

# 中分辨率成像光谱仪雪盖监测算法研究

李羿霏

(北京航天飞行控制中心)

**摘要** 美国国家航空航天局发布的雪盖产品 MOD10 是在业务云检测结果 MOD35 基础上进行的,不考虑有云区域,只对 MOD35 的晴空区域进行积雪检测,存在云多判、雪少判的现象。通过对比分析中分辨率成像光谱仪(MODIS)各通道的遥感数据资料,在美国国家海洋与大气局使用的雪盖算法相关基础上,提出了辅助判识方案,以提高云雪判识的准确性,可供解决 MOD10 云多判、雪少判问题,改善 MODIS 雪盖监测效果。

**关键词** MODIS 雪盖 算法 遥感

## 1 引言

众所周知,我国大部分区域冬春季节雪灾发生频繁,尤其是 2008 年初发生在我国南部地区的大范围降雪,严重影响了当地人民的生产和经济发展。此外,积雪又可以直接影响到地面和大气温度、地面反照率和土壤湿度,进而影响到天气和气候变化。因此,监测积雪的分布,掌握积雪随时间和地区的变化,越来越受到国内外学者的重视。

利用气象卫星遥感资料是监测雪盖的一种有效手段,常规的地面站能获得较为真实准确的积雪资料,但是由于测站空间分布不均匀,很难满足研究需要。遥感技术的应用弥补了这一缺陷,从卫星遥感资料中提取积雪信息,及时、方便、准确地了解积雪的分布和强度,能够有效地对冬季地表特征进行监测和分析。

目前全球雪盖监测最新发展是 MODIS 冰雪产品算法,它是业务化效果最好的光学传感器积雪反演算法。主要是依据云、雪、陆地、水体、植被等不同观测物的光谱差异来实现观测的,通过基于阈值的指标测试、波段间的归一化判识规则,使用短波红外和可见光波段的比值、差值等来实现雪盖分布的监测和分析。

## 2 MODIS 资料概述

### 2.1 中分辨成像光谱仪(MODIS)

MODIS 是 EOS 系列卫星的主要探测仪器,也是 EOS-TERRA 平台上唯一进行直接广播的对地观测仪器。MODIS 是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,携带有 490 个探测器,具有 36 个光学通道,分布在  $0.4\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$  可见近红外,短波红外,热红外波谱范围内,地面分辨率分别为 250m、500m 和 1000m,扫描宽度为 2330km,在对地观测过程中,每秒可同时获得 6.1MB 来自海洋和陆地表面的信息,每日或每两日获取一次全球观测数据。

### 2.2 MODIS 资料格式

本文用到的是 MODIS 1B 数据资料(MOD02 数据),它是按照 HDF 格式存储的,HDF 是美国国家高级计算应用中心(National Center for Supercomputing Application)为了满足各种领域研究需求而研制的一种能高效存储和分发科学数据的新型数据格式。一个 HDF 文件中可以包含多种类型的数据,如栅格图像数据,科学数据集,信息说明数据。

HDF 提供了 6 种基本数据类型:光栅图像(Raster Image),调色板(Palette),科学数据集(Scientific Data Set),注解(Annotation),虚拟数据(Vda-

ta)和虚拟组(Vgroup)。所有的这 6 种基本数据类型可由图 1 来表示。

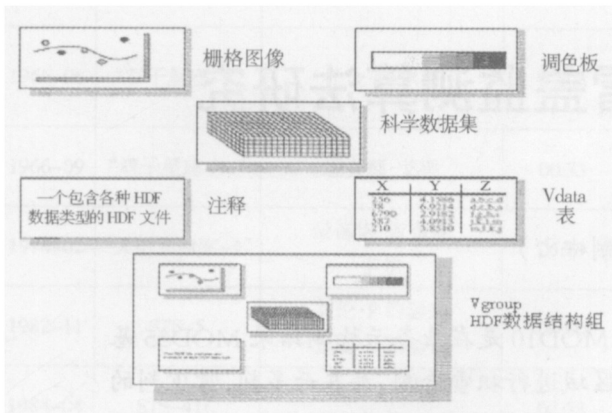


图 1 HDF 数据类型

- 栅格图象: 数据模式提供一种灵活方式存储、描述栅格图象数据,包括 8bit 和 24bit 光栅图象。
- 调色板:作为颜色查找表提供图像的色谱。它是一个表格,其表中每列的数字表示特定的颜色。
- 科学数据集:用来存储和描述科学数据的多维数组。
- Vdata: 是一个用于存储和描述数据表格的结构。
- HDF 注释:是文本字符串,用来描述 HDF 文件或其包含的 HDF 数据对象。
- Vgroup:用来把相关数据对象联系起来。一个 Vgroup 可以包含另一个 Vgroup 以及数据对象。任何 HDF 对象都可以包含在一个 Vgroup 中。

### 3 算法设计

通过上述已知,用气象卫星光学仪器遥感监测雪盖,主要根据云、雪、陆地、水体、植被等不同观测物的光谱差异来实现的。

在可见光和近红外波段,陆地、水体和植被比较容易区分,三者的反射率一般都比云、雪低很多。利用归一化差分植被指数(NDVI)等参数,可以很好的将不含积雪的植被区分出来,对于有积雪覆盖的植被区,用 NDVI 结合归一化差分积雪指数(NDSI),也可以提取出来。对于水体来说,其可见光反射率和近红外反射辐射率都比其他陆表类型低,利用这些特点,能较容易提取出水体。

在可见光波段,光学厚度较大的云与雪面相似,积雪与云的反射率曲线如图 2 所示,都具有较高的

反射率。在近红外波段,二者却有较大差异。积雪吸收太阳辐射,在 1.55μm~1.65μm 之间和 2.1μm 附近反射率都达到最小,而云反射太阳辐射,云的反射率远大于积雪。依据这些波谱特性建立的 NDSI,能够区分大部分云和雪。

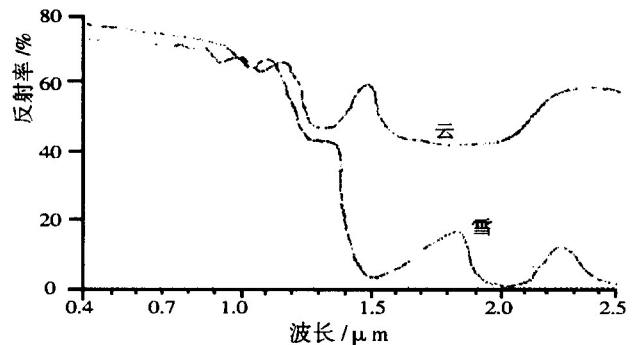


图 2 积雪与云的反射率曲线

#### 3.1 常规雪判识

MODIS 雪盖监测业务算法采用 NDSI 来判断积雪区。NDSI 是基于雪对可见光与短红外波段的反射特性和反射差的相对大小的一种测量方法。NDSI 对大范围的光照条件不敏感,对大气作用可使其局部的归一化并且不依赖于单通道的反射。NDSI 采用多波段比值的阈值法,简化了计算,并可以进一步消除部分云层和地形阴影等影响。利用 MODIS 资料 NDSI 的计算如下:

$$NDSI = \frac{R_i - R_0}{R_i + R_0}$$

其中  $R_i$  为像元在第  $i$  波段的反照率,以下同。NDSI 是分辨雪和许多其它地表的有效方法,对于阳光照射下的和在阴影下的雪它都能很好地检测出。在加利福尼亚的 TM 资料测试中,当约有 50%或更大范围的积雪覆盖率时,对应像元所求出的  $NDSI \geq 0.4$ 。由于水也可能出现  $NDSI \geq 0.4$ ,因此需要进一步分离雪和水。根据利用 TM 资料所做的实验,对应 MODIS 的  $R_2 > 0.11$ ,且  $NDSI \geq 0.4$  时,这个像元可以被判识为雪盖。为了防止将低可见光反射率的像元,如云杉,被误判为雪,再限定  $R_4 < 0.11$ ,满足以上所有判断条件的像元判定为雪。

#### 3.2 薄雪分析及判识

薄雪由于其反射率相对偏低,由于混合像元的影响,在 1.6μm 反射率偏高,在积雪判识中容易与裸地和低云混淆。在积雪判识中,最明显的表现就是积

雪边缘区容易被误判为低云。

通过提取大量薄雪样本，建立薄雪 NDSI 与  $1.6\mu\text{m}$  反射率( $R_6$ )和  $0.645\mu\text{m}$ ( $R_1$ )通道的关系，可以发现薄雪的光谱特性：其积雪指数 NDSI 范围在  $-0.2\sim 0.5$  之间， $R_6$  在  $0.1\sim 0.28$  之间， $R_1$  在  $0.15\sim 0.5$  之间，且 NDSI 与  $R_6$  和  $R_1$  之间都存在较好的线性关系，NDSI 随着  $R_6$  的增大而减小，随着  $R_1$  的增大而增大。

$$\text{NDSI} = 0.75 - 0.0262 * R_6$$

$$\text{NDSI} = 0.3004 + 0.0164 * R_1$$

根据样本的分布范围及线性表达式，通过平移截距可以建立薄雪的判识函数：

$$\text{NDSI}_{R_7} \text{ 范围：} (0.75 - 0.0262 * R_6 - 0.1) \sim (0.75 - 0.0262 * R_6 + 0.1)$$

$$\text{NDSI}_{R_1} \text{ 范围：} (0.3004 + 0.0164 * R_1 - 0.125) \sim (0.3004 + 0.0164 * R_1 + 0.125)$$

通过对薄雪的分析，判识效果有所改进，如下图 3 所示。

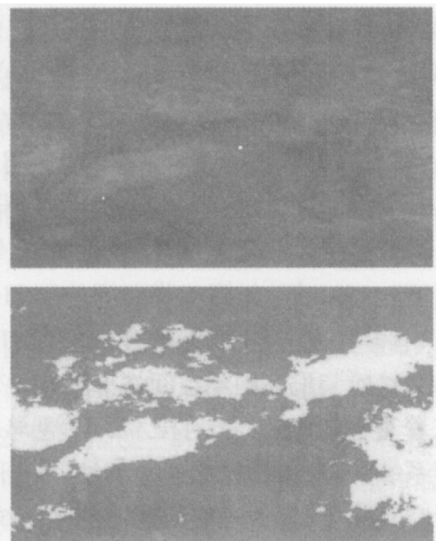


图 3 薄雪判识效果对比图

### 3.3 含沙量高的积雪区特性分析及判识

在我国西部沙漠地区，由于冷空气活动带来的降雪天气常常带动下垫面的沙粒，使得该地区沙粒和雪粒混合在一起，给积雪判识带来了难度。

由于这种积雪具有一定的区域性特征，分布范围小，因此如果仅仅通过调高  $1.6\mu\text{m}$  通道的阈值，必然带来其他地区的积雪误判，降低积雪判识的准确度。不过，由于积雪中混合了沙粒，沙粒等下垫面信

息的混合使得积雪区的 NDVI 有差异。一般的，对于反射率较高的积雪区， $R_1$  往往高于  $R_2$ ，使得积雪区的 NDVI 小于 0 或者略大于 0 (低于 0.05)，而含有沙粒的积雪区， $R_2$  高于  $R_1$ ，积雪区的 NDVI 能达到 0.08 左右，而具有同样高反射率的云区，其 NDVI 同样小于 0 或者略大于 0 (低于 0.05)。

根据这一特性，含沙量较高的积雪，其判识可以通过结合  $R_6$  和 NDVI 进行，在提高  $R_6$  判识阈值的同时，引入 NDVI 这一判识条件，同时结合  $R_1$ ，可以有效地识别出沙粒雪粒混合区的积雪信息，减少误判。

同样，这一判识方法可以用于南方地区的积雪判识，由于南方地区下垫面的 NDVI 很高，积雪区往往是积雪与植被的混合区，因此积雪的 NDVI 较高，而云区，尤其是与积雪极易混淆的冰晶云，云层厚，下垫面信息很难透过云层到达卫星，因此其 NDVI 值很低，多小于 0，这样引入 NDVI 判识条件，可以有效避免冰晶云和积雪的误判。

### 3.4 林区积雪判识

按照 MODIS 雪反演算法的自身评价，全球尺度的雪反演误差主要来源于森林区积雪。在 MOD10 雪算法研制过程中，现场测试表明大约有 50% 或更多雪覆盖地区像素的 NDSI 大于或等于 0.4。由于水的 NDSI 也可能大于或等于 0.4，所以需要进行附加的测试来区分水和雪。可见光波段水的反射率小于 0.11，因此它可以用来区分水和雪。

但是，这样的判据并不全面，因为在森林地区许多积雪像素的 NDSI 低于 0.4。如要正确区分森林区域的积雪，则需要较低的阈值。NDVI 和 NDSI 的联合使用可以区分森林中有雪和无雪的地区。森林中的 NDVI 值要高于一般地区，因此联合使用 NDVI 和 NDSI，就可以降低森林区的 NDSI 阈值，无需在其他陆表覆盖上对算法折衷。通过试验证实，NDVI 较高的地区可以降低 NDSI 的判定阈值。同时，为避免将反射率过低的像素(如黑云杉林)被划分到积雪中，使用可见光波段辅助判识。在此基础上，还应考虑  $11\mu\text{m}$  波段的亮温，阈值设置为 277K，低于此阈值的认为是雪。

MODIS 雪反演算法中的 NDSI-NDVI 林区雪判识采用的是一个遮盖反射模型，即某像素的 NDSI-NDVI 值在遮盖反射模型确定的不规则多边形内，可

(下转第 40 页)

公里以上。首先取  $w_0=12.5\text{cm}$ ,  $\lambda=800\text{nm}$ ,  $z=1000\text{km}$ , 则得到震动的标准方差与误码率的关系式, 如图 7 所示:

从图 7 中可以看出, 随着振动幅度的加大, 误码率在逐渐增大; 而且当振动幅度超过一定限度后, 误码率急剧增加。

由于卫星的抖动只与卫星本身和太空环境有关, 与链路本身的性能无关。故当链路本身误码率很低时, 则卫星的抖动产生的误码则是主要的误码率来源, 当卫星链路

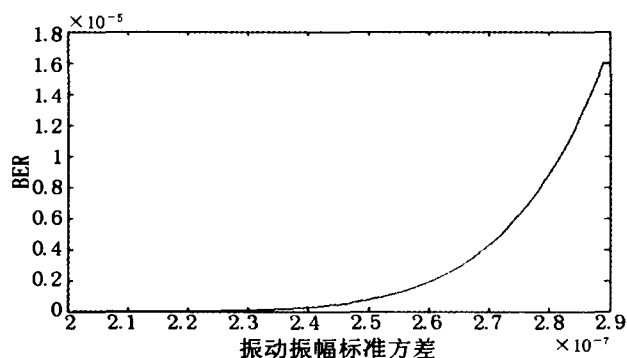


图 7 卫星震动幅度与误码率的关系曲线

本身的误码率很高而卫星抖动振幅较小时, 由于卫星的抖动产生的误码可以忽略不计。

#### 4 结论

空间特性非常复杂, 本文首先对链路大延迟、各种耗损造成的链路高误码率和卫星抖动等三个因素进行了建模, 通过仿真研究了其对卫星网络协议性能产生的影响, 为后续的卫星网络协议的设计提供了有益的参考。

#### 参考文献

- [1] 胡剑号, 吴诗其, 李乐民. 卫星移动通信系统中星际链路干扰分析模型, 通信学报, 1999, 20(2): 58-63
- [2] Christopher Ward etc. LEO Satellite Constellation Performance Analysis, IEEE GLOBECOM, 1993: 742-747
- [3] 陈芳允, 贾乃华. 卫星测控手册, 北京: 科学出版社, 1993
- [4] 陈如明. 中、低卫星通信, 电信科学, 1997, 13(7): 44-48
- [5] Makus Werner, Georg Berndl and Bernhard Edmaier. Performance of Optimized Routing in LEO Intersatellite Link Network, VTC 97/MC2-6
- [6] Gragopoulos, E. Papapetrou and F.N. Pavlidou. Routing Techniques for Low orbit Satellite configurations, ICT'98.

(上接第 11 页)

判为积雪。这种方法在实际使用中比较繁琐。本文使用的是一个矩形模型, 应用灵活性得到提高。在云检测的基础上, 对晴空区域若 NDVI 大于 0.2 使用矩形模型进行林区积雪判识, 并结合  $11\mu\text{m}$  波段的亮温  $BT_{11}$  小于 277K、 $1.6\mu\text{m}$  通道的反照率  $R_6$  小于 0.15 的判据。 $BT_{11}$  和  $R_6$  的阈值可以根据季节和纬度调节, 如纬度在北纬 50 度以上的森林区,  $BT_{11}$  的上限调低为 274K, 冬季  $R_6$  上限可降低到 0.10 到 0.12。

#### 5 结论

根据“云动雪不动”的原理, 我们可以选取同一地区邻近时次的图像, 通过对比确定积雪, 进而验证本文雪盖监测的效果。由于在可见光波段, 光学厚度较大的云与雪面相似, 都具有较高的反射率。在近红外波段, 积雪吸收太阳辐射, 在  $1.55\mu\text{m}$ ~ $1.65\mu\text{m}$  之间和  $2.1\mu\text{m}$  附近反射率都达到最小, 而云反射太阳辐射, 云的反射率远大于积雪, 因此在 MODIS 通道 3 ( $0.46\mu\text{m}$ )、6 ( $1.64\mu\text{m}$ )、7 ( $2.13\mu\text{m}$ ) 的合成图中, 雪的颜色会偏红。尽管冰晶云与积雪的光谱有些相似, 这

导致冰晶云在合成图中的颜色也偏红, 但是通过多光谱综合分析, 仍可以将其检测出来。通过理论研究和实际对比可以看出, 本文的算法能够改善和提高 MODIS 雪盖监测判读。

#### 参考文献

- [1] 郝露, 王静爱. 中国雪灾时空变化及畜牧业脆弱性分析 [J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 42-48.
- [2] Groisman P.Y., Karl T.R., Knight R.W. Observed impact of snow cover on the heat balance and the rise of continental spring temperatures [J]. Science, 1994, 263: 198-200.
- [3] Chen Wen, Gray H.F., Huang Ronghui. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. Advances in Atmospheric sciences, 2000, 17(1): 48-60.
- [4] 叶笃正. 长期预报的一些物理因子 [J]. 气象, 1975, 3, 10-12.
- [5] 王建. 卫星遥感雪盖制图方法对比与分析 [J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(4): 29-36.
- [6] 曹云刚, 刘闯. 从 AVHRR 到 MODIS 的雪盖制图研究进展 [J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(5): 15-19.
- [7] Klein A. G., Hall D.K., Riggs G.A. Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model [J]. Hydrological Processes, 1998, 12(10-11): 1723-1747.