

文章编号: 1000-1964(2005)03-0318-05

劈窗算法 LST 精度评价和参数敏感性分析

毛克彪^{1,3}, 覃志豪^{2,3}, 官 鹏¹, 余 琴¹

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101;

2. 农业部资源遥感与数字农业重点实验室, 北京 100081;

3. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093)

摘要: 介绍了大气模拟数据法, 并用此方法分析和评价了作者提出的劈窗算法. 采用模拟大气参数计算得到的地表温度平均精度为 0.46℃; 利用间接方法(即大气透过率是由大气水汽含量计算得到)得到的平均精度为 0.60℃. 同时对 MODIS 地表温度产品与我们用 MODIS 影像反演出来的结果对比分析表明作者提出的劈窗算法是可行的. 敏感性分析表明此算法对参数透过率、比辐射率都不敏感.

关键词: 亮度温度; 地表温度; MODIS; 劈窗算法

中图分类号: TP 753 **文献标识码:** A

The Evaluation of Split-Window Algorithm and the Analysis of Parameter Sensitivity

MAO Ke-biao^{1,3}, QIN Zhi-hao^{2,3}, GONG Peng¹, YU Qin¹

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China;

2. The key laboratory of remote sensing and digital agriculture, China Ministry and the agriculture remote sensing laboratory, Beijing 100081, China;

3. International Institute for Earth System, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: The atmospheric simulation evaluation method for split-window algorithm of retrieving land surface temperature is introduced. This method is utilized to evaluate the accuracy of split-window algorithm proposed by the authors for retrieving land surface temperature from MODIS data. The result indicates that the average accuracy of our algorithm is 0.46℃ under the parameters without error. The accuracy of our algorithm is 0.60℃ when the transmittance was obtained from water content. The LST product of MODIS was compared with the retrieval results by split-window algorithm proposed by authors. Finally, the sensitivity of parameters for our algorithm is analyzed and the results indicate that the parameters (transmittance and emissivity) are not sensitive to the authors' algorithm.

Key words: Light temperature; LST; MODIS; Split-window algorithm

算法精度评价对一个算法的实际应用非常重要. 对于地表温度反演算法的精度评价, 通常采用 2 种方法: 大气模拟数据法和地面测量数据法. 大气模拟数据法是用大气模型软件如 LOWTRAN、MODTRAN 等在假定地表温度和比辐射率和大气

状态已知的情况下, 对大气辐射传导进行模拟. 即首先求算卫星高度观测到的热辐射, 其中包括大气影响辐射的影响, 将其转变为亮度温度, 然后用我们提出的劈窗算法在这些已知的参数情况下来反演地表温度, 最后比较两者之间的差距可知算法的

收稿日期: 2004-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(40471096); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2001CB309404).

作者简介: 毛克彪(1977-), 男, 湖南省沅江市人, 博士生, 主要从事热红外, 微波遥感, 空间数据挖掘及 GIS 应用等方面的研究.

精度. 因模拟过程中有关参数均已知, 所以通常将这一误差代表算法的绝对精度(但由于现实情况非常复杂, 绝非大气模型所能全部描述); 地面测量数据法是指实地测量卫星飞过天空时的实际地表温度和相应大气条件, 然后根据卫星数据用上述各算法推算地表温度, 两者比较可知其误差. 但测试的同步性以及匹配等问题使得这一方法在实际应用中比较困难. 本文用大气模拟数据法来对劈窗算法进行精度评价, 并用 NASA 提供的 MODIS 温度产品与使用我们算法反演结果进行比较分析, 最后在这个基础上进行参数敏感性分析.

1 劈窗算法

劈窗算法开始是针对 AVHRR 的第 4 和 5 热红外波段提出来的. 这个技术开始主要用来推算海洋表面温度(SST)^[1-2], 其精度可达 0.77℃. 海洋表面温度(SST)的反演为建立地面温度(LST)的反演方法提供了基础^[3-5]. 毛克彪在文献[6]中针对 MODIS 的波段特点, 提出了一个适用于 MODIS 数据的劈窗算法. 这个算法只包含了 2 个关键参数大气透过率和比辐射率. 这个算法最大的优点在于大气透过率的求算不再是用大气模型软件来计算, 而是利用 MODIS 的近红外波段反演大气水汽含量, 通过热红外波段与大气透过率的关系来计算求得. 劈窗算法的方程如下:(其中各系数是采用中心波长计算得到)

$$0.14\epsilon_{31}\tau_{31}T_s = 0.14T_{31} + 31.80\epsilon_{31}\tau_{31} - (1 - \tau_{31}) [1 + (1 - \epsilon_{31})\tau_{31}] (0.14T_a - 31.80) - 31.80;$$

$$0.12\epsilon_{32}\tau_{32}T_s = 0.12T_{32} + 26.81\epsilon_{32}\tau_{32} - (1 - \tau_{32}) [1 + (1 - \epsilon_{32})\tau_{32}] (0.12T_a - 26.81).$$

2 劈窗算法评价

在这里, 我们采用 LOWTRAN 对中纬度地区进行了模拟计算. 表 1 是大气模拟的数据的主要参数表. 模拟的地面温度是 20~50℃, 大气水汽是 1~2.5 g/cm². 表 1 中第一列为大气水汽含量; 第二列为 MODIS31/32 波段的比辐射率; 第三列为 MODIS31/32 波段的大气透过率; 第四列 T_s 为地表真实温度; 最后一列为模拟遥感器高度的亮度温度. 大气模拟考虑了在同一大气水汽含量下, 不同的大气透过率和不同的温度状态下的辐射传输问题. 同时也考虑了在不同水汽含量下, 不同大气透过率以及不同温度条件下的大气辐射传输情况. 因此, 模拟数据具有很好的代表性. 我们把地表真实温度和反演结果的平均差值

($[\sum |T_r - T_s/N|]$) 做为反演算法的精度.

表 1 中纬度地区大气辐射模拟数据表
Table 1 The simulation of atmosphere transformation in mid-altitude

$m_{\text{水汽}}/g$	比辐射率		透过率		地面温度/℃	亮度温度/℃	
	Em31	Em32	Tran31	Tran32		M31	M32
1g	0.97	0.97	0.91	0.86	20	290.87	290.74
	0.97	0.97	0.92	0.87	30	300.34	299.98
	0.97	0.97	0.92	0.87	40	309.97	309.49
	0.97	0.97	0.92	0.88	5	319.68	319.14
2g	0.97	0.97	0.82	0.72	20	290.47	290.10
	0.97	0.97	0.83	0.74	30	299.56	298.77
	0.97	0.97	0.84	0.76	40	309.06	308.07
	0.97	0.97	0.85	0.77	50	318.72	317.52
3g	0.97	0.97	0.76	0.64	20	290.20	289.69
	0.97	0.97	0.77	0.67	30	299.03	298.01
	0.97	0.97	0.79	0.69	40	308.43	307.15
	0.97	0.97	0.81	0.70	50	318.14	316.53

表 2 是劈窗算法利用大气辐射传输的模拟结果对地表温度进行反演的数据. A31, A32, B31, B32, C31, C32, D31, D32 分别为劈窗算法方程系数, T_r 为劈窗算法地表温度反演结果. 计算结果表明地表温度反演的最大误差为 0.8℃, 平均误差为 0.46℃.

表 3 也是劈窗算法利用大气模拟数据对地表温度反演的数据表, 其各列数据与表 2 相同. 唯一的区别是大气透过率 Trans31 和 Tras32 是利用模拟的大气水汽含量和透过率的关系表达式($\tau_{31} = -0.11w + 1.04$; $\tau_{32} = -0.13w + 0.99$)计算得到, 根据大气模型大气水汽含量输入量计算得到的大气透过率; 平均精度为 0.60℃.

从表 2 和表 3 中可以看到, 随着温度和大气水汽含量的升高, 地表温度反演的误差有升高的趋势. 从反演的平均精度来看, 劈窗算法用实际透过率(大气模型求算的大气透过率)反演的温度比用从大气水汽含量间接计算得到的透过率接近实际温度. 其精度都在 1 K 以下.

由于获得实测数据比较困难, 我们用 NASA 提供的 MODIS 与我们的反演结果进行相对评价. L3 ISIN grid 级 MODIS 温度产品选取的地方为中国华北地区, 时间为 2003/08/11, 如图 1 所示. 此产品是用 Wan Zhengming(1997)^[7]提出的多通道反演算法反演得到. 该算法是同时反演地表温度和比辐射率. 在文献[8-9]中, Wan Zhengming 对 MODIS 产品精度进行了评价, 在晴朗的天气条件下, 其反演精度在 1 K 以下. 图 2 为使用本算法反演的结果. 从图中可以看出, MODIS 产品的温度变化比我们的反演结果变化比较明显, 其中主要的原

因是受云的影响特别大,导致灰度级别分布很大,图 2 影响相对较小. 图中颜色比较深是温度基本都在 0℃ 以下,经统计分析表明,在没有云影响的地方,我们的算法反演结果与 MODIS 产品基本一致.

表 2 中纬度地区劈窗算法地表温度反演数据(1)
Table 2 Retrieving results of split window (1)

Tran4	Tran5	A31	A32	B31	B32	C31	C32	D31	D32	Tr
0.91	0.86	0.12	0.10	36.61	30.47	0.01	0.02	2.84	3.76	293.1
0.92	0.87	0.12	0.10	38	31.69	0.01	0.02	2.75	3.64	303.3
0.92	0.87	0.12	0.10	39.41	32.94	0.01	0.02	2.66	3.52	313.6
0.92	0.88	0.12	0.10	40.82	34.21	0.01	0.02	2.60	3.40	323.8
0.82	0.72	0.11	0.08	33.59	26.73	0.03	0.03	5.96	7.58	293.1
0.83	0.74	0.11	0.09	35.25	28.25	0.02	0.03	5.53	7.07	303.4
0.84	0.76	0.11	0.09	36.97	29.85	0.02	0.03	5.11	6.57	313.6
0.85	0.77	0.11	0.09	38.62	31.20	0.02	0.03	4.78	6.34	323.8
0.76	0.64	0.10	0.07	31.69	24.54	0.03	0.04	7.92	9.80	293.1
0.77	0.67	0.10	0.08	33.47	26.18	0.03	0.04	7.33	9.13	303.4
0.79	0.69	0.10	0.08	35.33	27.91	0.03	0.04	6.74	8.47	313.6
0.81	0.70	0.11	0.08	37.33	29.41	0.03	0.04	6.05	8.08	323.8

注:透过率采用大气模型模拟计算得到的透过率.

表 3 中纬度地区劈窗算法地表温度反演数据(2)
Table 3 Retrieving result of split window (2)

Tras31	Tras32	A31	A32	B31	B32	C31	C32	D31	D32	Tr'
0.93	0.87	0.13	0.10	37.2	30.59	0.01	2.18	3.64	293	
0.93	0.87	0.13	0.10	38.5	31.69	0.01	0.02	2.18	3.64	303
0.93	0.87	0.13	0.10	39.9	32.83	0.01	0.02	2.18	3.64	313.1
0.93	0.87	0.13	0.10	41.2	33.98	0.01	0.02	2.18	3.64	323.2
0.83	0.74	0.11	0.09	33.9	27.23	0.02	0.03	5.65	7.06	293.2
0.83	0.74	0.11	0.09	35.1	28.26	0.02	0.03	5.65	7.06	303.5
0.83	0.74	0.11	0.09	36.5	29.37	0.02	0.03	5.65	7.06	313.7
0.83	0.74	0.11	0.09	37.8	30.5	0.02	0.03	5.65	7.06	324.2
0.77	0.68	0.10	0.08	32.2	25.54	0.03	0.04	7.37	8.77	293.3
0.77	0.68	0.10	0.08	33.4	26.53	0.03	0.04	7.37	8.77	303.8
0.77	0.68	0.10	0.08	34.7	27.62	0.03	0.04	7.37	8.77	314.1
0.77	0.68	0.10	0.08	36.1	28.74	0.03	0.04	7.37	8.77	325

注:透过率采用本文模拟方程求算.

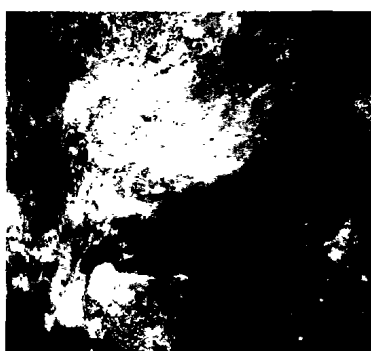


图 1 MODIS 地表温度产品
Fig.1 The MODIS LST product

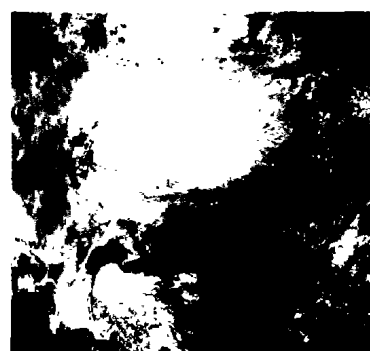


图 2 用我们的算法反演的地表温度
Fig.2 The LST retrieved by our algorithm

3 参数敏感性分析

表 4 是运用劈窗算法在大气透过率获取方式不同的情况下所引起的温度相对误差结果.从 4 表可以看出,当大气水汽含量为 2.5 g/cm²,温度为 50℃ 时,使用真实透过率,劈窗算法所引起的误差

为 0.78℃;使用线性模拟的透过率时,劈窗算法所引起的误差是 1.97℃,其最大相对误差 1.19℃.当 MODIS 的第 31 和 32 波段的透过率与实际平均分别相差 0.0167 和 0.014 时,从用水汽含量计算得到的透过率与用实际透过率反演的地表温度所引起的温度平均变化为 0.37℃.为了更好的了解透

过率对温度的影响,我们对 MODIS31/32 的透过率分别改变其误差来分析其对反演的地表温度的影响.如图 3 所示,当透过率以相同的变化趋势从 -5%~10%改变时,反演的温度误差变化在 1K 以下.因此对于劈窗算法,透过率的微小误差不会引起温度很大的变化.我们对比辐射率的误差变化引起反演温度误差变化做了同样的分析.如图 2 所

示,比辐射率误差在 -1%~2%时候,温度变化在 1.2 K 以下.比辐射率随着波长的变化而变化,我们通过分析常用地物的比辐射率变化曲线可知,在 MODIS31/32 波段范围了,大部分地物的比辐射率大于 0.97,而且变化非常的小,因此如图 4 所示的误差分析范围内,劈窗算法对参数比辐射率也是不敏感的.

表 4 参数敏感性分析结果
Table 4 The sensitivity analysis of parameters

线性模拟			大气模型			相对误差		
Tras31	Tras32	Tt'-Ts	Tras31'	Tras32'	Tt-Ts	Tras31-Tras31'	Tras32-Tras32'	T_Re_err
0.933	0.867	0.036	0.913	0.863	0.117	0.02024	0.00367	0.081
0.933	0.867	0.012	0.915	0.867	0.347	0.0176	0.00075	0.335
0.933	0.867	0.081	0.918	0.872	0.572	0.01496	0.00517	0.490
0.933	0.867	0.189	0.920	0.876	0.794	0.01302	0.00934	0.604
0.826	0.741	0.178	0.817	0.723	0.124	0.00959	0.01819	0.053
0.826	0.741	0.457	0.830	0.741	0.358	0.00351	0.00041	0.098
0.826	0.741	0.719	0.843	0.76	0.582	0.01661	0.01894	0.137
0.826	0.741	1.160	0.853	0.768	0.782	0.02672	0.0272	0.377
0.773	0.678	0.335	0.756	0.64	0.130	0.016758	0.037505	0.204
0.773	0.678	0.754	0.774	0.665	0.370	0.001462	0.012815	0.384
0.773	0.678	1.104	0.793	0.69	0.594	0.019682	0.011875	0.509
0.773	0.678	1.974	0.814	0.704	0.780	0.040892	0.026055	1.193

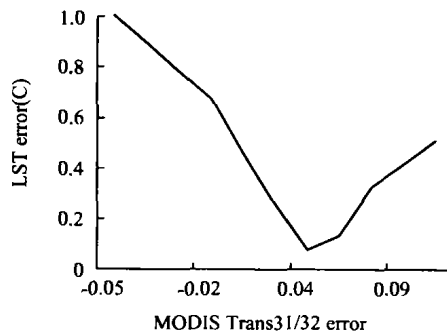


图 3 透过率误差引起反演温度误差
Fig. 3 The change of LST error caused by transmittance

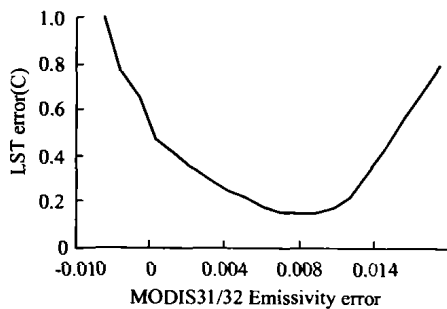


图 4 比辐射率误差引起反演温度误差
Fig. 4 The change of LST error caused by emissivity error

4 结 语

利用大气模拟数据法对我们提出的劈窗算法进行了精度评价和分析.结果表明,当大气参数没有误差的情况下,算法的平均精度为 0.46 C;当使

用通过大气水汽含量和大气透过率的关系计算大气透过率时候,算法的平均精度为 0.60 C;同时用我们的算法反演得到的地表温度和 NASA 的地表温度产品比较表明,我们的反演的结果比较合理.最后对参数透过率和比辐射率进行了敏感性分析,结果表明劈窗算法对参数不敏感.

参考文献:

- [1] Sobrino J A, Caselles. A methodology for obtaining the crop temperature from NOAA-9 AVHRR data [J]. Int. J. Remote Sensing, 1991,2:2461-2475.
- [2] Franca G B, Cracknell A P. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR data in northeastern Brazil [J]. Int. J. Remote Sensing, 1994,15:1695-1712.
- [3] Prata A J. Land surface temperatures from derived from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer 2. Experimental results and validation of AVHRR algorithms[J]. J. Geophys. Res. , 1994,99:13025-13058.
- [4] Price J C. Land surface temperature measurements from the split-window channels of the NOAA-7 AVHRR [J]. J. Geophys. Res. , 1984, 79: 5039-5044.
- [5] Kerr Y H, Lagouarde J P, Imbernon J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm [J].

- Remote Sens. Environ., 1992, 41:197-209.
- [6] 毛克彪. 用于 MODIS 数据的地表温度反演方法研究 [D]. 南京: 南京大学城市资源系, 2004. 5.
- [7] Wan Z M, Li Z L. A Physics-Based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1997, 35:980-996.
- [8] Wan Z M, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data [J]. Remote Sens. Environ., 2002, 83:163-180.
- [9] Wan Z M, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature [J]. Int. J. Remote Sensing, 2004, 25:261-274.

(责任编辑 李成俊)

《中国矿业大学学报》2004年第6期被 Ei 收录论文

论文题目	第一作者
预冷土对青藏铁路路基温度场演变的影响	周国庆
卫星自主导航中星光大气折射模型的研究方法	王国权
溶气-柱浮选技术处理含 Cr(VI) 废水的研究	李小兵
软岩煤矿网络地理信息系统研究及应用	何满潮
扰动土性状研究及在环境治理工程中的应用	于广云
岩石爆破逾渗断裂行为与块度分布研究	邵 鹏
煤系黄铁矿氧化溶解速率与矿物粒径的关系	岳 梅
脱硫剂性能评价用 SO ₂ 分析测试方法	张香兰
综放沿空小断面留巷技术研究	曹胜根
弹性支承不平衡转子系统非线性振动特性研究	刘初升
综放巷内充填沿空留巷工业试验	马立强
基于 VRML 的煤矿床三维可视化方法研究	梅晓仁
前馈神经网络隐层评测问题的研究	崔荣一
黑岱沟露天煤矿剥离黄土半连续工艺研究	车兆学
岩石的风化损伤特征与缩小防护煤柱机理	宣以琼
用于吸附分离 CO ₂ 的活性炭研究	张双全
有源电力滤波器检测滞后补偿误差的分析与建模	王雪丹
冲击回波法检测混凝土结构	宁建国
外贴碳纤维片材加固混凝土梁的延性分析	殷惠光
矿井提升机延迟式保护速度设计方法	邓世建
黑液水煤浆在 0.25 MW 炉内的燃烧和结渣特性	王凤寅

《摘自 Engineering Village 2》