
参赛密码 _____

(由组委会填写)

第九届“华为杯”
全国研究生数学建模竞赛

学 校 华北电力大学

参赛队号 10079010

队员姓名	1.	范林涛
	2.	王明雨
	3.	许加庆

第九届“华为杯”全国研究生数学建模竞赛



题 目 基于交叉相关系数的度量模型

摘 要：

本文利用卫星云图中的灰度数据，建立了基于灰度值相关系数的风矢场度量模型，并用差商法、三次样条插值法和整体局部匹配算法对模型进行优化。使用图像特征提取算法和风矢运动估计算法，建立了动态搜索匹配模型。并对影响风矢度量求解精度和速度的因素进行了定量讨论，对各度量模型进行评价。

对于问题一：利用卫星扫描角度、矩阵元素与三维坐标系中点的对应关系，建立了视场转换模型。计算出了灰度矩阵元素行列号对应的经纬度，并将海岸线添加到了画出的卫星云图中。

对于问题二：利用四窗口法和直方图均衡化法对图像进行了预处理。采用交叉相关系数法将两时刻的卫星云图进行匹配，求解 21:00 时刻风矢量。最后利用三种算法分别对模型进行优化，结果证明差商法具有很好的优化效果。

对于问题三：采取基于相对变化率的特征值提取算法，调整窗口和搜索范围大小。利用相邻经纬度处的风矢信息，对搜索范围进行预判和动态调整。与问题二中的固定窗口模型相比，辨识速度提高了 48.3%。

对于问题四：对非单调的气压层与温度函数进行了分段拟合求解。根据气压层温度曲线特性和气压不能突变原理，建立了气压层全局匹配模型。根据此模型就可以得到给定经纬处的气压值。

关键词： 交叉相关系数 风矢预测 特征提取 全局匹配

目录

目录.....	3
1. 问题重述.....	4
2. 符号说明.....	5
3. 问题的假设.....	5
4. 问题分析.....	6
5 基于卫星云图的风矢量场（云导风）度量模型的建立和求解.....	6
5.1 视场坐标系的变换.....	6
5.1.1 帧坐标映射到经纬度模型的建立.....	7
5.1.2 经纬度映射到帧坐标模型的建立.....	10
5.1.3 模型的求解.....	11
5.2 风矢量场的度量模型的建立和求解.....	11
5.2.1 模型 1：基于灰度值相关系数的风矢量场度量方法.....	11
5.2.2 模型 1 的改进.....	17
5.2.3 模型中一些问题的讨论.....	20
5.3 窗口大小和搜索范围自适应算法.....	20
5.3.1 窗口大小的调整.....	21
5.3.2 搜索范围的调整.....	22
5.4 风矢量所在等压面模型.....	24
5.4.1 模型的建立.....	24
5.4.2 模型的求解.....	27
6. 结果分析.....	27
6.1 结果分析.....	27
6.2 模型评价：.....	28
6.2.1 模型优点：.....	28
6.2.2 模型缺点：.....	28
参考文献.....	29
附件.....	30

1.问题重述

卫星云图在掌握大气环流、中长期天气预报以及灾害性天气学的研究中有重要作用。它由地球同步卫星上的红外探测器探测地球上空的温度数据再转换成灰度数据制作而成。附件中定标数据文件 `k_temp.txt` 给出了灰度数据与温度数据的转换关系, `k_temp.txt` 内有 1024 个实型数, 依次是图象灰度数据为 0 到 1023 所对应的 K 氏温度值, 灰度值为 -1 时对应的是地球以外的探测点。[注: 地球是被探测温度的唯一来源, 如果天空无云, 探测到的温度可以看成是地球表面的温度; 在有云层的地方, 探测到的温度相对较低, 且云层越高越厚温度就越低, 探测到的温度可看成云层所在区域的温度]。红外探测器扫描采样时, 按步进角(南北方向)和行扫描角(东西方向)均为 140 微弧(1 弧度=1000000 微弧)采样。在卫星与地球中心的连线和地球表面的交点(称为星下点)处的分辨率大约是 5 公里。本题提供的卫星探测数据文件都是 2288×2288 的灰度值矩阵, 矩阵的每个元素都对应地球上或地球外的一个探测点(或称采样点)。同步卫星离地球中心的高度为 42164000 米, 星下点在东经 86.5 度, 北纬 0 度, 星下点对应的矩阵元素位于矩阵的第 1145 行和第 1145 列相交处。

为解答本题, 首先要确定灰度矩阵中每个元素对应的采样点在地球上的经纬度。地球可视为理想椭球, 这个理想椭球可以由地球的一个经过南北极的椭圆截面绕南北极的连线旋转而得到, 椭圆截面的长半轴(赤道半径)=6378136.5m, 短半轴(极半径)=6356751.8m; 据此就可以将灰度矩阵中非负元素的行列号按上北下南、左西右东的地图规则换算成地球上经纬度坐标, 此结果既可用于估算各探测点之间的距离, 还可用于在云图上依据海岸线经纬度坐标标出海岸线以方便看图。

具体要求解决如下问题:

1. 换算视场坐标。给出灰度矩阵元素行列号对应于经纬度坐标的换算公式, 建立矩阵形式的经纬度坐标文本文件, 这里矩阵的第 i 行与第 j 列, 分别对应灰度矩阵的 $450+i$ 行与 $450+j$ 列, 矩阵元素是(经度, 纬度)这种形式的二维数组, 给出结果的范围为: 灰度矩阵中的第 451 行至 550 行, 第 451 列至 550 列, 文本文件取名为 `jwd.txt`; 而在论文中给出第 500 行和第 500、501、502 列三个交叉点处对应的经纬度。

进而将卫星灰度矩阵 `IR1_2100.mat` 转化为卫星云图(参考附录中的卫星云图), 并在这个卫星云图上添加海岸线。保存卫星云图为 PDF 或 JPEG 文件, 取名为 `spic.pdf` 或 `spic.jpg`。

2. 根据三个相邻时刻的卫星数据(`IR1_2030.mat`, `IR1_2100.mat`, `IR1_2130.mat`), 用适当的方法建立 21:00 时刻风矢场的度量模型, 给出计算方案, 这里限定风矢计算中像素块匹配所选用的窗口大小为 16×16 个像素, 搜索范围限定为 64×64 个像素。

给出你们对上述窗口大小和搜索范围的限定的理解或评价。

3. 为了提高像素块匹配质量, 取消问题 2 中窗口大小和搜索范围的限定, 利用图像特征匹配等思想, 设计能自适应地确定窗口大小和搜索范围的有效方法。进而建立风矢场的度量模型和算法。

利用此模型和算法计算问题 2 中在纬度 26 度, 经度分别是 52, 53, 54, 57, 58(度)处的风矢。

分析比较你们建立的这两种风矢计算方法的优劣, 结论要有定量数据支撑。

提出你们关于云图数据量和云导风风矢场计算研究的建议。

4. 应用附件中全球温度数值预报文件 `temp3.mat` 计算问题 2 中非零风矢所在的等压面（用该时刻该处大气的压强值标志，物理单位为毫巴）。并在论文中给出在纬度 26 度，经度分别是 52, 53, 54, 57, 58（度）处附近求出的风矢量所在的等压面。

2.符号说明

W	地球纬度;
J	地球经度;
h	卫星与地球中心距离
R_L	地球长半径
R_S	地球短半径
α	扫描线与 XOY 平面的夹角
β	扫描线与 YOZ 平面的夹角
N	地球表面的一点
O	地心点
ON	点 N 与地心的连线
J_x	ON 与 XOY 平面的夹角
J_y	ON 与 YOZ 平面的夹角
x_0	地球上表面某点 N 的 X 轴坐标
y_0	地球上表面某点 N 的 Y 轴坐标
z_0	地球上表面某点 N 的 Z 轴坐标
ε	地球的偏心率，与极地半径和赤道半径有关;
R_1, R_2, R_3	交叉相关系数;
fff	风速的大小;
$hd(a,b)$	同一行所对应各列的相对变化率
$ld(a,b)$	同一列所对应各行的相对变化率
L_x, L_y	像素块在 x,y 方向上的运动分量
$P(X_z, Y_z)$	灰度图像中点的 (X_z, Y_z) 灰度值
C	灰度矩阵中某点所处的层数值
S_p	单值点的总个数

3.问题的假设

1. 假设同步卫星相对于地球是静止不动的。
2. 假设卫星在同一时刻的扫描没有时间差。
3. 假设一小时内，同一位置处的风矢是不变的。
4. 云的高度对经纬度的计算的影响可以忽略不计。
5. 云层不存在上下运动，只考虑水平方向的运动;
6. 不同高度的云不存在遮挡问题。
7. 同一片云，其在卫星云图上的灰度值相似。
8. 忽略云和地球表面温度随时间的变化。

-
9. 云在卫星云图上的移动速度, 每小时大于两个像素, 并且忽略亚像素位移。
- 10 卫星视为一个点;

4.问题分析

对问题 1 的分析: 问题一中要求进行经纬度和灰度值矩阵元素中行列式的对应关系, 其实质上是不同坐标系之间的转换问题。两者之间的转换媒介为地球与卫星所在的三维笛卡尔坐标系。关键是依据卫星的步进角和扫描角搭建起两者之间对应的桥梁。问题一的求解为以后各个问题的求解打下了基础。

对问题 2 的分析: 要确定某一时刻风矢场的度量模型, 选用 16×16 像素块大小的窗口用于云的匹配, 在 64×64 像素块范围内进行搜索, 采用基于灰度值相关系数的风矢场度量方法^[1]。选取 21:00 时刻卫星云图中某一经纬度的点, 得到其对应的帧坐标的位置, 将其扩展为大小为 16×16 像素的目标块, 在其周围平滑移动, 实现在 64×64 像素块范围内的搜索。比较的依据为目标块灰度值和搜索块灰度值的相关性, 相关性最大的一块即为寻找的匹配块, 从而也可以确定风矢的方向。风矢大小的计算可以利用椭圆上两点之间的距离计算公式。除了上述基本方法外, 还需要对其进行优化比较, 提高计算速度和效率。

对问题 3 的分析:

题目中规定了窗口大小为 16×16 个像素, 搜索范围限定为 64×64 个像素。对于不同地理位置、不同灰度值的云都使用相同大小的目标块和搜索块, 这是不合理的。对于有些云, 16×16 的像素块内云的灰度值分布较广, 即方差较大, 这样就会使得 16×16 的像素块不是按照一致的矢量进行移动, 如果用 16×16 个像素作为目标块, 就会使得风矢的度量结果与实际情况相差很大。对于有些云, 盲目地在 64×64 个像素的范围内进行搜索, 范围相对较大, 这会增加计算机的计算时间和复杂度。所以, 需要设计一种自适应的方法, 能够根据云的灰度值自动调整窗口大小和搜索范围, 减少搜索时间, 提高匹配速度, 使得风矢场的度量更加高效、准确。

对于搜索窗口, 可以采取基于相对变化率的特征值提取算法, 将搜索窗口的边界移动到具有高识别率像素块四周, 从而动态的调整窗口大小。对于搜索范围, 可以根据相邻区域的风矢信息, 确定目标区域的风矢, 从而确定搜索范围。

对于问题四的分析: 依据题目中给出信息, 可以很容易的求解出给定经纬度处温度与气压层之间的对应关系, 所处气压层和压强的关系。由于给出的关系为离散序列, 故需要进行差值计算以求得准确的对应值。又因温度与气压层之间的对应关系非单调, 故一个温度可能对应几个气压层值, 故需要用一定的算法, 确定某一经纬度对应的气压层值。

5 基于卫星云图的风矢场（云导风）度量模型的建立和求解

5.1 视场坐标系的变换

由题意可知, 问题的求解的过程中涉及三个坐标系, 一个坐标系为灰度矩阵元素所在的帧坐标系, 一个坐标系为地球和卫星所在的三维笛卡尔坐标系, 一个为经纬坐标系。本文建立了前两个坐标系, 第三个坐标系采用默认经纬坐标系, 并明确了灰度元素在帧坐标系的位置, 以及地球表面和卫星在笛卡尔坐标系中的位置。随后根据卫星探测扫描的角度特点, 建立了三个坐标系之间点的对应关系,

最终得出了灰度矩阵元素行列号对应于经纬度坐标的互映射模型。

5.1.1 帧坐标映射到经纬度模型的建立

以灰度矩阵元素的列号为横坐标，以灰度矩阵的行号为纵坐标，建立帧坐标系，如图 1 所示。

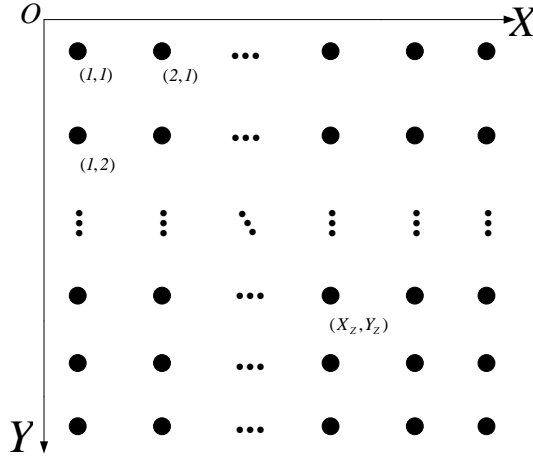


图 1 帧坐标系

以地球的中心 O 为原点，以地心与卫星所在直线为 Y 轴，地球的长半轴为 Z 轴，经过原点 O 且与平面 OYZ 垂直的直线为 X 轴建立笛卡尔直角坐标系。其中 Y 轴正方向为从地心到卫星所在点， Z 轴正方向为从地心指向北极点， X 轴正方向为从北极上方看，逆时针旋转与 Y 轴正方向成 90 度的方向，如图 2 所示

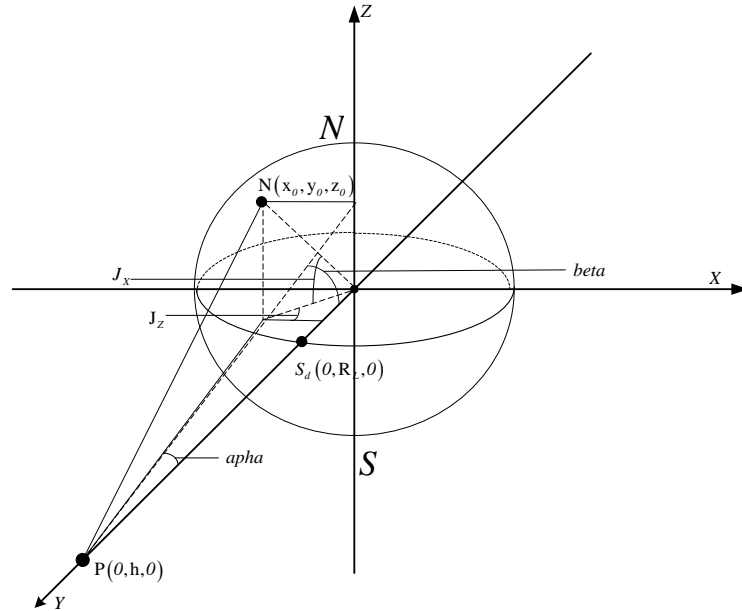


图 2 笛卡尔坐标系

1) 建立三维坐标系中地球表面点与帧坐标系中地球表面点的映射关系

由以上建立的坐标系可知，地心的坐标为 $A_1(0,0,0)$ 卫星的坐标为 $P(0,h,0)$ ， $h=42164000$ 。星下点 S_d 在直角坐标系中坐标 $(0,R_e,0)$ ，帧坐标系中坐

标 (1145,1145)。地心地球可以视为理想椭球体，已知此椭球体的长半径为 $R_L = 6378136.5m$ ，短半径为 $R_S = 6356751.8m$ ，由此可得地球表面各点的方程为：

$$\frac{x^2}{R_L^2} + \frac{y^2}{R_L^2} + \frac{z^2}{R_S^2} = 1 \quad (1)$$

本文中将红外探测仪进行一次采样时，扫描到的地球区域的中心点与卫星的连线所在直线称为扫描线。根据题目可知，扫描线与地球表面的交点即对应灰度矩阵中的一点 $M(X_Z, Y_Z)$ 。此点与星下点 S_d 的坐标距离为 $L_x = Y_Z - 1145$ ， $L_y = X_Z - 1145$ 。因卫星按步进角(南北方向)和行扫描角（东西方向）均为 140 微弧采样，所以也就可知扫描此点 M 时，卫星扫描转过的角度：步进角度（南北方向）= $140 \times L_x$ ，行扫描角度= $140 \times L_y$ 。

即扫描线与平面 XOY 的夹角：

$$\alpha = L_x \times (140 / 10^6) \times (180 / \pi) \quad (2)$$

扫描线与平面 YOZ 的夹角

$$\beta = L_y \times (140 / 10^6) \times (180 / \pi) \quad (3)$$

由此可以确定扫描线在三维空间的方程为：

当 $\beta \neq 0$ 时：

$$\begin{cases} x = \frac{1}{\cot(\beta)} \times (y - h) = k_1(y - h) \\ z = -\tan(\alpha) \times (y - h) = k_2(y - h) \end{cases} \quad (4)$$

当 $\beta = 0$ 时：

$$\begin{cases} x = 0 \\ z = -\tan(\alpha) \times (y - h) = k_2(y - h) \end{cases} \quad (5)$$

联立扫描线方程和地球表面空间三维方程可知，扫描线与地球表面的交点 Y 轴坐标为：

$$\begin{cases} y_1 = \frac{-b_y - \sqrt{b_y^2 - 4 \times a_y c_y}}{2a_y} \\ y_2 = \frac{-b_y + \sqrt{b_y^2 - 4 \times a_y c_y}}{2a_y} \end{cases} \quad (6)$$

其中：

当 $\beta \neq 0$ 时：

$$a_y = R_L^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 + R_S^2 + R_S^2 \cdot k_1^2 \quad (7)$$

$$b_y = 2 \times (R_L^2 \cdot k_l^2 \cdot k_2^2 + R_S^2) \cdot h \quad (8)$$

$$c_y = (R_L^2 \cdot k_l^2 \cdot k_2^2 + R_S^2) h^2 - R_L^2 \cdot R_S^2 \cdot k_l^2 \quad (9)$$

当 $\beta = 0$ 时:

$$a_y = k_2^2 + R_S^2 \quad (10)$$

$$b_y = 2 \times k_2^2 \cdot h \quad (11)$$

$$c_y = k_2^2 h^2 - R_L^2 \cdot R_S^2 \quad (12)$$

结合实际情况可知, 此两点有且只有一个点能被扫描到, 被扫描到的点 y 值较大, 所以选取 y 值较大的点 y_2 作为点 $M(X_Z, Y_Z)$ 的对应点 N 的 Y 轴坐标。由此可知点 N 的坐标为:

当 $\beta \neq 0$ 时:

$$\begin{cases} x_0 = k_l(y_2 - h) \\ y_0 = y_2 \\ z_0 = k_2(y - h) \end{cases} \quad (13)$$

当 $\beta = 0$ 时:

$$\begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = y_2 \\ z_0 = k_2(y - h) \end{cases} \quad (14)$$

2) 建立地球表面经纬坐标与直角坐标之间的映射关系

已知地球表面上的一点坐标为 $N(x_0, y_0, z_0)$, 则根据几何关系可计算出其与地心连线 ON 与平面 XOY 的夹角 J_x 和平面 YOZ 的夹角 J_z , 如图 2 所示。

ON 与平面 XOY 的夹角 J_x 为:

$$J_x = \arctan\left(\frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}\right) \quad (15)$$

ON 与平面 YOZ 的夹角 J_z 为:

$$J_z = \arctan\left(\frac{x_0}{y_0}\right) \quad (16)$$

星下点所在位置为东经 86.5 度, 北纬 0 度, 则东经 86.5 度线在平面 YOZ 上,

根据经纬度的定义可知：

点 N 所在纬度 W 为：

$$W = J_x \text{ 度} \quad (17)$$

点 N 所在经度 J 为：

$$J = 86.5 + J_z \text{ 度} \quad (18)$$

以上公式联立就得到就可以得到帧坐标系中点 M 与三维坐标系中对应点 N 的经纬度映射关系，这样也就建立了由像素坐标系到的转化模型，即视场转化模型。

5.1.2 经纬度映射到帧坐标模型的建立

若已知点 N 的经纬坐标 (W, J) ，则 ON 与平面 XOY 的夹角 J_x 和平面 YOZ 的夹角 J_z ，与公式（1）联立可解得：

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\cos(J_x) \cdot \sin(J_z) \cdot R_L^2}{\sqrt{(\cos(J_x) \cdot R_S)^2 + (\sin(J_x) \cdot R_L)^2}} \\ y_0 = \frac{\cos(J_x) \cdot \cos(J_z) \cdot R_L^2}{\sqrt{(\cos(J_x) \cdot R_S)^2 + (\sin(J_x) \cdot R_L)^2}} \\ z_0 = \frac{\sin(J_x) \cdot R_L^2}{\sqrt{(\cos(J_x) \cdot R_S)^2 + (\sin(J_x) \cdot R_L)^2}} \end{cases} \quad (19)$$

由此可知扫描线与平面 XOY 的夹角 $alpha$ 和扫描线与平面 YOZ 的夹角 $beta$ ：

$$alpha = \arctan\left(\frac{z_0}{h - y_0}\right) \quad (20)$$

$$beta = \arctan\left(\frac{x_0}{h - y_0}\right) \quad (21)$$

利用帧坐标点与扫描角度、步进角度之间的关系，可以求得此坐标点的帧坐标为：

$$L_x = \frac{alpha}{(140 / 10^6) * (180 / pi)} \quad (22)$$

$$L_y = \frac{beta}{(140 / 10^6) * (180 / pi)} \quad (23)$$

至此，也就建立了由经纬度向帧坐标的转化模型。

5.1.3 模型的求解

由以上建立的视场转换模型计算可得在给定帧坐标处的经纬度数值,结果表 1 所示。

利用所建立的视场转换模型,编制了计算程序(文件 XYtoJW.m),按照题目要求,计算出了灰度矩阵中的第 451 行至 550 行,第 451 列至 550 列的点所对应经纬度,存入了 jwd.txt 中。

利用 MATLAB 软件将卫星灰度矩阵 IR1_2100.mat 转化为卫星云图,并利用所建立的模型,编制了计算机程序(文件 JWtoXY.m),求解出了文件 coastline0.txt 中给出的海岸线经纬度所对应的帧坐标值,并将其添加到了卫星云图中,如图 3 所示。

表 1 给定点经纬度值

帧坐标 (L_x, L_y)	(500,500)	(500,501)	(500,502)
经纬度(W,J)	(32.74,46.49)	(32.74,46.57)	(32.73,46.65)

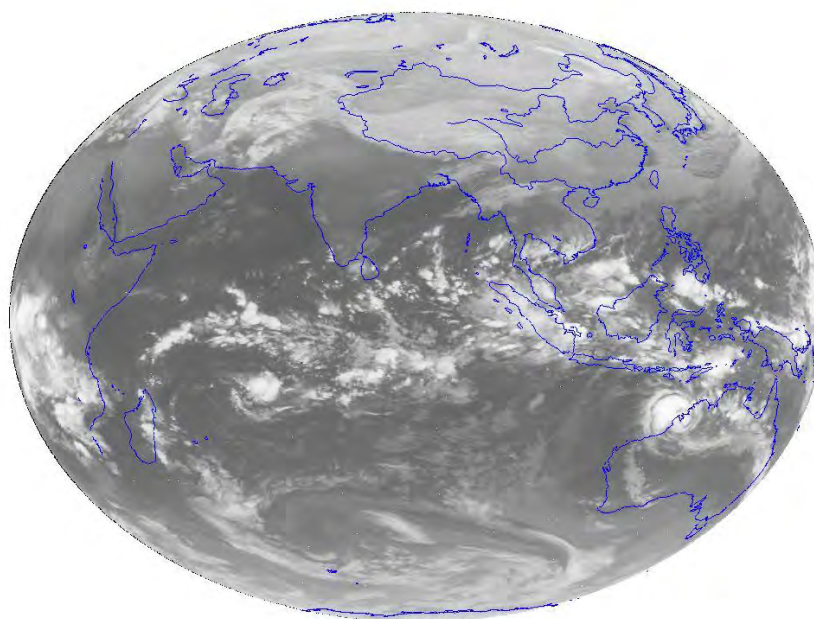


图 3 标注海岸线的卫星云图

5.2 风矢场的度量模型的建立和求解

5.2.1 模型 1: 基于灰度值相关系数的风矢场度量方法

问题二要确定某一时刻风矢场的度量模型,选用 16×16 像素块大小的窗口用于云的匹配,在 64×64 像素块范围内进行搜索,本文采用基于灰度值相关系数的风矢场度量方法^[1]。选取 21:00 时刻卫星云图中某一经纬度的点,由第一问

的坐标变换可以得到其对应的帧坐标的位置，即对应卫星扫描的行列值分别为 i 和 j ，以 (i, j) 为中心扩展为大小为 16×16 像素的目标块，以其中的某一像素点

（本文选取像素块中坐标为 (i, j) 的像素点，即所求经纬度对应的像素点）为中心，在 21:30 时刻的卫星云图中分别向上、向下、向左、向右平行移动 32 个像素点，实现在 64×64 像素块范围内进行搜索。比较的依据为目标块灰度值和搜索块灰度值的相关性，在搜索范围内与目标块相关性最大的一块即为寻找的匹配块。也就是说，21:00 时刻的目标块经过半个小时移动到了搜索到的匹配块，则两图对应块中心的移动矢量即为所求经纬度的风矢。

基于灰度值相关系数的风矢量场度量方法的具体步骤如下：

(1)数据的预处理

a.直方图均衡化^[2]。

将所给灰度数据进行直方图的均衡化，即通过灰度变换使图像直方图在每一个灰度级上都尽可能的有相同的像素数。图像均衡化后其像素的概率密度函数会发生变化，在理想情况下会变为一个定值，如图 4 所示。

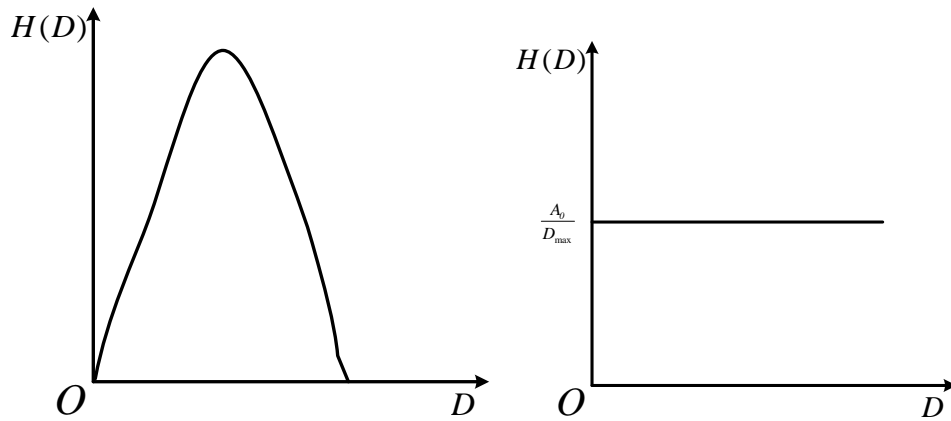


图 4 直方图均衡化概率密度变化示意图

经过对图像的像素数进行统计，发现此卫星云图中的灰度值范围在 300 至 900 之间。为了能够增强图像整体的对比度，丰富细节信息，使窗口图像更加容易识别，本文在度量风矢前预先对图像进行直方图均衡化处理。

设图中的有效像素总个数为 A_0 （有效像素点为地球表示上点的像素点），标准灰度图像中像点的取值范围为 0 到 1023。令 $D_{\max} = 1023$ ，即图像最高灰度级。

图像的概率密度函数定义为：

$$p(x) = \frac{1}{A_0} H(x) \quad (24)$$

其中 $H(x)$ 为图像第 x 灰度级的像素个数。

设原始图像的概率密度函数为 $p_r(r)$ ，直方图均衡化后图像的概率密度为

$p_s(s)$ 则有：

$$p_s(s) = p_r(r) \frac{dr}{ds} \quad (25)$$

若使转换后图像的概率密度函数为 1，则必须满足：

$$p_r(r) = \frac{ds}{dr} \quad (26)$$

对等式两边对 r 积分，可得

$$s = f(r) = \int_0^r p_r(\mu) d\mu = \frac{1}{A_0} \int_0^r H(\mu) d\mu \quad (27)$$

上式为归一化后的值，两边同时乘以 D_{\max} 没有归一化的转化公式为：

$$D_B = f(D_A) = \frac{D_{\max}}{A_0} \int_0^{D_A} H(\mu) d\mu \quad (28)$$

对于离散图像，转换公式为

$$D_B = f(D_A) = \frac{D_{\max}}{A_0} \sum_{i=0}^{D_A} H_i \quad (29)$$

其中 H_i 为第 i 级灰度像素个数， D_B 为第 i 级像素转换后的像素值。

原图像及其直方图如图 5 所示；处理后的图像及其直方图如图 6 所示；

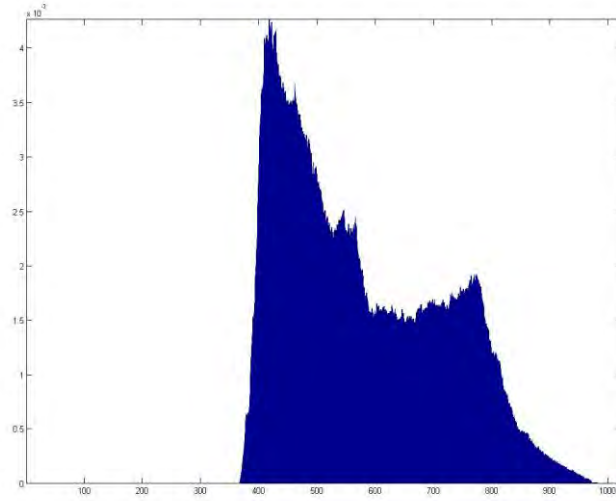


图 5 原图像及其对应的直方图

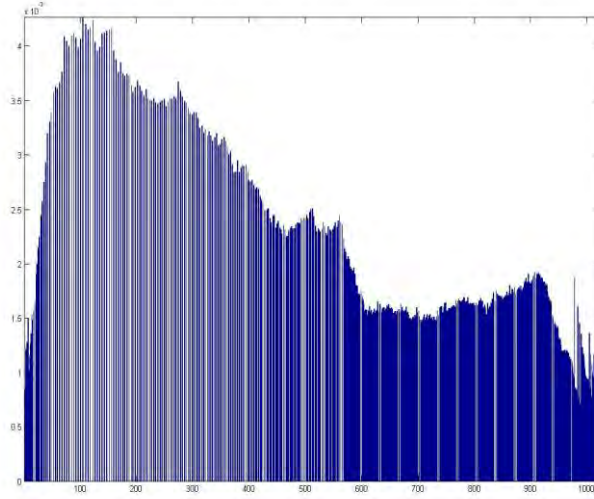


图 6 均衡化后的图像及其直方图

b.4 窗口降噪

将所给三个时刻的灰度值用 MATLAB 作图，从图中可以看出，存在明显的噪点。为了使结果更加接近实际值，要对噪点进行处理。

首先要挑选出噪点，对于所要研究的点，计算其与上、下、左、右四个位置平均灰度值的相对变化率，若相对变化率大于一定阈值，则认为此点为噪点，要对其进行处理。处理的方法为 4 窗口降噪法，即将所研究点的灰度值修正为上、下、左、右四个位置灰度值的平均值。

经过多次尝试，当阈值取为 0.5 时，20:30 时刻和 21:00 时刻的图中发现了 8000 多个噪点，21:30 时刻的图中发现了 10000 多个噪点；当阈值取为 0.45 时，20:30 时刻和 21:00 时刻的图中噪点个数基本不变，21:30 时刻的图中发现了约 13000 个噪点；当阈值取为 0.4 时，20:30 时刻和 21:00 时刻的图中噪点个数基本不变，21:30 时刻的图中发现了 17000 多个噪点。从中可以得出，同步卫星扫描过程中的硬件误差和传感过程中的软件误差等原因，会产生噪点，21:30 时刻相对于其他两个时刻噪点个数最多，为了减小对后面解答风矢场度量的影响，同时较少的改变原始数据，本文选择阈值为 0.45，对噪点进行判断并处理。

(2) 示踪云追踪^[3]

将目标块(16×16 像素图像块)在搜索区域内(64×64 像素图像块)滑动，计算目标块在目搜索范围里的交叉相关系数的最大区域即为匹配块，交叉相关系数 R_1 的定义为：

$$R_1(m, n) = \frac{\sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}][g(i + m, j + n) - \bar{g}]}{[\sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}]^2 \sum_i \sum_j [g(i + m, j + n) - \bar{g}]^2]^{1/2}} \quad (30)$$

其中， $i, j \in [1, 16]$ 分别为目标块的行与列号， $m, n \in [0, 64]$ 为搜索区域的位移改变量， $f(i, j)$ 为目标块云的灰度值， $g(i, j)$ 为搜索区域云的灰度值，

$\bar{f} = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j f(i, j)$ 为目标块云的平均灰度值, $\bar{g} = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j g(i+m, j+n)$ 为目搜索区域云的平均灰度值, 其中 $N=16$ 。当最大相关系数取得时, 搜索区内的匹配块相对于目标块在 x, y 方向上分别移动了 m 和 n 个像素点。

以 21:00 时刻南纬 20° 东经 50° 为例, 所得到的最大交叉相关系数值为 0.95, 在 21:30 时刻的云图上位于南纬 20.04° 东经 49.54° 。

(3) 风矢的确定

确定一个二维风矢需要 4 个指标: 起始点的纬度、经度, 风矢的方向 (单位: 从正北方顺时针方向量得的角度) 和大小 (单位: 米/秒)。题目中要求计算南纬 40 度至北纬 40 度, 东经 46 度至 126 度区域的整数经纬度处的风矢, 则起始点的经度和纬度是已知的, 风矢的方向即为目标块中心向匹配块中心的指向。风矢的大小计算方法如下^[4]:

首先推导椭圆地球的半径表达式。考虑地球是一个椭圆, 地球半径在各个纬度的地方是不同的。地球半径的表达式推导如下: 子午面上椭圆方程可写为

$$x^2 / r_e^2 + y^2 / r_p^2 = 1 \quad (31)$$

式中 x 轴从地心指向赤道, y 轴从地心指向北极, r_e 、 r_p 分别为赤道和极地处球的半径, 且 $r_e=6378136.5\text{m}$, $r_p=6356751.8\text{m}$, 那么地球的偏心率为:

$$\varepsilon^2 = 1 - (r_p / r_e)^2 \approx 0.006694538 \quad (32)$$

若子午线上任意一点的地心纬度为 φ , 则这一点与地心连线的方程为:

$y = x \tan \varphi$, 以此式代入上式子午面上椭圆方程, 可得到地心纬度 φ 处地球的半径为:

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} = r_p [(1 + \tan^2 \varphi) / (1 + \tan^2 \varphi - \varepsilon^2)]^{1/2} \quad (33)$$

假定地心纬度与地理纬度相同, 已知极地处地球半径 r_p , 由上式可算出椭圆地球的半径。

再计算云矢的大小和方向。示踪云目标的初始位置 $A(\varphi_A, \lambda_A)$ 和终点位置 $B(\varphi_B, \lambda_B)$ 由相关匹配方法求出可以求出风。图 7 为地球球面上 A、B 两点之间的位移示意图。

26	53	34.34	15.73
26	54	314.80	28.12
26	57	50.74	10.76
26	58	20.91	5.19

在题目所给范围内，由所求得的风矢反推 20:30 时刻各个整数经纬度点对应的原始位置，计算预测位置与目标块之间灰度值的相关系数，并求出均值为 0.4696。

5.2.2 模型 1 的改进

上面介绍的基于灰度值相关系数的风矢量场度量方法，只是利用了图像的灰度信息，灰度是通过星载传感器观测转化得到的，存在着观测误差。

改进方法 1：三次样条差值法

基于灰度值相关系数的风矢量场度量方法，没有考虑图像灰度的梯度信息，而灰度的梯度信息会直接影响到图像的相似性。通过离散点上观测值，要寻找一个函数，使得它与观测点上的观测值充分接近，同时其导数与真实函数的导数要有足够的精度。本文采用了数值微分方法，采用样条法来构造曲线，计算云图各点在经度和纬度（帧坐标系中横坐标和纵坐标方向）上灰度的导数，然后利用正则化方法将云图灰度的梯度信息加入到相关匹配的要素中，最后采用仿真和实际验证对云导风进行反演。这种新的相关匹配方法既利用了灰度的信息，又吸收了图像灰度的梯度信息。样条法是用一个平滑曲线来对各主干点进行拟合的方法，它是通过构造多项式来形成一条把所有主干点连接起来的平滑曲线，一般选择三次曲线(根据三次插值样条函数所得的曲线)进行拟合。三次样条插值由分段三次曲线连接而成，在连接点处有二阶连续导数，从而可以保证在连接点处光滑连接。

设函数 $f(x)$ 在区间上给定 $n+1$ 个插值节点： $a = x_0 < x_1 < \cdots < x_n = b$ 及其在插值节点的值 $f(x_0), f(x_1), \cdots, f(x_n)$ ，若函数 $S(x)$ 满足

(1) $S(x)$ 在每个小区间 $[x_j, x_{j+1}]$ 上是三次多项式， $j = 0, 1, \cdots, n-1$ ；

(2) $S(x)$ 在每个小区间 $[a, b]$ 上具有连续二阶导数；

(3) $S(x_j) = f(x_j)$ ， $j = 0, 1, \cdots, n-1$

则 $S(x)$ 为 $f(x)$ 的三次样条插值函数。

三次样条插值函数的具体求法如下^[5]：

三次样条函数的二阶导数 $S''(x_j)$ 在每个小区间 $[x_j, x_{j+1}]$ 是一次线性函数，如果已知在小区间两个端点的值，则 $S''(x_j)$ 在小区间 $[x_j, x_{j+1}]$ 的表达式可表示为：

$$S''(x_j) = M_j + \frac{1}{h_j}(M_{j+1} - M_j)(x - x_j)(x \in [x_j, x_{j+1}]) \quad (39)$$

对 $S''(x_j)$ 连续两次积分并利用边界条件 $S(x_{j+1}) = y_{j+1}$ 可得：

$$\begin{aligned} S(x) = & y_j + \{f[x_j, x_{j+1}] - (\frac{1}{3}M_j + \frac{1}{6}M_{j+1})h_j\}(x - x_j) + \\ & \frac{1}{2}M_j(x - x_j)^2 + \frac{1}{6h_j}(M_{j+1} - M_j)(x - x_j)^3 \\ & (x \in [x_j, x_{j+1}], j = 0, 1, \dots, n-1) \end{aligned} \quad (40)$$

对于各个区间内的三次样条插值函数可以通过求解方程组得到系数 M_j [5]，

代入上式得到三次函数 $S(x)$ 。对 $S(x)$ 求一阶导数，分别计算每一点在帧坐标的横轴和纵轴方向的梯度。将图像灰度的梯度信息加入相关系数的计算中，交叉相关系数分别记为 R_2, R_3 。

$$R_2(m, n) = \frac{\sum_i \sum_j [f'_x(i, j) - \overline{f'_x}][g'_x(i + m, j + n) - \overline{g'_x}]}{[\sum_i \sum_j [f'_x(i, j) - \overline{f'_x}]^2 \sum_i \sum_j [g'_x(i + m, j + n) - \overline{g'_x}]^2]^{1/2}} \quad (41)$$

$$R_3(m, n) = \frac{\sum_i \sum_j [f'_y(i, j) - \overline{f'_y}][g'_y(i + m, j + n) - \overline{g'_y}]}{[\sum_i \sum_j [f'_y(i, j) - \overline{f'_y}]^2 \sum_i \sum_j [g'_y(i + m, j + n) - \overline{g'_y}]^2]^{1/2}} \quad (42)$$

其中 $f'_x(i, j)$ 为目标块在横轴方向的梯度， $g'_x(i, j)$ 为搜索区在横轴方向的梯度， $f'_y(i, j)$ 为目标块在纵轴方向的梯度， $g'_y(i, j)$ 为搜索区在纵轴方向的梯度， $\overline{f'_x}, \overline{f'_y}, \overline{g'_x}, \overline{g'_y}$ 表示梯度的平均值。构造函数如下：

$$J[m, n] = k_1 R_1(m, n) + k_2 R_2(m, n) + k_3 R_3(m, n) \quad (43)$$

本文取 $k_1 = 0.4, k_2 = 0.3, k_3 = 0.3$ ，使得上式最大的区域即为所求匹配块，从而得到风矢场。经过实验发现，此种方法的运行时间相对其他几种方法要长很多，所以不适宜工程使用。

改进方法 2：差商法。

对于目标块中的每一行，分别计算各个点灰度值对横轴方向的一阶导数。处于块边界的点，其斜率为连接该点和相邻点的直线的斜率；处于中间的点，其斜

率用连接相邻两点的直线的斜率表示。同理，对于目标块中的每一列，分别计算各个点灰度值对纵轴方向的一阶导数。将两个一阶导数矩阵加入相关系数的计算信息中，交叉相关系数分别为 R_2' , R_3' 。构造函数如下：

$$J[m, n] = k_1 R_1(m, n) + k_2 R_2'(m, n) + k_3 R_3'(m, n) \quad (44)$$

本文取 $k_1 = 0.4, k_2 = 0.3, k_3 = 0.3$ ，使得上式最大的区域即为所求匹配块，从而得到风矢场，结果见附件 fengshi_gaijin2.txt。进一步反推 20:30 时刻的云图，计算预测块与目标块灰度值相关系数的均值为 0.4757。

表 3 几个具体经纬度处的风矢（差商法）

纬度	经度	角度（北顺）	速度（米/秒）
26	52	0	0
26	53	28.67	10.42
26	54	281.22	24.52
26	57	65.22	13.27
26	58	28.55	7.12

改进方法 3：整体局部匹配算法

由于题目所给目标块为 16×16 个像素，包含范围比较大，云的灰度值分布可能会比较分散，所以在改进算法中，将 16×16 的像素块分成 4 个 4×4 的小像素块，分别计算目标块与搜索区域内每个对应小像素块之间的相关系数。这样，对于每个目标块，得到 4 个相关系数： R_{11} , R_{12} , R_{13} , R_{14} ，取综合相关系数

$$R_1 = k_1 R_{11} + k_2 R_{12} + k_3 R_{13} + k_4 R_{14} \quad (45)$$

其中 $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1$

取综合相关系数最大的区域为匹配块，作为目标块移动到的区域，从而计算风矢。反推 20:30 时刻的云图，同样计算预测块与目标块灰度值相关系数的均值为 0.4791。

表 4 几个具体经纬度处的风矢（整体局部匹配算法）

纬度	经度	角度（北顺）	速度（米/秒）
26	52	0	0
26	53	29.87	10.93
26	54	321.32	27.30
26	57	47.28	11.45
26	58	23.09	8.79

把上述 3 种方法的计算结果进行比较，列表如下：

表 5 各种度量云矢方法的结果比较

名称	灰度值相关系数的均值
方法 1	0.4696
改进方法 2	0.4757
改进方法 3	0.4791

5.2.3 模型中一些问题的讨论

1. 非零风矢

非零风矢可以由零风矢来间接得到。零风矢可以分为两种情况，一种为海面上的无云区域；另一种为云没有或者几乎没有移动的位置。

对于云图中海面上比较明显的无云区域，选取其中一个有代表性的经纬度位置（北纬 26° 东经 67° ），以它为中心扩展成一个 16×16 的像素块，计算得到此块内灰度值的均值为 528.8828，为了使其更加具有通用性，将其乘以系数 1.1，由温度和灰度的对应关系得到其对应的温度约为 273K（摄氏 0 度），将其作为区分有云和无云的临界温度。由题目可知，云层越厚，对应的温度越低。因此，将温度高于摄氏 0 度的位置作为无云区域，显然此点的风矢为零风矢。

对于有云的区域，利用前面所述方法进行相关性计算，若得到的匹配位置为其本身，则此点的风矢为零风矢。

用上述方法统计得到：所研究区域内非零风矢的个数为 2514 个。

2. 对窗口大小和搜索范围大小的评价

本文采用的窗口大小为 16×16 个像素，搜索范围大小为 64×64 个像素，其数值应该是按照统计规律得到的，对于大部分情况的云都适用，总体搜索速度和搜索范围达到最优。但是单独研究某一目标块时，可能不是最优的像素大小，理想中的方法是根据云的不同灰度值分布，自动调整窗口大小和搜索范围。

3. 模型的评价

此问题要求利用 21:00 时刻的数据求出该时刻的风矢，为了得到所求风矢的准确性，需要利用 20:30 时刻的数据进行验证。假设云在从 20:30 到 21:30 的时间内是直线运动，即从 20:30 到 21:00 和 21:00 到 21:30 的两个时间段内的风矢是相同的，从而利用 21:00 到 21:30 的风矢可以反推 20:30 时刻各个位置风矢的原始位置。但实际上，云在从 20:30 到 21:30 的时间内不一定是直线运动，所以反推到 20:30 的位置本身就是不正确的，致使反推得到块与目标块的灰度值不是相关系数最大的，所以求得的相关系数平均值要小的多，甚至不能达到 0.5 的水平。

5.3 窗口大小和搜索范围自适应算法

问题 2 中规定了窗口大小为 16×16 个像素，搜索范围限定为 64×64 个像素。对于不同地理位置、不同灰度值的云都使用相同大小的目标块和搜索块，这是不合理的。所以，需要设计一种自适应的方法，能够根据云的灰度值自动调整窗口大小和搜索范围，减少搜索时间，提高匹配速度，使得风矢场的度量更加高效、

准确。

5.3.1 窗口大小的调整

本文采用计算相对变化率的方法得到窗口大小，设计思想为：对于一个 $N \times N$ 的像素块，如果其中一部分区域 $m \times n$ 的灰度值集中在某一范围内，可以认为此区域的云是按照一致的风矢进行移动的，因此把此区域划分到同一窗口。如果在 $N \times N$ 的像素块中，存在着相邻两行或者两列的灰度值变化很大，可以认为对应位置的云向着不同方向移动，即风矢不同。

自动调整窗口大小的具体计算步骤如下：

(1)计算相对变化率矩阵。

先将所要度量风矢的经纬度转换到帧坐标中，对应坐标为 (x,y) ，将其扩展为 16×16 的像素块。对像素块中的每一行，若其纵坐标大于 y ，则计算后一列对前一列灰度值的相对变化率，并取其绝对值；若其纵坐标小于 y ，则计算前一列对后一列灰度值的相对变化率的绝对值。公式如下：

$$hd(a,b) = \begin{cases} \frac{huidu(a,b+1) - huidu(a,b)}{huidu(a,b)} & b > y \\ \frac{huidu(a,b-1) - huidu(a,b)}{huidu(a,b)} & b < y \end{cases} \quad (46)$$

同理，对于其中的每一列，若其横坐标大于 x ，则计算下一行对上一行灰度值的相对变化率，并取其绝对值；若其横坐标小于 x ，则计算上一行对下一行灰度值的相对变化率的绝对值。公式如下：

$$ld(a,b) = \begin{cases} \frac{huidu(a+1,b) - huidu(a,b)}{huidu(a,b)} & a > x \\ \frac{huidu(a-1,b) - huidu(a,b)}{huidu(a,b)} & a < x \end{cases} \quad (47)$$

(2)相对变化率位置的确定。

对于矩阵的每一行元素，以下图为例，若 (x,y) 左右两侧求得的相对变化率的绝对值最大点的坐标分别为 (i,m) 和 (j,n) ，说明第 i 行第 $m-1$ 列相对于第 i 行第 m 列的灰度值以及第 j 行第 $n+1$ 列相对于第 j 行第 n 列的灰度值变化率最大。

	(i	
	●	(j
		n)

图 8 $N \times N$ 像素块行的相对变化率计算图示

同理如下图，对于矩阵中的每一列元素，若 (x,y) 上下两侧求得相对变化率的绝对值最大点的坐标分别为 (p,r) 和 (q,s) ，说明第 $p-1$ 行第 r 列相对于第 p 行第 r 列的灰度值以及第 $q+1$ 行第 s 列相对于第 q 行第 s 列的灰度值变化率最大。

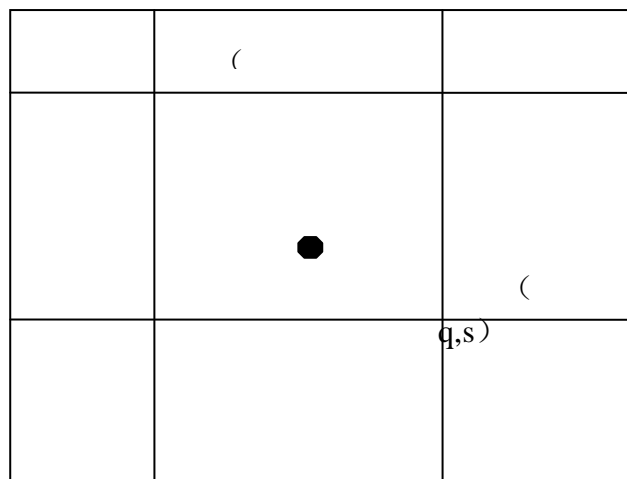


图 9 $N \times N$ 像素块列的相对变化率计算图示

(3)窗口大小的确定。

由步骤(2)可以得到相对变化率的绝对值最大的位置，进而得到窗口的大小。窗口取为相对变化率的绝对值最大位置的中间区域，即第 i 行、第 j 行、第 r 列和第 s 列所围成的区域，确定的窗口大小为 $(j-i) \times (s-r)$ 的像素块。

利用上述方法自适应调整窗口大小，搜索范围与第 2 问中的搜索范围相同，计算第 2 问所求范围的风矢。下表列出了几个要求点的风矢。由计算所得风矢反推 20:30 时刻目标块所对应的原始块，并计算原始块与目标块相关系数的均值为 0.4937。将其与第 2 问所得结果进行比较，可以看出：此方法针对不同灰度值的云，自动计算与之适合的窗口大小，预测所得 20:30 时刻云的灰度值与实际值的相关性更强，能够更加准确的进行风矢场的度量。

表 6 几个具体经纬度处的风矢（自适应窗口）

纬度	经度	角度（北顺）	速度（米/秒）
26	52	0	0
26	53	29.45	13.23
26	54	356.48	21.58
26	57	61.12	119.33
26	58	23.55	9.84

5.3.2 搜索范围的调整

本文采用运动估计搜索的动态调整算法确定搜索范围的大小，以减少待搜索

的点数，从而提高运动估计效率。设计思想为：由于物体运动的连续性，相邻像素块的运动情况也具有很强的相关性，所以可以利用相邻像素块的风矢来判断待预测像素块的风矢。如果相邻块的运动矢量较大，则当前块的运动矢量可能也较大。该算法利用了相邻块的运动矢量信息，动态确定搜索范围的大小^[6]。

为保证运动估计的准确性，应为其分配较多的搜索点，搜索窗口的尺寸应较大。反之，则使用较小的搜索窗口。但是该算法只能对搜索窗口进行粗略的预测。如果仅单一使用相邻块的运动矢量信息来对搜索窗口大小进行预测，势必使得预测的准确性大为降低。因此，有必要对影响搜索窗口大小的其他一些因素进行分析来对搜索窗口的预测策略进行进一步的优化^[7]，以便提高运动估计的效率。

自动调整搜索范围大小的具体计算步骤如下：

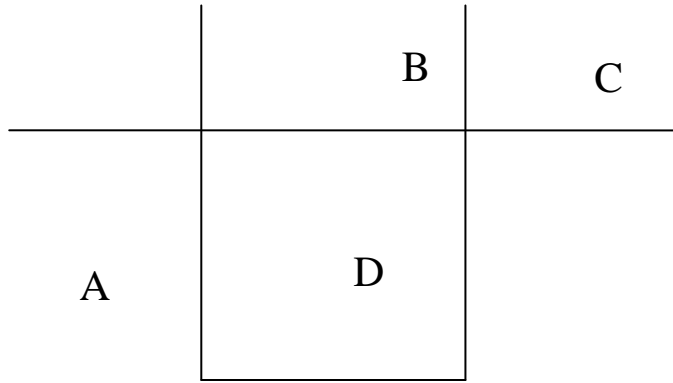


图 10 确定搜索范围的参考块

如图 10 所示，D 为当前待预测块，A、B、C 为其相邻已预测块，假设 A、B、C 所对应的运动向量分别为 (MV_A_x, MV_A_y) 、 (MV_B_x, MV_B_y) 、 (MV_C_x, MV_C_y) 表示搜索范围的初始值。研究表明^[8-9]，当前块的运动矢量与其左边、上边、右上块的运动矢量相关性较大，而与其他相邻块运动矢量的相关性较小，因此考虑使用这三个块的运动矢量来预测当前块的初始搜索范围。

若当前块的左边、上边、右上边的云矢未知，则先将搜索范围设定为 64×64 的像素块。若当前块的左边、上边、右上边的云矢已知，则算法如下：

(1)粗调

研究表明^[10-11]，运动向量的二阶矩能很好评价当前块相对参考块的运动程度。计算公式如下：

$$L_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n MV_{x_i}^2}{n}}, L_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n MV_{y_i}^2}{n}}, L = \max(L_x, L_y) \quad (48)$$

其中， n 为当前块附近的块数量，若当前块的相邻左边、上边、右上边块均为已知，则 n 为 3； MV_{x_i}, MV_{y_i} 分别为 MV 的 x 和 y 方向分量； L_x, L_y 分别为当前块 x 和 y 方向的运动分量大小。运动方向由当前块左边、上边、右上边三个块运动的矢量和确定。

(2)微调

当前块的周围块仍选择相关性最大的左边、上边和右上块，微调量的计算公式如下：

$$S_x = \left| \max MV_{x_i} - MV_{x_{middle}} \right| \quad (49)$$

$$S_y = \left| \max MV_{y_i} - MV_{y_{middle}} \right| \quad (50)$$

$$S = \max(S_x, S_y) \quad (51)$$

式中： $i=1, 2, 3$ ； $MV_{x_{middle}}$ 表示 3 个 MV_{x_i} 的中间值； $MV_{y_{middle}}$ 表示 3 个 MV_{y_i}

的中间值； S_x, S_y 分别表示 x, y 方向的运动分量。

(3)最终搜索范围的确定

搜索范围大小的确定方法是：

$$\begin{cases} W = L & S < L \\ W = S + 1 & S \geq L \end{cases} \quad (52)$$

将 W 按 L 的方向向两侧分别延长 $0.1W$ ，将 W 总长变为 $1.2W$ ，以 $1.2W$ 作为搜索范围像素块的对角线，则搜索范围变为 $0.85W \times 0.85W$ 的像素块。将当前块的中心在搜索范围内滑动，进行遍历搜索，寻找最优匹配块。

利用上述方法自适应调整搜索范围的大小，目标块仍取 16×16 个像素，计算第 2 问所求范围的风矢。由计算所得风矢反推 20:30 时刻目标块所对应的原始块，并计算原始块与目标块相关系数的均值。

若要对某一经纬度进行风矢的度量，首先利用相对变化率确定窗口大小，然后利用运动估计搜索的动态调整算法确定搜索范围大小，最后计算出各个点的风矢。

利用上述方法自适应调整窗口大小和搜索范围大小，计算第 2 问所求范围的风矢。由计算所得风矢反推 20:30 时刻所对应的原始块与目标块的相关系数。将所得相关系数的均值与第 2 问所得结果进行比较可以看出：该方法使得预测点更加靠近最优匹配点，使得搜索次数减少，搜索速度增加，又能避免搜索点陷入局部最优。

5.4 风矢量所在等压面模型

5.4.1 模型的建立

1) 确定灰度图像中某点处的气压层与温度对应关系向量

由视场转换模型可知，对于给定的经纬度，可以求得其在灰度图像中的对应点 $P(X_Z, Y_Z)$ 。本问首先建立了图像中灰度值与温度值的映射关系，将灰度图像中某点 $P(X_Z, Y_Z)$ 的灰度值转化为对应的温度值 K 。

有题意可知，在文件 temp3.txt 中任意气压层对应的为二维矩阵，同层矩阵行坐标 X_w 与纬度 W 的关系为：

$$X_w = \frac{(90-W)}{0.28125} + I \quad (53)$$

同层矩阵列坐标 Y_j 与经度 J 的关系为:

$$Y_j = \frac{J}{0.28125} + I \quad (54)$$

对于行列坐标中出先的小数, 按照四舍五入取整处理。

根据经纬度与气压矩阵中的行列对应关系式和视场转换模型, 我们可以得到灰度图像中某点 $P(X_z, Y_z)$ 所在位置的气压层与温度对应关系向量 W_h 。

2) 求解任意温度与气压层的映射关系

随机选取了 100 个点的对应关系向量 W_h 分析发现, 温度与所处气压层为非线性关系, 并且其相关函数不单调, 如图 11。通过对气压层和温度的曲线分析可以发现以下关系:

- 曲线最少存在一个极大值点和一个极小值点。
- 相邻经度和纬度处气压层与温度对应关系具有高度的相似性。

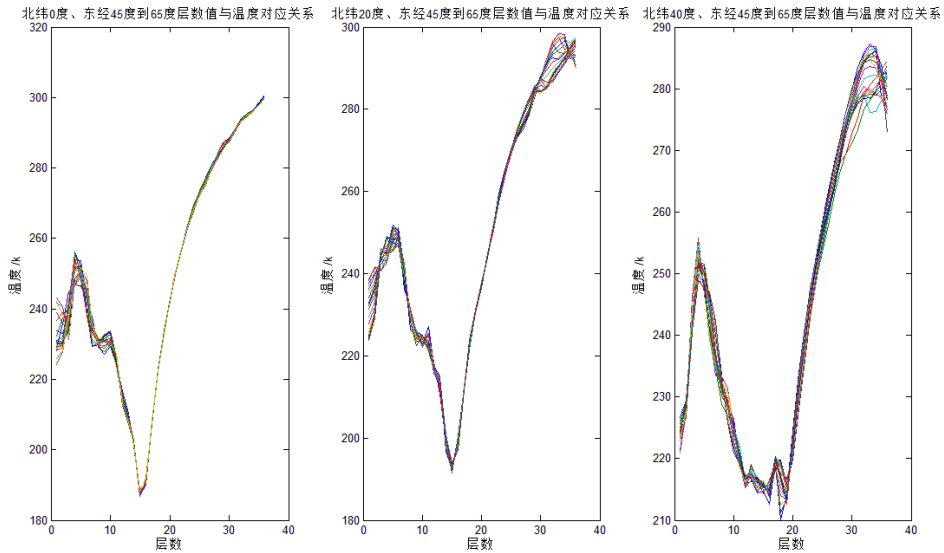


图 11 不同纬度、经度处层数与温度对应关系图

首先对曲线进行拟合处理, 由于曲线可能存在多个极值点, 故需要对曲线进行分段拟合。分段拟合规则如下:

- 自第一点开始值第一个极值点为第一曲线段, 第一极值点至第二极值点为第二曲线段, 以此类推, 最后一个极值点与最后一个点为第二曲线段, 各个曲线分别拟合。
- 若曲线线段内大于四个点, 则利用三次样条差值进行拟合^[5]; 若曲线段内有三个点, 则利用二次样条差值。如果只有两个点则按照线性处理。

根据以上规则对曲线拟合后, 就建立了温度与气压层的映射关系。分别利用各段的拟合函数, 就可以求出某个温度值多对应气压层。一个温度值可能对应多个气压层, 即依据上文给出的求解方法一个经纬度出可能对应数个气压层。

3) 求某点处的气压值的确定算法

本文将只有一个气压层解的点成为单值点,将有多多个气压层值的点称为多值点。根据曲线的分析规律可知,某点处所处的气压层与其周围点存在着一定的相关性,此点不能脱离周围点而孤立的存在^[12]。此外由图像分析可知,多值点的第一个值与最后一个值相差较大,且最后一个值与单值点的值相差相对较小。而多值点前两个值之间的差别不大。

由以上分析可知,若点为单值点,则点所在层数取此层数值即可。若此点为多值点,则点所取的层数值应尽可能与周围点相同。因而当点周围大部分为多值点时,取多值点的第一个值。当点周围大部分为单值点时,取多值点的最后一个点值。具体算法如下:

求解待求点 P 周围八个点的单复性,设单数点的总个数为 S_p ,若 $S_p \geq 7$,则此点的层数值直接去层数解中的最大值 C_{\max} 。若 $S_p < 7$,则继续进行步骤 ii。

1. 求出以待求点 P 为圆心的 8×8 的矩阵中所有点的单复性,将周围点非为八个有重叠部分的块,并将点根据其到 P 的距离分成三类点,如图 12 所示。依据以下公式计算出每个块的满值影响度和影响因素值以及影响系数:

$$N_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{此点为单值点且属于第 } k \text{ 个块} \\ 0 & \text{此点为复值点或不属于第 } k \text{ 个块} \end{cases} \quad (55)$$

其中 $i, j = 1, 2, 3; k = 1, 2, \dots, 8$

定义

$$M_k = 0.5 \times \sum_{j=1}^3 N_{1jk} + 0.3 \times \sum_{j=1}^3 N_{2jk} + 0.2 \times \sum_{j=1}^3 N_{3jk} \quad k = 1, 2, 3, \dots, 8 \quad (56)$$

当属于第 k 个块的点均为单值点时, M_k 达到最大值,设其定义为 M_{\max} 。块 K 的影响因素值为:

$$Q_{mk} = \frac{M_k}{M_{\max}} \quad (57)$$

2. 当 8 个块中影响因子大于 0.5 的块数大于等于 5 时,则此点的层数值直接去层数解中的最大值 C_{\max} 。否则此点的层值取层值解中的值最小值。至此也就求出了 P 对应的气压层 C 。

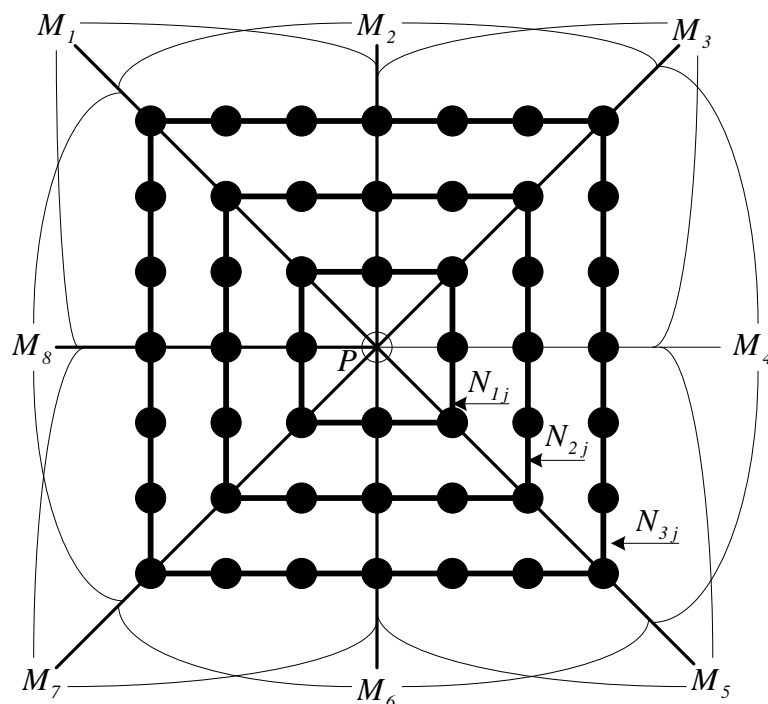


图 12 p 点周围点的类型及区域划分示意图

4) 由气压层到压强的对应关系求解

题目中给出了气压层与压强对应关系的向量 y_q 。以气压层为自变量，压强为因变量，利用三次样条方法求出气压层与压强的函数关系。

将 C 带入到函数关系中，也就得到了灰度图像中某点 $P(X_z, Y_z)$ 对应的大气压强值 y_q ，经纬度与大气压强值的对应关系。

5.4.2 模型的求解

由以上建立的风矢量等压面模型计算可得在给经纬度处的大气压强数值，结果表 7 所示。

利用所建立的风矢等压面模型，编制了计算程序,按照题目要求，给出了北纬 40 度到南纬 40 度，东经 46 度到东经 126 度范围内全部风矢所在位置处的压强。结合问题二中的计算，按照题目二要求的格式将结果存入了文件 winsh.txt 中。

表 7 给定经纬度处大气压强值

经纬度 (W, J)	(26,52)	(26,53)	(26,54)	(26,57)	(26,58)
压强值 P_a (毫巴)	955.47	886.95	796.58	511.92	787.86

6.结果分析

6.1 结果分析

问题 2 中，先对数据进行了预处理，去除了噪点，增强了图像对比度，建立

了基于灰度值相关系数的风矢场度量模型，以交叉相关系数作为比较的指标，将搜索范围内与目标像素块具有最大相关系数的区域作为匹配块。相关系数较大的像素块可以达到高于 0.9 的相关性，可见用这种方法可以得到比较准确的匹配块。由目标块和匹配块之间的相对位置可以得到风矢的方向，由椭球面上两点之间的距离公式可以得到风矢的大小，从而画出要求范围的风矢场。从图中云的分布可以看出，所得到的结果符合实际情况，具有较强的准确性。

本文又尝试了 3 种方法对上述模型进行改进。结果表明，三次样条插值法计算过程比较复杂，计算时间最长，不适合广泛工程应用；差商法比三次样条插值法的程序简单，计算时间与基于灰度值相关系数的风矢场度量模型相差不多，计算所得结果相关性更强，实现了对上述模型的优化；整体局部匹配算法的计算时间是上述方法的 5 倍，而且优化的效果不明显。综上所述，差商法对上述模型的优化效果最好，程序实现简单，计算速度快，具有较强的实用性。

在问题 3 中，提出了基于相对变化率的特征值提取算法，目标点的边界取为具有最大相对变化率的位置，根据云的分布特点动态调整窗口的大小，从而减少了寻找匹配块过程的计算量，减少了计算时间。与问题 2 所得结果进行比较，可以看出，动态调整窗口大小可以提高目标块和匹配块的相关性。对于搜索范围的大小，根据相邻块的运动矢量确定目标块的运动矢量，从而调整相应搜索范围，减少了搜索时间，提高了匹配速度。相对于固定窗口和固定搜索范围的风矢场的度量来说，具有更好的实用性。

6.2 模型评价：

6.2.1 模型优点：

问题 2 中，在建模之前先对数据进行了预处理，减少了噪点，增强了图像对比度，从而减小了后面的计算误差，方便对图像的观测和对结果的验证。在基于灰度值相关系数的风矢场度量模型上，提出了 3 种新的方法，将几种方法的风矢计算结果进行对比，分析了各自的优缺点，对工程应用具有一定的参考价值。

问题 3 中，提出了新的自适应调整窗口和搜索范围的方法，从而可以使得不同分布的云具有各自最优的风矢确定过程，减少搜索时间，提高效率。

6.2.2 模型缺点：

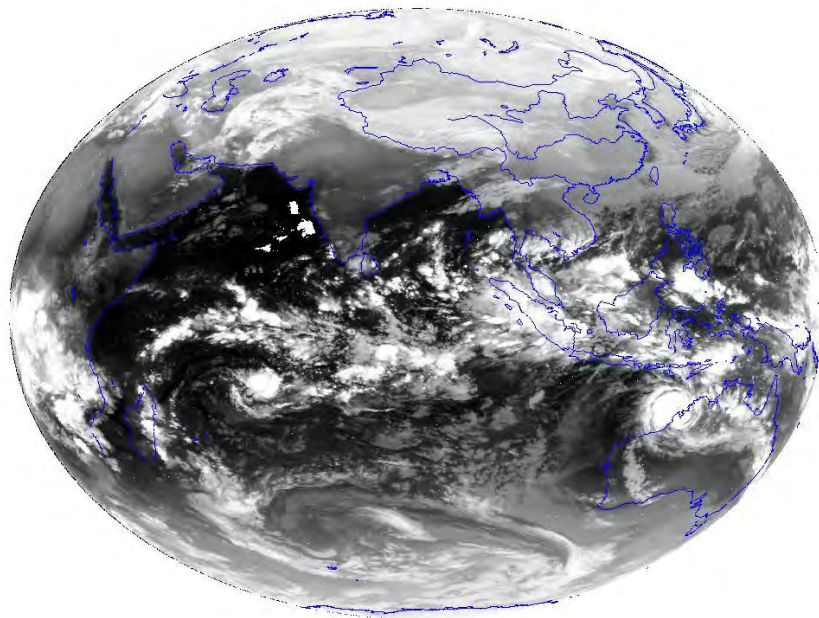
问题 2 中，在原来模型的基础上提出了 3 种新方法，但是几种方法的优化效果不是很明显，没有实现较大提高。

参考文献

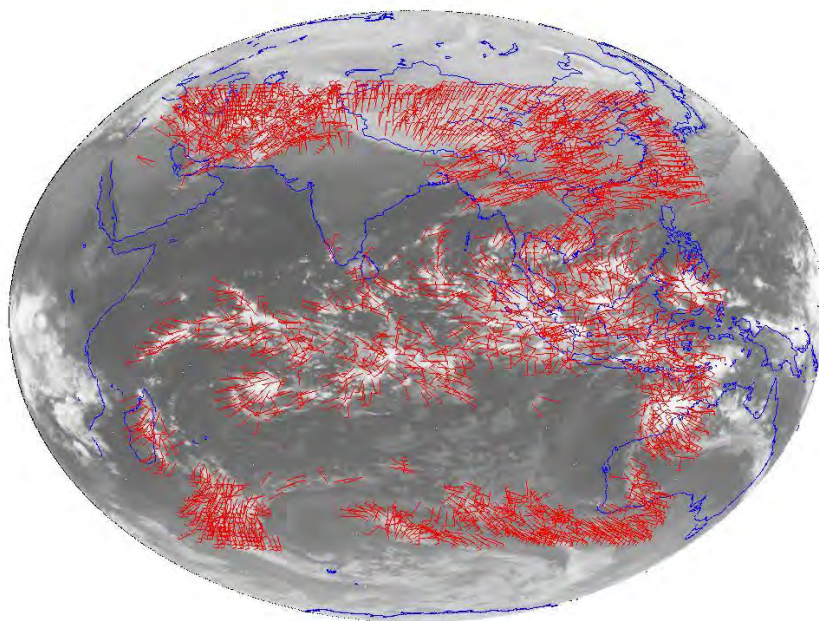
- [1] 龙智勇, 石汉青, 黄思训. 利用卫星云图反演云导风的新思路[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 1-6.
- [2] 桑智明. 几种基于灰度的图像匹配算法研究[D]. 南开大学, 2011.
- [3] 李新, 乔爱民. 三次样条插值在称重仪表误差补偿中的应用[J]. 电子设计工程, 2011, 19(11): 48-53.
- [4] 许健民, 张其松, 王大昌, 樊昌尧. 云迹风计算中的两个几何问题[J]. 应用气象学报, 1997, 8(1): 11-18.
- [5] 陈文略, 王子羊. 三次样条插值在工程拟合中的应用[J]. 华中师范大学学报, 2004, 38(4): 418-422.
- [6] 鲁小兵, 肖创柏. H.264 运动估计搜索窗口的动态调整算法[J]. 图像图形技术研究与应用, 2009: 40-45.
- [7] 赵永利, 陈进成, 马健, 朱宝忠, 张杰. 基于块特性与自适应搜索窗口的运动估计算法[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(3): 273-277.
- [8] 刘正光, 林孔元, 郭爱民, 程彦. 卫星云图形态特征提取[J]. 计算机研究与发展, 1997, 34(9): 689-693.
- [9] 沈伟, 王军政, 张宇河. 自适应窗宽的均值迁移图像跟踪算法[J]. 微计算机信息, 2007, 23(10): 294-296.
- [10] 白洁, 王洪庆, 陶祖钰. GMS 卫星红外云图云迹风的反演[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(1): 85-91.
- [11] 杨元喜, 徐天河. 基于移动开窗法协方差估计和方差分量估计的自适应滤波[J]. 武汉大学学报, 2003, 28(6): 714-718.
- [12] 黄磊. 基于图像匹配和模式识别技术的卫星资料应用[D]. 北京大学, 2007.

附件

附件 1 直方图均衡法处理后的卫星云图



附件 2 相关系数模型计算风矢量图



附件 3 差商优化模型计算风矢量图

