

文章编号: 1007-4619 (2001) 04-0254-05

SSM/I 微波辐射计数据陆面温度反演

潘广东, 王 超, 田国良

(中国科学院 遥感应用研究所, 遥感信息科学开放实验室, 北京 100101)

摘 要: 利用美国防卫气象卫星计划(DMSP)特别微波辐射/成像计(SSM/I)的多通道微波辐射亮温数据,开展中国陆地地区陆面温度反演研究。选择 1997 年 7 月 20/24 日的 SSM/I 数据,先对中国陆地区域的数据进行处理与成像,然后基于 Holliger 算法利用七个通道数据进行地表类型分类。最后利用 SSM/I 数据的统计算法进行中国区域内的陆面温度反演研究,并用 NOAA-AVHRR 反演的温度数据进行分析比较,其结果与实际情况基本一致。研究表明,SSM/I 微波辐射计数据可以为大面积的陆面温度反演提供快速的研究方法,为全球变化研究提供一种新资料。

关键词: 特别微波辐射/成像计(SSM/I); AVHRR; 地表类型; 陆面温度; 反演

中图分类号: TP702/TP 722.6 **文献标识码:** A

1 引 言

于 1987 年发射的防卫气象卫星计划(DMSP)的特别微波辐射/成像计(SSM/I),主要应用于环境参数的监测,如大气水蒸气的含量、海面风速、海冰分布、陆地及海洋温度反演等^[1-5]。即将发射的日本的 ADEOS-II、欧空局的 Envisat 及美国的 EOS PM-1 等将会为微波辐射遥感研究提供新的数据。同时,随着合成孔径和极化微波辐射计的发展,微波辐射计应用前景也将越来越广阔。SSM/I 陆地应用主要受地面分辨率的限制,开展研究工作较少。国内外研究主要集中在提取大气水汽含量、降水和陆地温度反演等参量的研究^[1, 2]上。

陆面温度被广泛应用于农业生产、作物监测模型、数值气候模型(特别是边界层和中尺度模型等)、大气廓线反演模型和水文模型等研究中。用 NOAA-AVHRR 的红外通道开展的分离窗反演算法,能够较好地反演陆面温度,精度可达 1.5—3.0 K。然而,红外通道仅在无云的条件下可以反演,受大气影响非常大,尤其是对于大区域的快速陆面温度反演非常困难。而微波辐射计数据受大气影响相对较小,具有全天时、全天候特点。同时,根据 Planck 黑体辐射

原理和 Jeans 近似,一般地物的微波辐射亮温与其真实温度存在简单的线性关系。因此,可以开展微波辐射计数据的陆面温度反演研究。

现在已经有一些学者利用 SSM/I 数据开展了地表温度反演研究,例如: Pullianinen 等结合地表测量数据,针对森林地区利用约束最小平方反演半经验微波辐射模型,结合多元线性回归法开展了地表温度反演研究^[6]。他们的结果表明利用 SSM/I 可以较好地反演无雪覆盖的针叶林地区的地表温度。Bellerby 等^[3]结合地理信息系统(GIS),利用数学方法开展海陆混合像元温度反演,精度达到 1—2 K。McFarland 等利用均方根误差最小的统计回归法开展了作物/牧场、潮湿土壤、干旱土壤三种地表类型的温度反演研究^[2]。

本文根据 Holliger 给出的温度反演算法^[1],结合地表分类研究算法^[7]和温度算法的要求,对分出的类型再归成 4 大类,形成反演类型,然后反演地表温度,并结合红外反演结果对反演结果进行了分析和讨论。

2 数据处理和成像

SSM/I 共有 4 个频率(19.35 GHz, 22.235 GHz,

收稿日期: 2000-06-28; 修订日期: 2000-12-26

基金项目: 国家 95 攀登项目“95-预-38”。

作者简介: 潘广东(1969—),男,1992年毕业于成都地质学院并获学士学位,1998年毕业于中国科学院遥感应用研究所,获硕士学位。现为遥感所助理研究员,主要从事微波遥感研究。

37 GHz, 85.5 GHz), 除 22.235 GHz 仅有垂直(V)极化外, 其余 3 个频率均是垂直和水平(H)极化的双极化模式, 共有 7 个通道的数据^[1]。

本文选择了 1997 年 7 月 20 日和 24 日两天内的 SSM/I TDR 格式的数据, 它们的轨道号分别为: 11985, 11986, 11993, 12042, 12043。每轨扫描宽度 1400 km, 扫描中心点观测角为 53.1°。为了尽量减小相邻轨道间数据由于扫描时间不同造成的差异, 增强昼夜温差较大地区与昼夜温差较小地区的可比性, 我们选择了扫描时间(UTC)为上午 08:00—10:30 的数据。

我们对每轨低频各极化亮温数据采用线性插值(把 19 GHz, 22 GHz, 37 GHz 的数据均插到 85 GHz 的 12.5 km 分辨率), 统一了地面分辨率, 然后对 7 个通道的数据分别成像。接着, 对每轨数据采用 Albers(中心经纬度: 37°N, 110°E)等面积投影转换, 最后进行图像镶嵌, 形成了完整的中国陆地微波辐射亮温图(图版 I)。

3 陆面温度反演

陆面温度的反演要求地表类型作为先验知识。

首先, 我们采用针对 SSM/I 数据的地表类型分类算法, 对得到的中国陆地微波辐射亮温数据进行了分类。然后才能利用微波辐射亮温与表面温度间简单线性函数的规律和 SSM/I 7 个通道数据与地表温度的关系, 反演陆面温度。

3.1 地表类型分类

DMSP SSM/I 数据校正与验证组提出了针对 SSM/I 数据陆地分类的算法^[1], Neale 等也提出了 SSM/I 微波辐射数据的陆地分类判据^[7]。该反演算法基于感兴趣地区的地面准真实气象数据与 SSM/I 亮温数据间的统计回归关系, 建立地表类型的分类算法。该算法依据 SSM/I 7 个通道的数据, 采用北美洲、南美洲、非洲等地区的实验场作为数据验证区, 统计出了 8 个判据(表 1 中 a—h), 把陆地表面分为 12 种类型(表 1 中(1)–(12))。该算法对于平原地区、干旱地区和沙漠地区的分类精度高于地表其他类型^[1]。

我们基于表 1 的算法, 处理了 SSM/I 7 个通道的数据, 对中国陆地地区开展了 SSM/I 微波数据的分类(图版 I)。

表 1 陆地类型分类判据

Table 1 Classification criterion of land surface types with SSM/I data

/K

分类判据	a	b	c	d	e	f	g	h
(1) 常年水体或灌溉区	>4							
(2) 浓密植被区	≤4	≤1.9		≥0	<4.5		>262	
(3) 农业/草(牧)场植被区	≤4	>1.9		≥0	<4.5		>262	
		≤4						
(4) 耕地(干旱)区	≤4	>4	≥-6.5	<0	<4.2		>257	
		≤9.8		≥-5				
(5) 土壤(潮湿)区	≤4	>4	≥-6.5	≥0	<4.2		>257	
		<19		<4				
(6) 半干旱地表区	≤0.9	>9.8	≤d	<0	<6	>7	>257	
		<19						
(7) 沙漠	≤0.8	≥19			>-1		>257	
(8) 降水的植被区	≤4	≤4		<0			>262	
(9) 降水的土壤区	≤4	>4	<-3	<-5	<-4		>257	
(10) 植被和水体的复合区	≤4	<6.4		≥0	≥4.5			
(11) 土壤/湿土壤和水体的复合区	≤4	>6.4		>-2	≥4.2			
(12) 雪区	≤4	>4	<-6.5				≤257	≥5

a: 22V-19V, b: [(19V-19H)+(37V-37H)]/2, c: 37V-19V, d: 85V-37V, e: 85H-37H, f: 37V-37H, g: 19V, h: 19V-19H

3.2 陆面温度反演与验证

对于地表雪,由于其表层的空隙度及结晶状况等的差异,其微波辐射亮温与表面温度间不满足简单线性函数关系(式 1),因此较难从微波辐射亮温开展地表温度反演研究。而对于地表水体,由于其垂直(V)极化与水平(H)极化亮温间存在较大的差(有时大于 100 K),并且存在陆地与水体的混合像元的分离难题,因此反演有一定的难度。而一般地表类型,其微波辐射亮温与地表温度间满足线性关系(式 1)。本文,我们对除雪和水体两类地表类型以外的其它类型开展了温度反演研究。

$$T_{Bp}(\theta) = \epsilon_p(\theta) * T_0 \quad (1)$$

式中 T_0 为地表温度, T_{Bp} 微波亮温,下标 p 表示极化态(V 或 H), θ 表示观测角, ϵ_p 为地物的微波发射率,发射率是地表土壤的物质成分(主要是含水量)、表面粗糙度(通常用确定的谱函数描述及相关的统计量:相关长度和均方差高度)和覆盖类型的影响(如植被、水体、雪、人工建筑等)。

在地表微波发射率已知的前提下,我们可直接从式(1)反演地表温度。但由于发射率的影响因素的复杂性及缺乏地表类型和发射率的基础数据库,

因此,从发射率反演温度缺乏现实意义。我们可以从多通道数据间的相关性,开展统计反演。

为了反演陆面温度,我们首先对表 1 中分出的 12 类地表类型进行归类成五种新的类型:

- (1) 农业/牧区:其包括表 1 中的类型 3;
- (2) 潮湿土壤:其包括表 1 中的类型 5, 9 和 11;
- (3) 干旱土壤:其包括表 1 中的类型 4, 6 和 7;
- (4) 植被区:其包括表 1 中的类型 2, 8 和 10;
- (5) 其它:其包括表 1 中的类型 1 和 12。

然后,我们针对前 4 种类型,基于式(2)的反演算法^[1],利用 SSM/I 数据统计反演陆面温度(图 3 见图版 I):

$$T_0 = C_0 + C_1 * T_{19H} + C_2 * T_{22V} + C_3 * T_{37V} + C_4 * T_{85V} \quad (2)$$

上式中 C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 是系数,它们的值^[1]见表 2。 $T_{19H}, T_{22V}, T_{37V}$ 和 T_{85V} 是 SSM/I 不同频率不同极化的亮温数据,下标 V 和 H 分别表示垂直和水平极化。 T_0 是反演的陆面温度(单位为 K)。在本次反演计算中,对常年水体或灌溉区和雪区两类不进行温度反演,图 3 中用黑色表示。另外,图 3 中对于水体及湖泊周围的区域均未反演,并以黑色标识。

表 2 陆面温度反演系数

Table 2 Retrieval coefficients of land surface temperature with SSM/I data

	C_0	$C_{1(19H)}$	$C_{2(22V)}$	$C_{3(37V)}$	$C_{4(85V)}$
植被	24.94	-1.2784	0.8800	0.5933	0.7299
潮湿土壤	23.16	-0.1873	0.5221	-0.6271	1.237
干旱土壤	72.68	-0.4598	0.5984	0.8828	-0.2623
农业区/牧场	6.97	-0.6266	0.2716	-0.1297	1.482

温度反演的最佳验证可以用实时观测的地面真实温度。目前,我们缺乏地面气象台站的小时观测数据,已有的数据是日平均气温,由于气温与地温间的复杂关系,我们难以从日平均气温中得出小时地温。而美国气象卫星 NOAA 所携带的甚高分辨率辐射计(AVHRR)在无云的条件下,反演的地面温度精度较高(一般陆地在 2 K 内)。因此,我们利用 AVHRR 的红外通道数据,采用分离窗算法^[8],开展了陆面温度反演。另一方面,由于 AVHRR 和 SSM/I 卫星的过境时间(AVHRR 成像时间是北京时间下午 3:30,SSM/I 成像时间为当地时间约下午 6:00)的差异,导致反演的地温时间上的不一致。而 24 小时地

温随时间的变化一般规律比较明显^[9],且不同的地表覆盖类型在日变化的幅度上差异较大^[10]。因此,对于全国地表区域的反演验证我们只是采用了趋势上的验证。图 4 显示了基于 AVHRR 数据反演的中国陆地地温图,图中左边数据成像时间(UTC)为 1997 年 7 月 24 日 7:30(与 SSM/I 同日),右边为 1997 年 7 月 24 日 18:11(UTC),由于此时北京时间是 2:11,地温接近最小值,与 SSM/I 数据的比较相对困难。因此,我们可以用左边的数据与 SSM/I 反演的结果分析比较。

从图 3, 4 中可知,在塔克拉玛干沙漠地区图 4 的反演结果高于图 3 中约 20 K。其它地区在趋势上基本一致。尤其,在中国东部地区,华北平原局部地

温较高的趋势较为一致。

从 SSM/I 反演结果图上可看出, 7 月 20、24 日上午的中国陆地地表温度可分几个明显的等级: 沙漠地区的地表温度为最高, 特别是塔克拉玛干沙漠达到 47°C (下午 6:00); 平原地区温度次之, 如华北平原; 植被森林覆盖较多的山地地区温度较平原地区; 高原高山地区温度最低, 如青藏高原。由此看出, 反演结果基本与实际情况相符。

4 结论与讨论

本文根据 Holliger 给出的温度反演算法, 结合地表分类研究算法, 利用 SSM/I 数据对中国陆地地区开展了地表温度的反演工作, 得到以下结论:

1. 依据 SSM/I 推荐算法, 开展的中国陆地表面类型分类结果与中国主要陆地类型较为一致^[11], 而对于不同类型的边界处存在可能的分类错误。

2. 依据 SSM/I 推荐算法反演了中国陆地地区的地面温度(图 3), 取得了与红外数据反演较为一致的结果。另外, 从计算结果中可看出, 极化的微波亮温与地表温度间变化趋势基本一致, 这与反演的四大类型间的微波发射率(在 SSM/I 频率)变化不大有关。

本文工作是基于推荐的 SSM/I 通用算法针对中国陆地地区开展的, 该算法是基于全球的数据验证场提供的统计反演模型, 由于缺乏中国陆地地区的验证数据, 因此, 模型统计参数与中国陆区实际情况还有一定的差别。同时, 由于缺乏中国陆地地区的 GIS 支持的基础地表类型数据库, 因此, 直接运用该算法对地表类型的分类有一定误差, 从而影响到温度反演的精度。

下一步, 我们可以利用中国地表的真实数据开展分类判据研究和统计回归参数选择, 从而提高参数反演的精度。

总之, 从星载微波辐射数据开展陆面温度反演具有现实意义, 尤其是其具有受大气影响相对光学传感器较小的优点。同时, 本文进行的全中国陆地地区的温度反演可为数值气象预报等提供了快速的基础数据。

致谢 本文得到了国家 95 攀登项目“95-预-38”的支持。感谢中科院和意大利国家科学委员会

(CNR) 间合作协议项目“Microwave remote sensing for soil and vegetation monitoring”的支持。SSM/I 和 AVHRR 数据由美国 NASA 提供。

参考文献 (References)

- [1] Holliger J. DMSR Special Sensor Microwave/Image Calibration/Validation [R]. Space Sensing Branch, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375-5000, Final Report, 1989.
- [2] McFarland M J, Miller R L, and Neale C M U. Land Surface Temperature Derived From the SSM/I Passive Microwave Brightness Temperature [J]. *IEEE Trans. on Geos. and Remote Sensing*, 1990, **28**: 839-845.
- [3] Bellerby T, Taberner M, Wilmshurst A, Beaumont M, Barrett E, Scott J, and Durbin C. Retrieval of Land and Sea Brightness Temperatures from Mixed Coastal Pixels in Passive Microwave Data [J]. *IEEE Trans. on Geos. and Remote Sensing*, 1998, **36**: 1844-1851.
- [4] Chang P S, and Li L. Ocean Surface Wind Speed and Direction Retrievals from the SSM/I *IEEE Trans. on Geos. and Remote Sensing*, 1998, **36**: 1866-1871.
- [5] Alishouse J C, Snyder S A, Vongsathorn J, and Ferraro R R. Determination of Oceanic Total Precipitable Water From the SSM/I [J]. *IEEE Trans. on Geos. and Remote Sensing*, 1990, **28**: 811-822.
- [6] Pulliainen J T, Grandell J, and Hallikainen M T. Retrieval of Surface Temperature in Boreal Forest Zone from SSM/I Data [J]. *IEEE Trans. on Geos. and Remote Sensing*, 1997, **35**: 1188-1200.
- [7] Neale C M U, McFarland M J and Chang K. Land-Surface-Type Classification Using Microwave Brightness Temperatures From the Special Sensor Microwave/Imager [J]. *IEEE Trans. on Geos. and Remote Sensing*, 1990, 829-838.
- [8] Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of surface temperature from a satellite [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1987, **8**: 1509-1522.
- [9] Tian Guoliang, Zheng Ke, Li Fuqin, Li Jianjun and Sui Hongzhi. Estimate of Evapotranspiration and Soil Moisture Using NOAA-AVHRR Image and Ground Based Meteorological Data [A]. Beijing: Science Press, 1990, 161-176. [田国良, 郑柯, 李付琴, 李建军, 隋洪智, 用 NOAA-AVHRR 数字图像和地面气象台站资料估算麦田的蒸散和土壤水分 [A]. 黄河流域典型地区遥感动态研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1990, 161-176.]
- [10] Calvet J C and Julien J P. Land Surface Temperature Retrieval in Dry Conditions from Infrared and Microwave Satellite Radiometry [J]. *Remote Sensing Review*, 1996, **13**: 235-255.
- [11] Directed by National Bureau of Environmental Protection [H]., edited by Institute of Geography, Changchun, CAS, The Atlas of China Natural Protection, Beijing: Science Press, 1989. [国家环境保护局主持, 中国科学院长春地理研究所主编, 中国自然保护地图集, 北京: 科学出版社, 1989.]

Land Surface Temperature Retrieval with SSM/I Data

PAN Guang-dong, WANG Chao, TIAN Guo-liang

(Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In this paper, microwave radiation brightness temperature data from Special Sensor Microwave/Image (SSM/I) in America Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) are used to conduct a study about China land surface temperature retrieval. SSM/I data selected was scanned on July 20 and 24, 1997. At first, the SSM/I data covering China land surface is processed and imaged. Then, types of the land surface are classified based on an algorithm described in Holliger's report using the seven channels. At last, the retrieval of China land surface temperature is carried out by using a statistic method based on SSM/I multiple channel data. The result was validated by the retrieval of AVHRR brightness temperature data. There is a good trend between the result of SSM/I data and the result of AVHRR data. The result shows that SSM/I microwave radiometer data provides a fast study method to land surface temperature retrieval on a large area.

Key words: special sensor, microwave/imager (SSM/I); AVHRR; land surface types; land surface temperature; retrieval

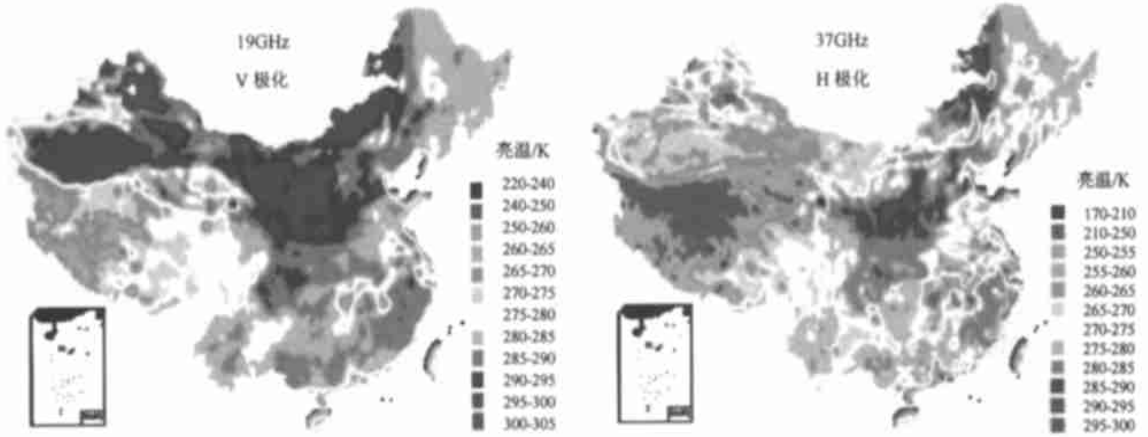


图 1 1997 年 7 月 20、24 日 SSM/I 中国陆地区域极化亮温图

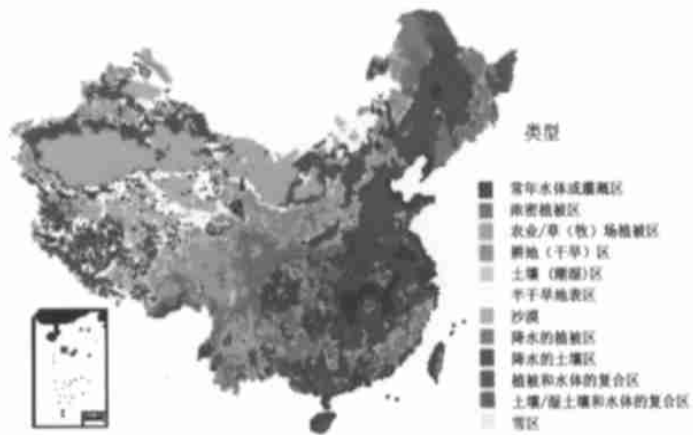


图 2 SSM/I 中国陆地分类图

