

可见光云图日食阴影订正方法的改进和应用

裴晓芳 王振会 张红

(南京信息工程大学电子工程系, 南京 210044)

摘要 日食发生时, 卫星可见光云图上受其影响区域会出现明显的阴影, 使该区域的信息无法得到分析和利用。提出并应用改进的几何模型法对可见光云图日食阴影做订正处理, 并计算出指定区域处理前、后的灰度共生矩阵; 然后抽取云图纹理特征量对订正效果做进一步分析比较, 结果表明, 改进后的几何模型法基本消除了日食对云图的影响。

关键词 日食 订正 可见光云图 灰度共生矩阵 纹理特征量

中图法分类号: P413 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)09-1525-06

An Improved Method to Eliminate Eclipse Impact on the Satellite Visible Imagery

PEI Xiao-fang, WANG Zhen-hui, ZHANG Hong

(Department of Electronic Engineering, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract Solar eclipse may cause a shadow on satellite visible imagery. So it would have impact on analyzing and applying the information of satellite image in practice. This paper gives an improved method to eliminating eclipse shadow, and has been evaluated through an actual data experiment with gray level concurrence matrix and image texture feature quantities. The results show that improved method is more effective.

Keywords solar eclipse, radiation correction, satellite visible imagery, gray level concurrence matrix, cloud texture feature quantities

1 引言

日食现象的发生, 使得可见光云图受到影响, 在日食区域, 可见光云图上出现阴影, 影响了云图的实际使用。据统计, 地球上平均每年至少有2次日食, 日全食大约1年半发生一次。每次日食都是在日出时从某一点开始, 然后沿着日食带在日落时结束, 从开始点到结束点大约绕地球半圈。1999年8月11日8:10至12:40(UTC)前后, 在印度至欧洲的广大区域上发生了罕见的日全食现象。2001年6月21日9:00至13:40(UTC), 南半球也发生了日全食现象。这两次日全食过程对可见光云图产生了很大的影响, 在Meteosat-6静止卫星观测到的可见光云图

序列上有所反映。在日食发生地区获取的云图上, 图片整体亮度很暗, 云的结构、纹理、类型等特征全部失真, 日食区表现为黑色阴影, 无法区分云、陆地和海洋。这对卫星云图的使用分析带来困难, 就需要对日食区的可见光云图进行订正处理。对云图上日食阴影区做订正处理后, 有利于云图的利用和进行天气系统分析。Wang等人^[1]利用日食期间的可见光云图时间序列进行卫星导风研究, 比较了日食阴影订正前、后所导出风场的差异, 结果表明, 订正后的云图可以得到更多的风矢, 有助于风场计算。目前有关云图阴影订正的研究还很少, 许建明等人^[2]在分析日食对卫星可见光云图的影响的基础上, 提出了简易的日食阴影几何订正模型。本文利用投影法, 先将云图2维直角坐标变换为球面3维

基金项目: 国家自然科学基金项目(40075005)

收稿日期: 2006-03-27; 改回日期: 2006-07-03

第一作者简介: 裴晓芳(1978~), 讲师, 2003年于南京信息工程大学获大气物理学与大气环境专业硕士学位。研究方向为图像处理与应用。E-mail: xiaofangpei@163.com

直角坐标;然后应用改进的几何订正模型,对可见光云图受日食影响的区域进行订正。对订正前后以及用改进几何模型订正后的可见光云图上任意选取的区域,分别计算它们的灰度共生矩阵(gray level cooccurrence matrix),并抽取云图纹理特征量进行分析比较^[3],进而验证改进的几何订正模型,订正可见光云图日食阴影的效果。结果表明,改进后的订正模型更能消除日食对可见光云图的影响。

2 日食订正方法

2.1 日食及订正模型简介

由于月球本身是不发光的球体,它在太阳的照射下,在背向太阳的一面必然发生黑影。当月球运行到太阳和地球之间,三者差不多成一直线时,月影挡住了太阳,于是就发生了日食^[4]。月影有本影、伪本影(本影的延长部分)和半影之分。在地球表面上,月球本影扫过的地方,那里太阳光全部被遮住,所看到的是日全食;在半影扫过的地方,月球仅遮住日面的一部分,这时看到的是日偏食。有时,月球本影达不到地面,它延伸出的伪本影扫到地球表面,此时太阳中央的绝大部分被遮住,在周围留有一圈明亮的光环,这就是日环食。半影和伪本影的不同部分,明暗程度不同;愈接近本影,愈阴暗;离本影愈远,日轮被遮蔽程度愈小,愈明亮。

由于可见光云图灰度值正比于辐射计反演电压之平方根,在反照率不变的情况下,卫星接收到的地球反射太阳辐射由到达地球的人射太阳辐射决定^[5]。地球表面受日食影响的区域所接收的人射太阳辐射被不同程度的削弱,所以,对可见光云图灰度值进行订正可以视为对到达地球的人射太阳辐射进行订正。

假设日食不发生时到达地球某处的入射太阳辐射为 B_0 ,而实际观测到该处的入射太阳辐射为 B_1 ,定义辐射订正函数 $F = B_0/B_1$,若能给出 F 的值,则可得 B_0 的估计值为 $\hat{B}_0 = F \times B_1$ ^[2]。根据光线是直线传播这一原理,若太阳上的某一点(A点)发出的光无法到地球上的一点(B点),那么A点也不能接收到B点发出的光。因此,当日食发生时,可见光云图上阴影区中任意一点被削弱的太阳辐射的大小可以由这一点发出的光在太阳表面上形成阴影面积的大小来衡量。

根据日食形成的原理,从几何的角度出发,建立一个模型来分析可见光云图阴影区中的点受日食的

影响。

地球表面上某点P处的几何订正模型如图1所示^[2]。

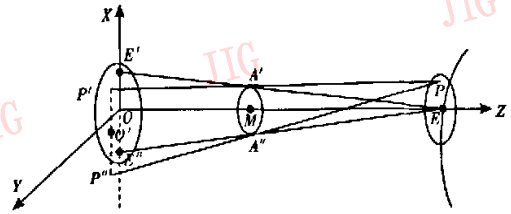


图 1 日食辐射订正示意图

Fig. 1 Schematic of radiation correction for solar eclipse

以太阳中心O为原点,以O与月球中心M的连线为Z轴,建立直角坐标系,太阳圆盘位于XY平面内,月球圆盘平行于XY平面,Z轴与地球相交于地表上一点E。点E是日食的中心,E附近的地表面可近似为平行于太阳面和月球面的平面,点P位于该平面上。过P点作月球在XY平面上的投影圆,投影圆和太阳圆盘同位于XY平面上,根据它们之间的位置关系(如图2所示),可计算出不能照射到点P的太阳面积 S_A 。这样点P的辐射订正函数可以表示为

$$F(P) = \frac{S_{sun}}{S_{sun} - S_A} \quad (1)$$

其中, S_{sun} 是太阳圆盘面积, S_A 是照射不到点P的太阳圆盘面积。

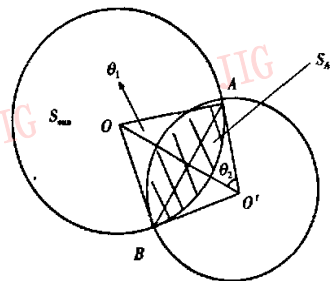


图 2 太阳圆盘食缺示意图

Fig. 2 Schematic of sun disc's eclipse

2.2 订正方法的改进

许建明等人^[2]给出的日食阴影几何订正模型是基于日食形成的原理,根据地球、月球、太阳三者之间的位置关系建立的,但是需要订正处理的可见光云图是由卫星观测地球表面所得,因此,将可见光云图上的像素点投影到地球表面,经过坐标变换后,将云图

由 2 维直角坐标变换为球面 3 维直角坐标,这样就可以避免地球曲率的影响,进而提高订正的准确性。

卫星对整幅地球圆面的扫描是东西和南北两个方向扫描的合成。卫星扫描辐射计对地球自西向东的扫描,依靠镜头随星体自旋完成,使有效光束从一地平扫描到另一地平,以获取一条线状的云或下垫面的信息;而由北向南扫描则靠镜头本身的步进运动来完成的,卫星每自旋一周,扫描镜就向南步进一步,仪器一条线一条线地不断向前扫,这样就构成 2 维扫描。数条平行有序的扫描线,就形成一幅完整的云图。Meteosat-6 每幅图片的视场角为 $18^\circ \times 18^\circ$,一幅可见光图片有 5000 条扫描线。假设每条扫描线上有 5000 个采样点。图像上每个像素点相对于卫星的方向都可以用角 α 和 β 来确定。以卫星 S 为锥面顶点,用 $P(i, j)$ 表示第 i 条线上第 j 个像素点,其 α 和 β 定义为

$$\begin{cases} \alpha = (i - 2500) \times 18.0 / 5000 \\ \beta = (j - 2500) \times 18.0 / 5000 \end{cases} \quad (2)$$

假设从静止卫星的观测点 S 经云图上任一点作射线,如图 3 所示,这条射线与地球有 3 种位置关系:相离,即没有交点(如 SA);相切,即只有一个切点 l_1 (如 SB);相交,则有两个交点 l_2, l_3 (如 SC),其中只有点 l_2 是可见的(点 l_3 在地球背面,不可见)。基于上述思路,将云图上的点投影变换为地球表面上的点。

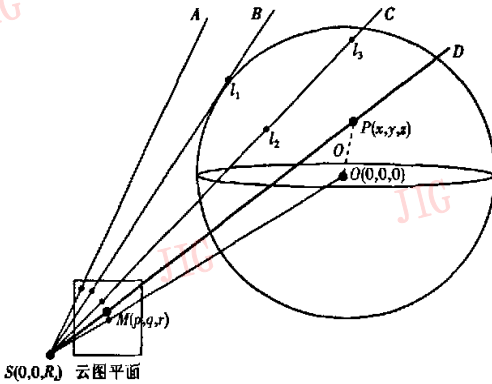


图 3 云图上的点到地球表面的投影
Fig. 3 The process of projecting points of image onto earth's surface

现假设,从点 S 经云图上点 M 作射线交地球表面于点 P ,用矢量 \vec{SP} 表示,那么点 S 到这射线上任一点用 $k \cdot \vec{SP}$ 表示,其中 k 是一个变量。点 O 点 $(0, 0, 0)$

是地球中心,线段 OS, OP 分别用 \vec{OS}, \vec{OP} 表示。根据矢量关系,有

$$\vec{OS} + k \cdot \vec{SP} = \vec{OP} \quad (3)$$

其中, \vec{SP} 用 (p, q, r) 表示; \vec{OS} 用 $(R_e, 0, 0)$ 表示,其中 R_e 是地心距卫星观测点的距离; \vec{OP} 用 (x, y, z) 表示。如果云图上的一点是确定的,由式(2), \vec{SP} 的方位角 α , 仰角 β 就已知。

根据

$$\begin{cases} \tan(\alpha) = q/p \\ \tan(\beta) = r / \sqrt{(p^2 + q^2)} \end{cases} \quad (4)$$

为方便起见,可以令 $p = 1$, 则有

$$\begin{cases} q = \tan\alpha \\ r = \tan\beta \cdot \sqrt{1 + q^2} \end{cases} \quad (5)$$

若已知 \vec{OS}, \vec{SP} , 根据式(3), 可以得到 \vec{OP} 的 (x, y, z) 值:

$$\begin{cases} x = R_e + p \cdot k \\ y = q \cdot k \\ z = r \cdot k \end{cases} \quad (6)$$

如果 P 点是在地球表面上,那么它应满足下面的方程:

$$(x^2 + y^2) / R_e^2 + z^2 / R_p^2 = 1 \quad (7)$$

其中, R_e 是平均赤道半径, R_p 是平均极半径。

将(6)式代入(7)式,可得到下式:

$$k^2 \cdot (p^2 + q^2 + r^2 \cdot R_e^2 / R_p^2) + k \cdot (2 \cdot R_e \cdot p) + (R_e^2 - R_p^2) = 0 \quad (8)$$

这可以看作一个以 k 为未知数的一元二次方程 $(ax^2 + by^2 + c = 0)$, 求解 k 。再根据(8)式,就得到 (x, y, z) 。如果方程有两个实根,就有两个交点, k 取值较小的;若只有一个实根,就仅有一个交点;若无实根,就没有交点,不作投影。这样就实现了云图上点与地球表面上点的一一对应。

3 日食订正实验

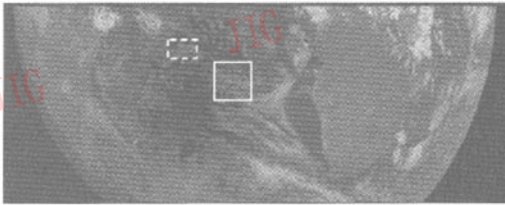
3.1 云图资料描述

1999 年 8 月 11 日 8 时至 12 时前后,在印度至欧洲的广大区域上观测到罕见的日食现象。2001 年 6 月 21 日 9 时至 13 时前后,南半球也出现了日食现象。本实验所用的云图资料是欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)提供的, Meteosat-6 静止卫星在 1999 年 8 月 11 日 08:00 至 12:50(UTC)以及 2001 年 6 月 21 日 09:00 至 13:50(UTC), 日食发生时发

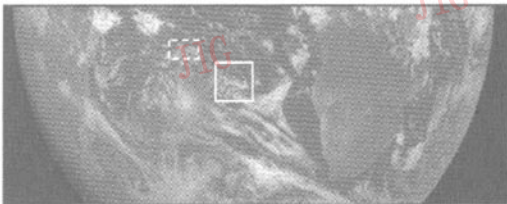
回的可见光云图序列。每个年次各有 10 个 slots, 一个 slot 间隔为 30min, 卫星每 10min 发回一幅云图, 分别有 30 个可见光云图序列。

3.2 日食订正个例

本文以 2001 年 6 月 21 日 11:10(UTC) 可见光云图为订正个例, 比较订正方法改进前后的订正效果如图 4 所示。云图灰度级数 $G = 256$, 最小值为 0 表示黑色, 最大值为 255, 表示白色。订正前(图 4(a)), 由于日食位于云图中心处, 整幅云图色调很暗, 阴影区中云的纹理、结构无法识别。订正后(图 4(b), (c)), 其中图 4(c) 是应用改进几何模型订正的, 与改进前(图 4(b))相比较, 订正效果更好。阴影区基本消失, 被遮盖的云和地表特征重新显现, 云的纹理、形状比较清晰, 保持了云系的连续性, 增加了可利用的信息量, 有利于云和天气系统的分析。



(a) 订正前的可见光云图



(b) 用几何模型法订正后的可见光云图



(c) 用改进几何模型法订正后的可见光云图

图 4 2001 年 6 月 21 日 11:10(UTC) MET-6 可见光云图日食阴影订正前后的比较

Fig. 4 Comparing the original VIS image observed by MET-6 at 11:10(UTC) on June 21, 2001. with images using two corrected methods

在图 4(b), (c) 中都存在一个圆形的暗色模糊区, 这里是日全食引起的不可订正区。下面将利用灰度共生矩阵和纹理特征量对处理效果进行分析比较。

4 日食订正效果分析

4.1 利用灰度共生矩阵比较订正效果

灰度共生矩阵(gray level cooccurrence matrix)是按一定的空间关系描述像素点对之间的灰度相关性, 是分析图像区域微观纹理特性的有力工具^[6]。

设图像中任意两点 (k, l) 和 (m, n) , 其间距为 d , 两点之间连线与 x 轴的夹角为 θ , θ 可分别取 0° 、 45° 、 90° 、 135° , 两点的灰度分别为 i, j , 灰度级数为 G 。 x 方向总像素数为 N_x , y 方向总像素数为 N_y 。 记为 $L_x = \{1, 2, \dots, N_x\}$; $L_y = \{1, 2, \dots, N_y\}$; $G = \{1, 2, \dots, N_g\}$ 。

定义 在图像域 $L_x \times L_y$ 范围内, 两个相距为 d , 方向为 θ 的, 灰度值分别为 i, j 的像素点 (k, l) 和 (m, n) 在图中出现的概率为灰度共生矩阵, 即

$$P(i, j, d, \theta) = \#\{[(k, l), (m, n)] \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y) / d, \theta, (k, l) = i, (m, n) = j\} \tag{9}$$

其中, $\#(x)$ 表示集合 x 的元素数^[6]。

对于粗纹理相距为 d 的两点的灰度变化较小, $P(i, j)$ 大值会集中地出现在主对角线附近; 而对于细纹理, 所取两点的灰度变化较大, $P(i, j)$ 大值应分布在主对角线附近比较大的范围里面。

由于静止卫星图像的分辨率较低, 云的纹理又复杂多变, 所以取 $d = 1$, 灰度级数取 $G = 256$, 分别计算 θ 取 $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$ 时的灰度共生矩阵, 再对四个方向的共生矩阵取平均, 得到平均灰度共生矩阵^[7]。

张红等人^[3]利用几何模型法对 2001 年 6 月 21 日 11:10(UTC) 可见光云图进行订正后, 取订正前后的相同框区, 以及 180min 后可见光云图上日食近似没有受影响的区域, 分别计算它们的灰度共生矩阵, 并提取纹理特征量进行比较, 来验证可见光云图日食阴影订正的效果。为了易于比较, 本文在图 4 中取与之相近似的两个框区, 如图 4 所示, 分别用实线框(169 × 119 像素)和虚线框(100 × 50 像素)表示, 进行个例 1 和个例 2 的实验。计算出日食处理前、后的平均灰度共生矩阵, 其中个例 1 结果如图 5 所示。

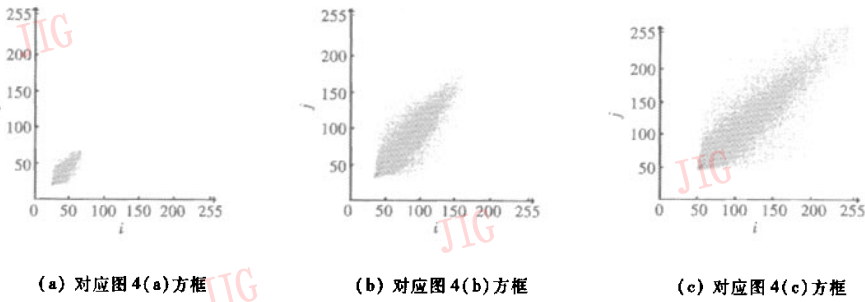


图 5 灰度共生矩阵概率分布图

Fig. 5 Gray level cooccurrence matrixes

图中横轴和纵轴分别表示相距 $d = 1$ 的两像素点 (k, l) 和 (m, n) 的灰度值 i 和 j 。颜色越深表示该处 $P(i, j)$ 值越大。

由图 5 可见,云图处理前后灰度共生矩阵的概率分布相似,这表明处理前后云系的形状、类型没有发生变化。订正前, $P(i, j)$ 大值区靠近原点,比较集中于主对角线附近(图 5(a)),表明所取区域的云图色调暗、灰阶差异小,纹理较粗;订正后, $P(i, j)$ 大值区远离原点,散布在较大的范围里面(图 5(b)、(c)),并且图 5(c)比图 5(b)效果更明显,表明阴影已基本消除、灰阶差异拉大,纹理更细致,结构变清晰。

利用图 4 中虚线框区域做个例 2 实验,所得结论与上文一致。

4.2 利用纹理特征量分析订正效果

灰度共生矩阵反映了纹理特征的统计性质,从灰度共生矩阵可以计算纹理特征量对比度、熵、相关、角二阶矩^[7],根据订正前后纹理特征量的变化进一步分析订正效果。

对比度 (CON) 是度量图像中灰度变化的量。对于粗纹理,相邻像素间灰度差距较小, $P(i, j)$ 较集中于主对角线附近, CON 较小;相反对于细纹理, $P(i, j)$ 分布在主对角线附近比较大的范围里面 CON 较大。熵 (ENT) 是度量图像中纹理复杂程度的量。如果灰度共生矩阵中各元素相等,表明这时各种可能灰度的像素对概率相等,图像纹理复杂, ENT 具有最大值。反之,图像灰度均匀, ENT 值就相对偏小。相关 (COR) 是度量图像灰度线性关系的量,其值域为 $-1 \leq COR \leq 1$ 。例如,对具有水平方向的纹理,则 $P(i, j, d, 0^\circ)$ 矩阵的 COR 值往往大于其他方向矩阵的 COR 值。角二阶矩 (ASM) 是图像

灰度均匀性的度量。当 $P(i, j)$ 值的分布集中于主对角线附近时,说明局部区域内图像灰度分布是均匀的,图像呈现较粗的纹理, ASM 值相应较大。反之, ASM 值相应较小。

利用 3.2 个例 1, 2 计算所得的灰度共生矩阵,按像素间的 4 种相对位置,每一个特征量可算得相应 4 个方向的待征量。但由于 4 个纹理方向,在订正前后变化都相同,所以取 4 个方向特征量的均值来表示该纹理特征量。如表 1。

表 1 纹理特征量平均值 ($d = 1, \theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)

Tab. 1 Averages of cloud texture characteristic quantities for $d = 1$ over the 4 directions

个例	纹理特征量	订正前	订正后	
			改进前	改进后
1	CON	12.32	142.8	407.7
	ENT	2.37	3.35	3.63
	COR	0.91	0.92	0.91
	ASM	0.013	0.002	0.001
2	CON	13.43	213.16	625.64
	ENT	2.22	3.19	3.40
	COR	0.79	0.80	0.80
	ASM	0.0177	0.0014	0.0007

由表 1 中个例可以看出,订正后,纹理特征量 CON 和 ENT 与订正前相比都有所增大,并且改进订正方法后,变化更明显,说明图像纹理由粗变细,由均匀变复杂,能较容易地将各种物象区别开来;COR 订正前后没有太大变化,表明订正前后相邻像素灰度值的相关性基本没有改变;ASM 订正后都变小,且改进后变化幅度更大,这表明 $P(i, j)$ 值的分布不

再集中于主对角线附近而是主对角线周围比较大的范围,图像呈现较细的纹理,灰度层次变丰富。总之,改进订正方法后,云图的日食阴影区经订正处理后,图像纹理变复杂、纹理变细、结构变清晰、像素取值范围拉大了,提高了可见光云图的利用价值。

本文对个例还计算了 $d=3, 5, 8$ 和 10 的特征量值,其结论与表 1 相一致。CON 随 d 成正比例增大;ENT 随 d 变化不大;由于框区里纹理周期不明显,COR 随 d 增大而减小;ASM 随 d 大而减小。

5 结 论

本文提出并应用改进后的几何订正模型对受日食影响的可见光云图进行订正处理,除了日食中心不可订正区,基本可以消除云图上的阴影区,使得云图上的地形、云系、洋流清晰可辨,云系纹理结构变清晰;并通过计算云图订正前后的灰度共生矩阵和抽取的纹理特征量,分析比较日食阴影订正的效果。结果表明,改进的几何订正模型订正效果较好;其灰度共生矩阵的 $P(i, j)$ 大值比较远离原点、分散在主对角线附近较大的范围内;纹理特征量与订正前相比,CON 和 ENT 有明显的增加,COR 基本保持不变,ASM 变小,这些特点都表明了云图的纹理变细,结构变清晰,基本消除了日食对云图的影响,有利于云图的云和天气系统分析。

在该订正模式中,还没有考虑到大气以及大气中的气溶胶和云对太阳辐射的散射与反射。散射与反射会削弱到达太阳照射区(包含日偏食区和日环食区)的太阳辐射,这给订正日食中心周围的阴影区提供了基础,可通过增大在偏食区或日环食区可观测到的太阳辐射面积来完成。另外,对于日食中心位于云图外的情况,中心位置的选取存在不确定性。对于上述问题还需做进一步研究。

致 谢 本文所用卫星云图等资料由欧洲气象卫星中心(EUMETSAT)提供。在此表示感谢!

参考文献(References)

- 1 Wang Z H, Xu J M, Zhan Y. Eliminating the effect of solar eclipse in satellite remotely sensed images [A]. In: Proceedings of SPIE Second International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition [C], Wuhan, China, 2001: 260 ~ 264.
- 2 Xu Jian-ming, Wang Zhen-hui, Zhan Yu. Radiation correction for eclipse shadow on satellite image [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2002, 25(3): 400 ~ 404. [许建明,王振会,詹煜. 卫星云图上日食阴影的订正 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(3): 400 ~ 404.]
- 3 Zhang Hong, Wang Zhen-hui, Xu Jian-ming, et al. A study on cloud texture feature quantities of the satellite VIS imagery with solar eclipse shadow [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(1): 47 ~ 51. [张红,王振会,许建明等. 可见光云图日食阴影订正效果的纹理特征量分析 [J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(1): 47 ~ 51.]
- 4 Tang Han-liang, Yu Zong-kuan, Sheng Chang-jun. The Calculation for Solar & Luna Eclipse [M]. Nanjing: Jiangsu Science & Technology Press, 1980: 6 ~ 120. [唐汉良,余宗宽,沈昌钧. 日月食计算 [M]. 南京: 江苏科技出版社, 1980: 6 ~ 120.]
- 5 Chen Wei-min, Xia Huan-qing, Chen Guang-yu. Satellite Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1989: 203 ~ 212. [陈渭民,夏浣清,陈光宇. 卫星气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 1989: 203 ~ 212.]
- 6 Fu De-sheng, Wang Xin-zhi. Extraction of cloud texture features and automatic cloud classification [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1995, 18(4): 530 ~ 535. [傅德胜,王新芝. 云图纹理特征的抽取与云的自动分类 [J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(4): 530 ~ 535.]
- 7 Yu Fan, Liu Chang-sheng, Xiao Wen-an. Textural features of cirrus in comparison with those of other cloud species on GMS IR imagery [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1998, 34(3): 350 ~ 358. [郁凡,刘长盛,肖稳安. 静止卫星红外云图上卷云与其它云类纹理特征的比较 [J]. 南京大学学报(自然科学), 1998, 34(3): 350 ~ 358.]