物波谱库的数据体系与波谱模拟. *地球信息科学*), 2002, **4**(4): 7-14.
- [2] YAO Yan-Juan, CHEN Liang-Fu, LIU Qin-Huo, *et al.* Inversion and validation of leaf area index based on the spectral & knowledge database using MODIS data[J]. *Journal of Remote Sensing* (姚延娟, 陈良富, 柳钦火, 等. 基于波谱知识库的 MODIS 叶面积指数反演及验证. *遥感学报*), 2006, **10**(6): 869-878.
- [3] LI Yun-Mei, Wang Xiu-Zhen, SHEN Zhang-Quan, *et al.* Simulation of rice leaf reflectance[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric. & Life Sci.)* (李云梅, 王秀珍, 沈掌泉, 等. 水稻叶片反射率模拟. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*), 2002, **28**(2): 195-198.
- [4] SHEN Yan, NIU Zheng, MIAO Qi-Long, *et al.* Theoretical simulation of vegetation canopy's optical characteristics with two-layer structure[J]. *Remote Sensing Technology and Application* (沈艳, 牛铮, 缪启龙, 等. 双层植被结构冠层光谱特性的理论模拟. *遥感技术与应用*), 2005, **20**(5): 465-468.
- [5] HU Ni, LIU Si-Han, HU Zheng-Guang. Application of spectrum simulation model in remote sensing[J]. *Journal of Earth Science and Environment* (胡妮, 刘思含, 胡争光. 波谱模拟模型在遥感中的应用. *地球科学与环境学报*), 2005, **27**(3): 82-87.
- [6] Andrieu B, Baret F, Jacquemoud F, *et al.* Evaluation of an improved version of SAIL model for simulating bidirectional reflectance of sugar beet canopies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **60**(3): 247-257.
- [7] YE Ze-Tian, GU Xing-Fa. Simulation of remote sensing images based on MIVIS data[J]. *ACTA GEODAETICA et CARTOGRAPHICA SINICA* (叶泽田, 顾行发. 利用 MIVIS 数据进行遥感图像模拟的研究. *测绘学报*), 2000, **29**(3): 235-239.
- [8] YE Ze-Tian, GU Xing-Fa, LIU Xian-Lin, *et al.* Analysis of spectral characteristics among different sensors by use of simulated RS images[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping* (叶泽田, 顾行发, 刘先林, 等. 遥感模拟图像应用于不同传感器光谱性能分析. *武汉测绘科技大学学报*), 1999, **24**(4): 295-299.
- [9] Matthew M W, Adler-Golden S M, Berk A, *et al.* Status of atmospheric correction using a MODTRAN4-based algorithm[J]. *SPIE Proceeding*, 2000, **4049**: 199.
- [10] PU Rui-Liang, GONG Peng. *Hyperspectral remote sensing and its applications* [M]. Higher Education Press (浦瑞良, 宫鹏. *高光谱遥感及其应用*. 高等教育出版社), 2000.