

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



题 目 基于卫星云图的风矢场度量模型与算法探讨（D 题）

摘 要：

云导风矢量是描述示踪云运动向量，根据云移动情况，在一定程度上反映风场的度量。风矢量可通过对具有一定时间间隔的两幅相关卫星云图分析获得。

本模型问题一中海岸线的数据值并不是与圆锥投影坐标系中的坐标值一一对应的，因此需要进行坐标转换的工作。本文采用解析几何的方式求解出海岸线经纬度坐标对应圆锥投影系中的坐标值，并通过画图的方式将卫星云图灰度图与海岸线坐标结合。

本模型问题二中云块的识别本质上是图像模板匹配问题，本文采用的主算法为交叉相关系数法。针对实际情况中可能出现的匹配多峰值问题，提出改进交叉相关系数法，主要是通过甄别判定方式实现的：选取最优的前 $\alpha\%$ 个点，采取距离标准差方式，生成权重向量，匹配的结果由加权平均的方式获得。

本模型问题三中需要解决的是模板匹配的精度问题，在传统算法中，是在固定窗口大小和搜索范围内，对云迹风进行模板匹配识别。其存在着以下几个问题：1.搜索范围可能不满足云快速变化的趋势，导致匹配结果错误；2.对于不同的云，需要的窗口大小并不一致，有效的自适应算法可以减少计算复杂度。在此情况下，本文提出了自适应调整窗口大小和搜索范围算法模型。当获得风矢集合以后，需要采用质量控制的方法对上述求得的原始云迹风场进行优化，目的在于剔除不满足风场时空连续性和风矢唯一性要求的劣质风矢，以提高输出的云迹风场的质量，并达到优化效果目的。

本模型问题四主要是通过灰度值与压强值的对应关系找出风矢所在的等压线，本文提出了映射的流程，可以有效的通过灰度值获得压强值。

关键词：云导风， 模板匹配， 自适应， 质量控制， 交叉相关系数

目 录

背 景.....	- 1 -
一、问题的提出.....	- 1 -
二、模型假设.....	- 1 -
三、变量设定.....	- 2 -
四、模型建立与求解.....	- 2 -
4.1 问题 1 的解决.....	- 2 -
4.1.1 对问题 1 的分析.....	- 2 -
4.1.2 矩阵形式的经纬度坐标求解.....	- 2 -
4.1.3 灰度矩阵转化为卫星云图及其海岸线的添加求解.....	- 4 -
4.2 问题 2 的解决.....	- 5 -
4.2.1 对问题 2 的分析.....	- 5 -
4.2.2 云迹风匹配识别的问题解决.....	- 5 -
4.2.3 云迹风匹配识别的改进算法.....	- 7 -
4.2.4 风矢方向的确定.....	- 8 -
4.2.5 风矢大小的确定.....	- 9 -
4.2.6 非零风矢的确定.....	- 11 -
4.3 问题 3 的解决.....	- 12 -
4.3.1 对问题 3 的分析.....	- 12 -
4.3.2 窗口大小的自适应.....	- 13 -
4.3.3 搜索范围的自适应.....	- 14 -
4.4 问题 4 的解决.....	- 17 -
4.4.1 对问题 4 的分析.....	- 17 -
4.4.2 灰度与压强值的换算流程.....	- 17 -
4.4.3 标有风矢的卫星云图的绘制.....	- 17 -
模型优缺点及其改进.....	- 18 -
参考文献.....	- 19 -

基于卫星云图的风矢场度量模型与算法探讨

背景

云导风 (Cloud Motion Wind, CMW) 是利用相隔一定时间的卫星云图来计算云系内局部云团的运动矢量, 并以此作为云团周围云场的估计。云图时间间隔越短适合于计算云迹风的示踪云就越多, 就越能得到信息量大、质量高的云迹风场^[1]。台风是严重影响人类生产生活的灾害性天气之一, 以云的形式提供较多的天气变化信息, 有利于提高对天气系统的诊断分析和判断。同时, 云的变化和移动也为云导风处理提供了可用的资料库。从云的运动推导风, 主要是通过连续几幅图像上的云进行跟踪, 然后计算在这几幅图观测时间内, 云移动的距离和方向。云迹风能清楚生动地显示天气系统发展变化的细节, 在数值天气分析和预报中具有广泛应用前景, 对暴雨落区分析及预测、台风的影响范围以及移向预报等方面有重要的指示意义。

一、问题的提出

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。云迹风是用云块的运动矢量所定义的风矢, 在一定程度上, 能够很好的描述风矢场。在给定的卫星灰度云图数据及其特点、云块大小和窗口大小等限制或者不限制的条件下, 尽可能的准确地描述实际风矢场的度量模型和算法, 是我们需要解决的问题。针对本次竞赛所给出的几个问题, 在本文中我们提出了可以自适应描述云块大小的方法去计算风矢的方法和模型。具体内容如下:

(1) 首先需要完成的是根据同步卫星反馈的灰度值换算视场坐标。即根据卫星的步进角和行扫描角大小, 建立确定每个灰度值所对应的经纬度的数学模型。进而将灰度矩阵转换成为带有海岸线的卫星云图, 从而为后面风矢确定等问题奠定基础。

(2) 根据窗口大小和搜索范围的限制, 通过建立模型, 考虑描述云块的特征参数, 采用交叉相关系数算法 (CC 算法), 计算云迹风矢。

(3) 在取消问题 2 的窗口大小和搜索范围限定的基础上, 提出自适应改变描述云块窗口大小的算法。

(4) 基于问题 3 所提出的方法, 从自适应改变窗口大小和搜索范围大小的角度, 以数据为支撑与问题 2 对比分析问题 3 方法的优劣。最后对云图数据量和云导风风矢场计算研究提出建议。

(5) 由灰度、温度和压强三者之间的关系, 描述出等压面。

二、模型假设

1、地球视为理想椭球, 理想椭球由地球的一个经过南北极的椭圆截面绕南北极连线旋转而得到, 椭圆截面的长半轴 (赤道半径) = 6378136.5m, 短半轴 (极半径) = 6356751.8m;

2、地球同步卫星上的红外探测器探测地球上空的温度数据是以成灰度数据格式保存的。灰度数据与温度数据有对应关系, 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；

3、云块的移动可以表征风速的变化,称为风矢。风矢的大小和方向可由云块移动的速度决定。在计算云块风矢大小时,风矢的椭球表面弧长近似等效成以赤道半径和极半径的平均值为半径的球面弧长,构造椭球与球的等效模型。

三、变量设定

R 、 r : 赤道半径、极半径;

L : 同步卫星与地球球心之间的距离;

Δ : 步进角和行扫描角的采样角度;

A: 灰度矩阵元素对应的经度矩阵:

B : 灰度矩阵元素对应的纬度矩阵;

「 F F」: 表示风速分别为每秒 0 至 20 米, 20 至 40 米, 40 米以上的风矢。

四、模型建立与求解

4.1 问题 1 的解决

4.1.1 对问题 1 的分析

要解决经纬度的问题，首先是在地球的椭球模型中建立空间直角坐标系，找到求解参考点 M 经纬度的一般表达式，以及参考点 M 在灰度矩阵的对应关系和对称关系。从而可得 2288×2288 的两个矩阵，即经度矩阵 A 和纬度矩阵 B 。进而得到问题 1 中要求的文本文件“jwd.txt”和第 500 行和第 500、501、502 列三个交叉点处对应的经纬度。卫星云图的描绘可直接通过 matlab 直接描绘出来，而添加海岸线则运用查找方式，找出每个点对应到灰度矩阵中的行列即可。

4.1.2 矩阵形式的经纬度坐标求解

因题目背景假设地球为理想的椭球体,所以南北纬,东西经都具有对称性,只用讨论一部分。我们以星下点经度($E86.5^{\circ}$)所在的子午面为坐标系 xoz 平面,赤道平面为坐标系的 xoy 面。其中由地球球心指向同步卫星方向为 x 轴方向,垂直于 x 轴并指向北极方向为 z 轴方向,用右手定则确定 y 轴方向。 P 点为卫星位置, OA 、 OB 分别为赤道于 x 轴和 y 轴交点且长度等于赤道半径 R , OC 为地球与 z 轴交点且长度等于极半径 r ,具体如图 1 所示。所以本文讨论如图建立的空间直角坐标系的第一卦限(即 x,y,z 均为正值象限),其余三部分采取对称映射的方式获取。

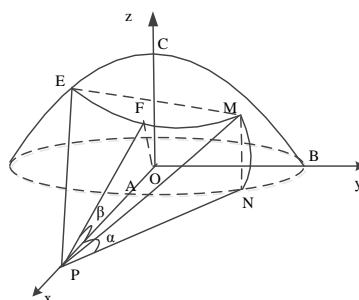


图 1 空间直角坐标系

假设在 t 时刻，同步卫星从星下点开始经过由西向东 i ($0 \leq i \leq 1144$) 个步进角、由南向东 j ($0 \leq j \leq 1144$) 个步进角之后， i, j 均为整数。探测到椭球面 M 点时。由此可知图中面 $PMN \perp$ 面 xoy ，面 $PME \perp$ 面 xoz ，存在点 F 使得面 $PFO \perp$ 面 xoy 。

假设步进角为 Δ ，则图中 $\alpha = i \cdot \Delta, \beta = j \cdot \Delta$ 。 β 为该时刻同步卫星扫描在南北方向的扫描角度； α 为该时刻同步卫星扫描在东西方向的扫描角度，为 Δ 的整数倍；因为星下点的行列值为 (1145, 1145)，所以通过 i, j 我们可以将 M 点对应灰度矩阵中的行列值 (l_M, c_M)。具体对应如下：

$$\text{行值} = l_M = \begin{cases} 1145+j, & \text{向南方向扫面}j\text{步} \\ 1145-j, & \text{向北方向扫面}j\text{步} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{列值} = c_M = \begin{cases} 1145+i, & \text{向东方向扫面}i\text{步} \\ 1145-i, & \text{向西方向扫面}i\text{步} \end{cases} \quad (2)$$

扫描点 M 的经度和纬度还存在如下对称关系：

经度值：

$$M_{\text{jingdu}}(1145+i, 1145 \pm j) = M_{\text{jingdu}}(1145-i, 1145 \pm j), \quad 0 \leq i \leq 1143, 0 \leq j \leq 1144 \quad (3)$$

纬度值（纬度用“+”表示北纬，“-”表示南纬）：

$$M_{\text{weidu}}(1145 \pm i, 1145+j) = -M_{\text{weidu}}(1145 \pm i, 1145-j), \quad 0 \leq i \leq 1144, 0 \leq j \leq 1143 \quad (4)$$

根据前面所述可得椭球面方程：

$$\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{R^2} + \frac{z^2}{r^2} = 1 \quad (5)$$

由点法式可得到面 PMN 和面 PME 的表达式：

$$\sin \alpha \cdot (x - x_p) + \cos \alpha \cdot y = 0 \quad (6)$$

$$\sin \beta \cdot (x - x_p) + \cos \beta \cdot z = 0 \quad (7)$$

由 (5) (6) (7) 三式可以解得两组 x, y, z 解。由立体几何关系我们取较大 x 的那组解为我们所真实观察到的 M 点的坐标值。因为当同步卫星扫描面与椭球面没有交点的情况是存在的，所以当出现复数解时应该都不取或者令成无穷大。当解出扫描点坐标时，用 matlab 中“ $lla = \text{ecf2lla}([x \ y \ z])$ ”函数返回经纬度值。

需要补充说明的是，坐标系中 xoy 平面是东经 86.5° 度子午面，所以上述返回的经度都在东经范围内，如果在 xoy 平面往 y 轴方向扫描的话那就需要加上 86.5° 。相反，如果是在 xoy 平面往 y 轴反方向扫描的话那就需要用 86.5° 减去返回值，纬度则直接等于返回的纬度值。通过对称性关系 (3) (4)，这样就可以得到灰度矩阵 2288×2288 对应的 2288×2288 的经度矩阵 A ，纬度矩阵 B 。然后从中取出第 451 行至 550 行，第 451 列至 550 列，即为问题要求的文本文件“jwd.txt”。灰度矩阵中的第 451 行至 550 行，第 451 列至 550 列其他经纬度，见“jwd.txt”文件。

其中第 500 行和第 500、501、502 列三个交叉点处对应的经纬度如下表 1 所示：

表1：第500行和第500、501、502列三个交叉点处对应的经纬度

	(经度, 纬度)
(500, 500)	(E46.48514280 , N32.91577485)
(500, 501)	(E46.52583799 , N32.85290328)
(500, 502)	(E46.56632560 , N32.79011238)

4.1.3 灰度矩阵转化为卫星云图及其海岸线的添加求解

用 matlab 描绘出 IR1_2100.mat 的卫星云图，如图 2 所示：

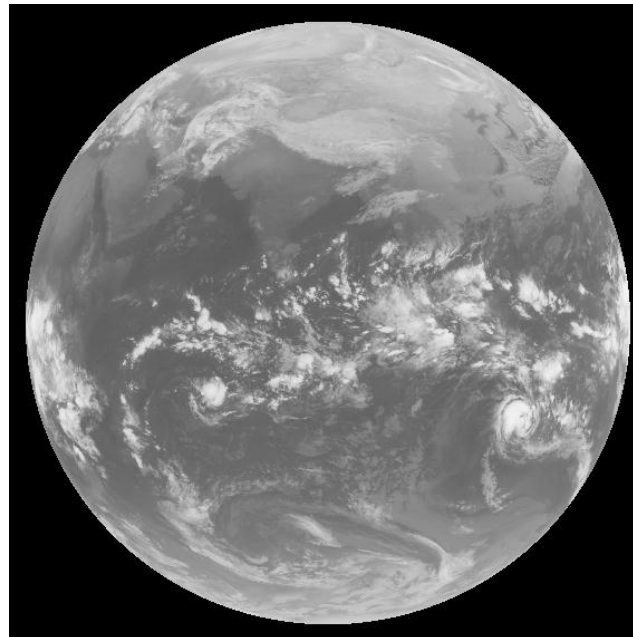


图 2 不加海岸线的卫星云图

将海岸线的经纬度在经度矩阵 A 和纬度矩阵 B 中,由前面分析可知经纬度与图像行列位置的关系，因此可进行全局查找来确定该海岸线在灰度矩阵中的行列值从而在上述的卫星云图上面添加海岸线。

假设某一海岸线的经纬度为 (x_1, y_1) ，经度矩阵 A 中的经度值为 x_0 ，纬度矩阵 B 中的纬度值为 y_0 （注：查找的时候矩阵 A 和矩阵 B 中的 x_0 和 y_0 在两矩阵的行列值对应相等）。那么查找到最佳值 (x_0^*, y_0^*) 的判决条件为：

$$(x_0^*, y_0^*) = \min(|x_1 - x_0| + |y_1 - y_0|) \quad (8)$$

由得到的最佳值 (x_0^*, y_0^*) 可对应得到灰度矩阵中的行列值，这样也可将海岸线在上图中加上。具体如图 3 所示。

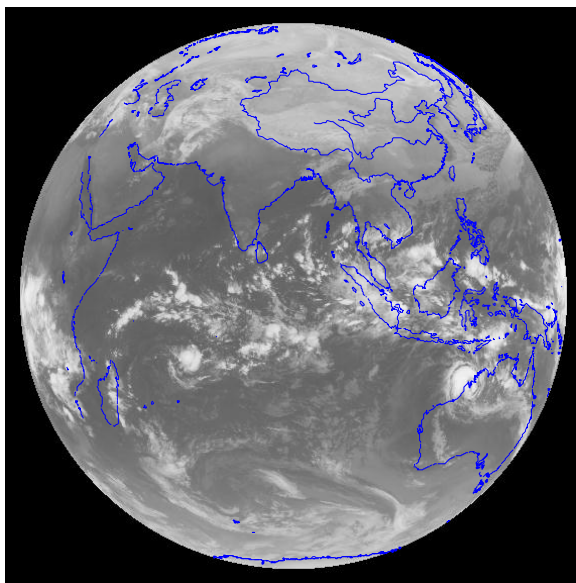


图 3 加海岸线后的卫星云图

4.2 问题 2 的解决

4.2.1 对问题 2 的分析

计算 30min 间隔云图序列所得的云迹风已被证明对天气分析和预报，尤其是对探测资料稀少的高原、海洋、沙漠地区有着积极的作用[4]。精确的识别云迹风是解决风矢大小和风向的首要问题，采用模板匹配识别是重要的解决手段。但在像素块匹配过程中窗口的大小决定了能否很好的描述云迹风的特征，窗口过小不能准确描述云迹风；窗口过大，虽然能很好表征云迹风但是运算量过大。与之类似，搜索范围也决定了搜索的精确度和运算量。而在题目 2 中给定了窗口和搜索空间的大小，不需要我们对窗口及搜索空间进行调整。

关于风矢参数的求解。根据题目要求，需要确定的风矢参数有 4 个：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）。经过经纬度与灰度矩阵行列坐标的映射，可以得待求风矢在灰度矩阵中的行列坐标位置，经过匹配计算，可以算出 30min 间隔之前与之后的风矢灰度坐标及对应的经纬度；风矢的方向可由“靶云”在 30min 间隔的行列坐标位置移动计算得到；建立空间直角坐标系求解“靶云”30min 间隔的椭球面弧长，以此可获得风矢大小。

关于零风矢的判决。根据材料说明，零风矢定义为“没有云或云块不稳定处的风矢”。可以设定相应的标准来判定云的有无以及云块的稳定性，进而判断某风矢是否为零风矢。零风矢的数目与所取的判决阈值有关。

4.2.2 云迹风匹配识别的问题解决

风矢的大小和方向由云块移动的速度决定。可通过对具有一定时间间隔的两幅相关卫星云图进行模板匹配而得出。模板匹配就是根据已知模式的图像在一幅陌生图像中寻找对应于该模式的子图像的过程。

由于云的运动可以看成是一种半流体的运动，而判断风矢的主要参考对象为云的移动。云图的匹配是一种非精确的匹配问题，根据当前的研究情况，主要的云图匹配算法有以下三种：绝对值法，序列相似性检测算法（SSDA 算法）和交叉相关系数法。

1. 绝对值法

设定

$$D(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m, n) - T(m, n)]^2 \quad (9)$$

或者

$$D(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |S^{i,j}(m, n) - T(m, n)| \quad (10)$$

上式中 $S^{i,j}(m, n)$ 是被探测的目标区, $T(m, n)$ 是模板, $D(i, j)$ 为目标区上没一点与模板上的累计差值测度。若 $D(i, j) < L_d(i, j)$ (阈值) 或在搜索区域内寻找 $D(i, j)$ 的最大值所对应的 (i, j) , 即认为在坐标 (i, j) 上模板匹配成功。

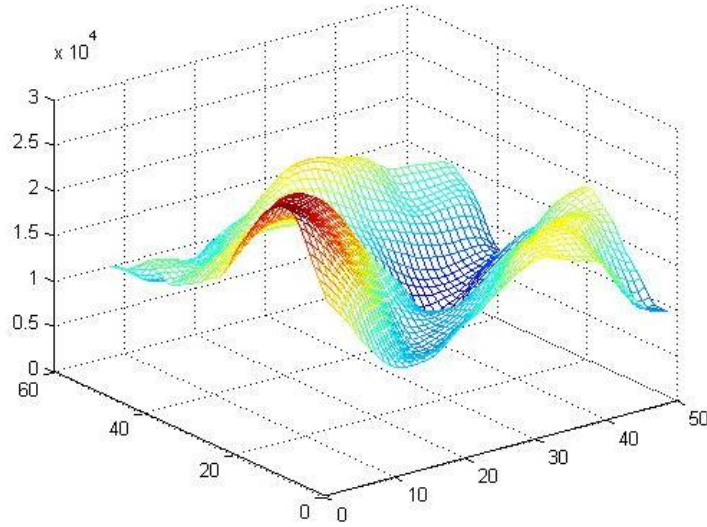


图 4 绝对值法在搜索空间内的匹配度

2. 序列相似性检测算法 (SSDA)

(1) 定义绝对值误差值

$$\varepsilon(i, j, m_k, n_k) = |S^{i,j}(m_k, n_k) - \bar{S}(i, j) - T(m_k, n_k) + \bar{T}| \quad (11)$$

(2) 取阈值 T_k 。在子图 $S^{i,j}(m, n)$ 中随机选取像点, 计算它与 T 中对应的点的误差值 ε , 将所有点的差值累加起来。若累积误差超过 T_k , 停止累加, 并记下累加次数 γ 。定义 SSDA 的检测曲面为:

$$I(i, j) = \{r \mid \min_{1 \leq r \leq m^2} [\sum_{k=1}^r \varepsilon(i, j, m_k, n_k) \geq T_k]\} \quad (12)$$

(3) 把 $I(i, j)$ 值大的 (i, j) 点作为匹配点, 因为此点需要很多次累加才使总误差 $\sum \varepsilon$ 超过 T_k , 它最可能是匹配的像素点。

3. 交叉相关系数法

定义交叉相关系数如下, 其中 CC 为中心距相关系数, OC 为原点距相关系数:

$$CC(i, j, m, n) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M (S^{i,j}(m, n) - \bar{S}^{i,j}) \times (T(m, n) - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M (S^{i,j}(m, n) - \bar{S}^{i,j})^2 \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M (T(m, n) - \bar{T})^2}} \quad (13)$$

$$OC(i, j, m, n) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M S^{i,j}(m, n) \times T(m, n)}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M (S^{i,j}(m, n) - \bar{S}^{i,j})^2 \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M (T(m, n) - \bar{T})^2}} \quad (14)$$

其中 s_0 和 s_1 分别表示不同时刻获得的云图上相互比较的两个模块内的像素强度矩阵； \bar{s}_0 和 \bar{s}_1 分别表示模块内的像素平均强度；

据参考文献[2]的分析，CC 与 OC 在作用上并无优劣之分，只是从不同角度反映了模块内的图像变化信息，因此在本文中选取 CC 算法作为主算法予以实现。

根据文献[3]中所述和仿真结果表明，这三种方法的各自特点如下：

- (1) 绝对值匹配法计算量小，速度快，但是得到的风矢杂乱，风场连续性效果最差，因此不考虑采用为主方法。
- (2) SSDA 匹配法计算的云导风风场连续性效果相对有所改善，计算速度快，但是效果仍然不是最优的。
- (3) 交叉相关匹配法是目前计算云导风矢量的主流算法，计算得出的云导风连续性效果在此三种算法中为最优。虽然运算速度稍慢，但考虑精度因素，本文主要采用此方法。

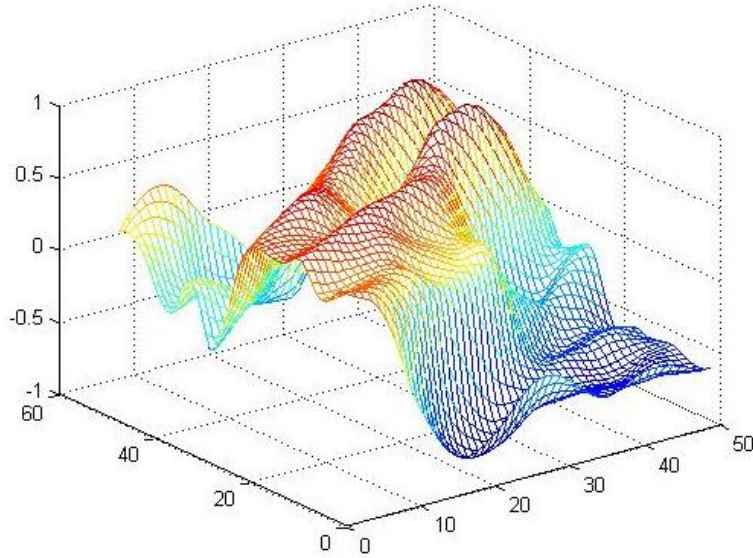


图5 交叉相关系数法在搜索空间内的匹配度

4.2.3 云迹风匹配识别的改进算法

通过对上述几种算法的讨论和数据分析，我们在效果最好的交叉相关匹配法基础上进行改进，并同交叉相关匹配法进行性能比对。考虑到在搜索模板空间内进行某次搜索时，追踪模块获得的相关系数值 CC 可能不够理想，并且周围存在多个临近的较优峰值，如果直接选取最优点作为匹配的返回值，这样极有可能因为测量或噪声等误差导致返回的最优匹配值并不在真实的匹配值上，针

对这样情况，我们提出了如下的匹配算法流程进行甄别和改进：

(1) 由交叉相关匹配法和窗口选定规则获得搜索模板内的一组 CC 值（中心矩相关系数）的集合，构成曲面 Ω 。

(2) 找出最优匹配值，如图所示 5，如果最优匹配值大于设定阈值 $MATCH_{th}$ ，在匹配值空间曲面上显示为比较高的山峰，则表示此匹配值应该为搜索空间内最优点，即 $(x_i, y_i) = \arg\max \Omega$ 可以直接选取。

(3) 如果最优匹配值小于初始判定阈值 $MATCH_{th}$ ，在匹配值空间曲面上显示在阈值以下的多个山峰 $P_1, P_2 \dots P_N$ ，则选取前 $\alpha\%$ 作为候选集合 C ，在集合 C 内获得 $P_1, P_2 \dots P_N$ 的坐标值 $C(x_i, y_i)$ ，计算每个坐标值在集合 C 内的标准差值 $\varepsilon = \sqrt{(x_i - x_{average})^2 + (y_i - y_{average})^2}$ 及匹配度 $M_1, M_2 \dots M_N$ ，如果标准差大于标准差阈值 $ERROR_{th}$ 或匹配度小于存活阈值 $EXIST_{th}$ ，则剔除该坐标值，最终剩余 $M (M \leq N)$ 个峰值 $P_1, P_2 \dots P_M$ ，根据以上判定条件，最后剩余的 $P_1, P_2 \dots P_M$ 应该在坐标上较为集中，并且匹配度也在可接受范围之内。

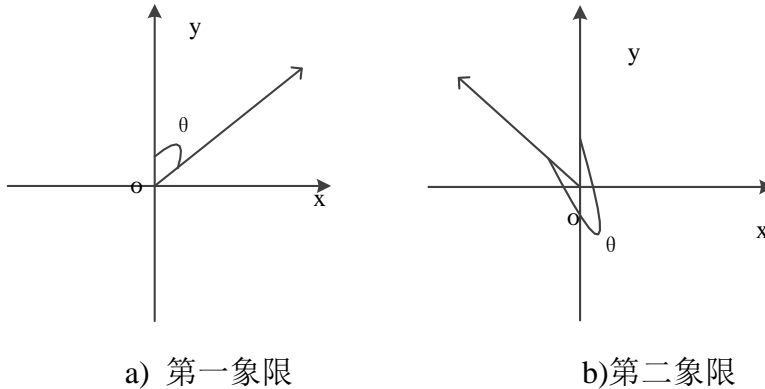
(4) 采用加权平均法，综合考虑 $P_1, P_2 \dots P_M$ 的影响，返回最优匹配值 (x_{match}, y_{match}) ，计算公式如下：

$$\omega x_{i,j} = \varepsilon x_{i,j} / \sum \varepsilon x_{i,j}, \quad \omega y_{i,j} = \varepsilon y_{i,j} / \sum \varepsilon y_{i,j} \quad (15)$$

$$x_{match} = \sum x_{i,j} \omega x_{i,j}, \quad y_{match} = \sum y_{i,j} \omega y_{i,j} \quad (16)$$

4.2.4 风矢方向的确定

由上述过程可以得到在 21:30 与 21:00 匹配的云，即示踪云。假设在 21:00 时候示踪云在灰度矩阵中的对应行列为 $M(x_M, y_M)$ ，在示踪云在灰度矩阵中的对应行列为 $N(x_N, y_N)$ 。可建立平面直角坐标系：以北极为 y 轴， \overrightarrow{MN} 和 y 轴所在平面内垂直于 y 轴建立 x 轴。 θ 为 \overrightarrow{MN} 与 y 轴夹角（北顺角）。由此该 \overrightarrow{MN} 的可以映射得到 y 轴上 $(\overrightarrow{MN} \parallel \vec{y})$ ，x 轴上 $(\overrightarrow{MN} \parallel \vec{x})$ ，原点 $(\overrightarrow{MN} \parallel \vec{x} \text{ 且 } \overrightarrow{MN} \parallel \vec{y})$ 和如下四种情况：



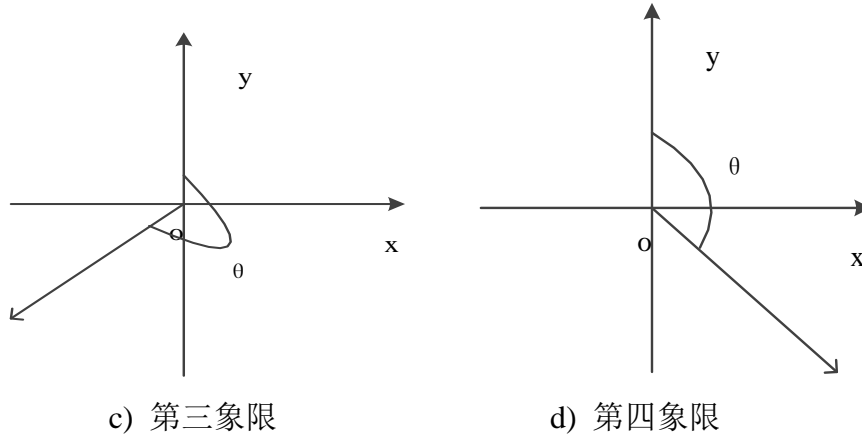


图 6 \overrightarrow{MN} 映射的四种情况

- (1) 如果 $y_N=y_M, x_M > x_N$ 时, x 负半轴上, $\theta=3\pi/2$;
- (2) 如果 $y_N=y_M, x_M < x_N$ 时, x 正半轴上, $\theta=\pi/2$;
- (3) 如果 $y_N=y_M, x_M=x_N$ 时, 原点, $\theta=0$;
- (4) 如果 $y_N>y_M, x_N \geq x_M$ 时, 第一象限和 y 正半轴上, $\theta=\arctan \frac{x_N-x_M}{y_N-y_M}$;
- (5) 如果 $y_N>y_M, x_N < x_M$ 时, 第二象限, $\theta=2\pi+\arctan \frac{x_N-x_M}{y_N-y_M}$;
- (6) 其他, 第三、四象限以及 y 负半轴上, $\theta=\pi+\arctan \frac{x_N-x_M}{y_N-y_M}$.

由以上各式可以得到各个风矢的方向角。

4.2.5 风矢大小的确定

风矢大小由云迹风在30min中内移动的椭球弧长决定, 求出弧长除以时间间隔30min就能近似确定风矢大小。鉴于30min内风移动的距离较短, 对应圆心角比较小, 地球赤道半径和极半径又近似相等, 所以椭球较近两点间的弧度值近视等于球体的弧长。因此在计算云迹风移动的弧长时, 我们将用球面弧长等效于所求距离, 且假设球面半径为赤道半径与极半径的平均值, 即:

$$l=\frac{R+r}{2} \quad (17)$$

假设云迹风从M点移动到N点, 其中M的经纬度为 (λ_M, β) , N的经纬度为 (λ_N, α) , 会存在两种情况, 如图中所示, 情况一为两点都在同一半球, 情况二为两点在不同半球。

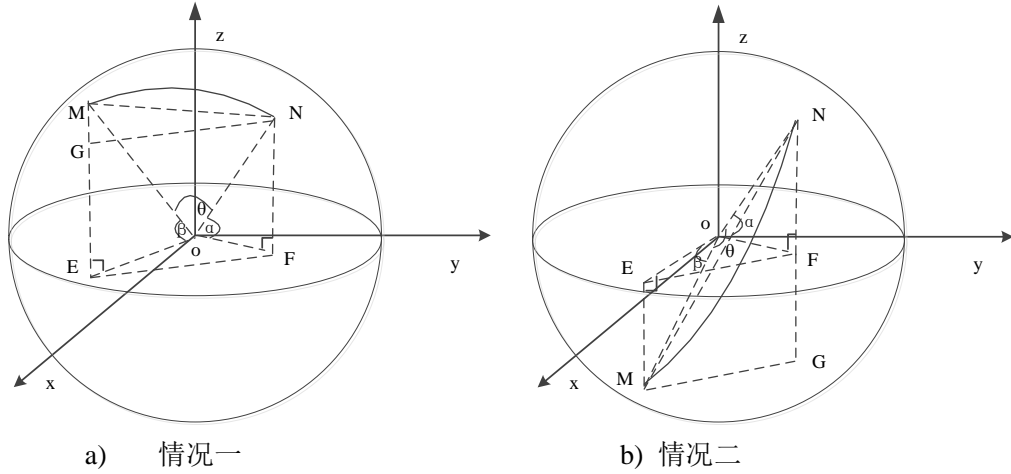


图 7 风矢起始位置的可能情况

两种情况的图示中坐标系z方向为北极方向，xoy面为赤道平面，x，y方向不影响解题所以只要满足右手定则即可。图中面OME \perp 面xoy，ONF \perp 面xoy，其中E,F分别为M,N在xoy面的投影点，OM=ON=l。求出圆心角 θ 值，即可求出MN之间的弧度值：

$$MN=l \cdot \theta \quad (18)$$

现在分别求解上述两种情况的弧度值。

(1) 情况一：假设M，N均在北半球，作 $GN \parallel EF$ ，则四边形NGEF为平行四边形， $NF=GE$ ， $GN=EF$ 。

在 $\triangle MEO$ 中，

$$OE = OM \cdot \cos \beta \quad (19)$$

$$ME = OM \cdot \sin \beta \quad (20)$$

在 $\triangle NFO$ 中，

$$OF = ON \cdot \cos \alpha \quad (21)$$

$$NF = ON \cdot \sin \alpha \quad (22)$$

在 $\triangle EFO$ 中，运用余弦定理可得：

$$EF^2 = OE^2 + OF^2 - 2 \cdot OE \cdot OF \cdot \cos(\alpha - \beta) \quad (23)$$

在 $\triangle MNG$ 中，运用勾股定理可得：

$$MN^2 = GM^2 + GN^2 = GM^2 + EF^2 \quad (24)$$

$$GM = ME - GE = ME - NF \quad (25)$$

在 $\triangle MNO$ 中，运用余弦定理可得：

$$MN^2 = OM^2 + ON^2 - 2 \cdot ON \cdot OM \cdot \cos \theta \quad (26)$$

由上(18)-(26)式子联立，代入数值即可求出MN。

(2) 情况二：假设M在南半球，N在北半球，作 $GM \parallel EF$ ，则四边形MGFE为平行四边形， $ME=GF$ ， $GM=EF$ 。

在 $\triangle MEO$ 中，

$$OE = OM \cdot \cos \beta \quad (27)$$

$$ME = OM \cdot \sin \beta \quad (28)$$

在 $\triangle NFO$ 中,

$$OF = ON \cdot \cos \alpha \quad (29)$$

$$NF = ON \cdot \sin \alpha \quad (30)$$

在 $\triangle EFO$ 中, 运用余弦定理可得:

$$EF^2 = OE^2 + OF^2 - 2 \cdot OE \cdot OF \cdot \cos(\alpha - \beta) \quad (31)$$

在 $\triangle MNG$ 中, 运用勾股定理可得:

$$MN^2 = GM^2 + GN^2 = EF^2 + GN^2 \quad (32)$$

$$GN = NF + GF = NF + ME \quad (33)$$

在 $\triangle MNO$ 中, 运用余弦定理可得:

$$MN^2 = OM^2 + ON^2 - 2 \cdot ON \cdot OM \cdot \cos \theta \quad (34)$$

由上述(16),(25)-(32)式子联立, 代入数值即可求出 MN 。

结合 (1) (2) 两种情况求能确定风矢大小 (m/s):

$$|\vec{v}| = MN / 1800 \quad (35)$$

4.2.6 非零风矢的确定

根据材料定义, “没有云或云块不稳定处的风矢规定为零风矢”。因此, 本部分主要依据云块的有无及云块的稳定性对零风矢进行判定。

(1) 关于云块的有无。云块的有无主要在窗口范围内的灰度矩阵值进行判定, 灰度代表云层的厚度, 灰度越高, 云层越厚, 图片显示时颜色也越白。因此对云块有无的判定主要分以下几个步骤:

- a) 对窗口内的灰度值进行 0-1 比特量化, 高于某个灰度阈值则量化为 1, 低于某个灰度阈值则量化为 0。则“1”代表该点颜色较浅, 有云的可能性大。“0”代表该点颜色较深, 有云的可能性小。0-1 比特的灰度量化阈值根据实际情况统计得到, 在本题目中, 根据所给数据情况, 在不同的经纬度范围内采用不同的灰度量化阈值, 如表 2 所示:

表 2 灰度量化阈值对应表

经度范围	纬度范围	灰度量化阈值 (低于为0, 高于为1)
E46° ~ E126°	S40° ~ S25°	640
E46° ~ E126°	S25° ~ N20°	600
E46° ~ E126°	N20° ~ N45°	750

- b) 在完成灰度 0-1 量化之后, 统计窗口内部的比特“1”数目 Num_1 。因为比特“1”代表该点有更大的概率有云。则规定当 $Num_1 > 4$ 个像素点时, 认为该窗口内是有云的。

(2) 关于云块的稳定性。我们在论文中, 将云块的稳定性定义为: 结构稳定性, 轨迹稳定性。

- a) 云块结构稳定性。不论使用 CC (交叉相关) 算法抑或我们提出的改进算法, 设最终结构的匹配度为 γ_{final} 。若

$$\gamma_{final} < \lambda\% \times \gamma_{self} \quad (36)$$

其中, γ_{self} 为模板与自身做匹配得到的匹配度, 其应该为此窗口内匹配的最大值。 $\lambda\%$ 为常数, 用于阈值的调整。公式 (36) 的意义在于: 若 30min 时段内最终得到的结果匹配度很低, 则说明此云块在 30min 内发生了较大的形变, 则定义该云块为结构不稳定。

- b) 云块轨迹稳定性。云块在前 30min 及后 30min 的运动速度和风向应该保持相对连续, 规定当 $\Delta\theta = |\theta_1 - \theta_2| > \theta_{thres}$ 或当 $\Delta v = |v_1 - v_2| / (v_1 + v_2) > v_{thres}$ 时, 该云块为轨迹不稳定。

(3) 结合以上论述, 在特定的阈值情况下, 求得非零风矢个数为 1476 个。求出给定的经纬度所对应的风矢大小和方向, 具体如表 3 所示。

表 3 规定风矢大小和方向

纬度	经度	角度(北顺°)	速度 (m/s)
26	52	145.5846	12.0333
26	53	338.9986	15.9498
26	54	338.9986	18.9286
26	57	178.1354	18.2332
26	58	11.3099	12.5970

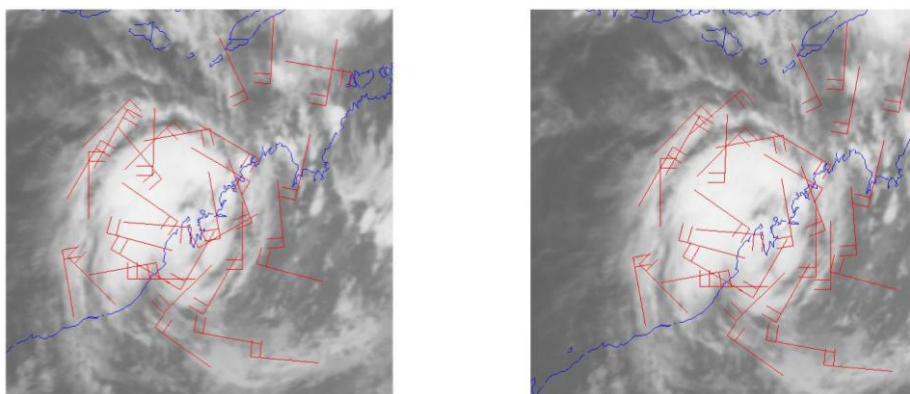


图 8 CC (交叉相关法) 与 CC 改进算法比对 (左为 CC, 右为 CC 改进)

由图 8 可见, 改进后的 CC 算法所求得的风矢图更有秩序, 一致性更高, 性能更好。

4.3 问题 3 的解决

4.3.1 对问题 3 的分析

在静止卫星云图上, 并非所有的云都能作为示踪云。有些云的移动与风之间有良好的关系, 而有些云的移动与风并无关系。最好的示踪云是随风而被动运动的云。当云运动受动力学而不是平流输送控制时, 云的任何发展和衰亡都将给云迹风场的反演带来误差。因此, 在理论上, 除随风而被动运动的云外, 任何云都不应被选作示踪云。

所以取消问题 2 中窗口大小和搜索范围的限定, 根据云块大小及实际情况,

设计能自适应地确定窗口大小和搜索范围的有效方法。然后采用风矢质量控制对上述求得的原始云迹风场进行编辑，去除不满足风场时空连续性和风矢唯一性要求的劣质风矢，以提高输出的云迹风场的质量。

4.3.2 窗口大小的自适应

1. 窗口大小的选择原则：

窗口大小的选择直接关系到像素块匹配质量。理想的云块窗口大小为恰好覆盖整个云块的大部分边缘区域，如图 9。而对于问题 2 中采用固定 16×16 大小的窗，可能会出现对云覆盖过多或不完全的情况，因此窗口的大小应该根据云块本身大小进行灵活调整。

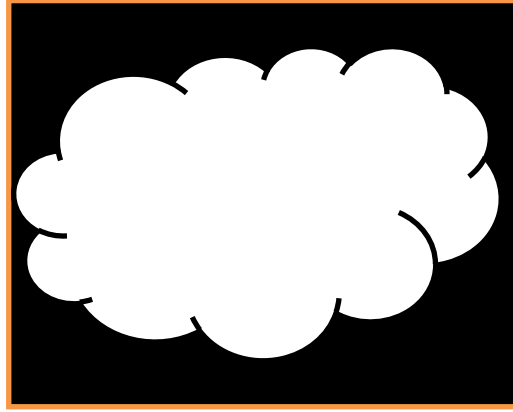


图 9. 理想的云块窗口

2. 窗口大小的自适应方法：

(1) 将灰度图量化成 0,1 比特。其中 0 代表无云，1 代表有云。取阈值 γ_{gray} ，若灰度 $\gamma < \gamma_{gray}$ ，则该点量化为 0，若 $\gamma > \gamma_{gray}$ ，则该点量化为 1。

(2) 统计窗口边缘的所有像素点中 1 与 0 的比例： $p^{1-0} = \frac{Num_1}{Num_0}$ ，并设定

1-0 比例的阈值 $p^{1-0}_{threshold}$ ，当 1-0 比例 p 接近于 $p^{1-0}_{threshold}$ 时，我们认为当前窗口涵盖了大部分云朵的边缘。

(3) 由于实际场景中，云朵的形状可能比较复杂，常常是不规则的。为了提高窗口自适应的准确性，同时采用大窗和小窗进行逼近。

(4) 初始化设定一个大窗 $Window_max$ 和一个小窗 $Window_min$ 。初始化值根据经验值确定，原则是对于大窗，保证其中有 1~2 朵云。对于小窗，保证其在一朵云的内部。

(5) 循环迭代，大窗以步进值 $Step_max_Window$ 进行缩小。小窗以步进值 $Step_min_Window$ 进行扩大。每变化一次，对于大窗小窗均计算一次他们的 1-0 比例。对于小窗来说，由于在云朵内部，1-0 比例总趋势为减小，则当小窗 1-0 比例连续 N 个步长小于阈值时跳出，取第一次小于阈值的窗为其大小。对于大窗，由于包括 1~2 朵云，则边缘 1-0 比例总趋势为增大，则当大窗 1-0

比例连续 N 个步长大于阈值时跳出，取第一次大于阈值的窗为其大小。

(6) 对大窗与小窗收敛时的大小进行平均，则最终采用的云朵窗口为：

$$\text{Window_adjust} = \frac{\text{Window_max_restrain} + \text{Window_min_restrain}}{2}$$

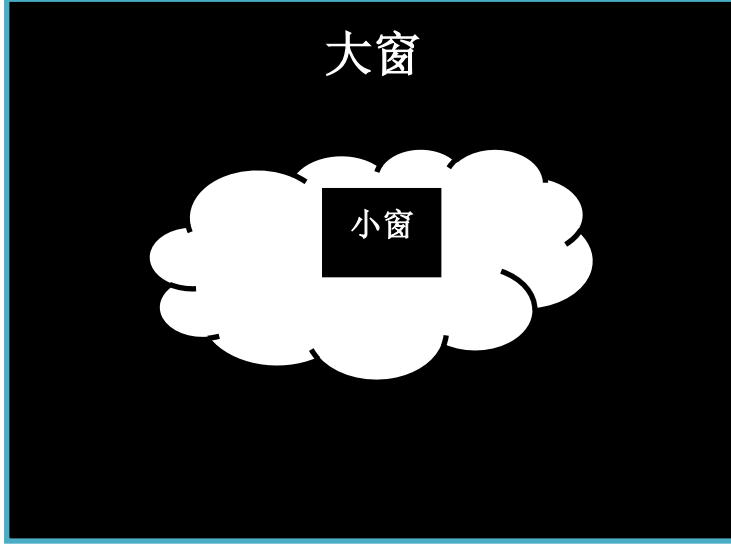


图 10. 云块窗口的自适应过程

(7) 当窗口大小确定后，在本次计算中，模板匹配过程中云朵窗口大小固定不变。

4.3.3 搜索范围的自适应

1. 搜索范围的选择原则：

搜索范围的选择涉及两方面的内容，选取的过小可能会影响精度，选取的过大则会增加复杂度。

在一定时间内，云块的移动位移取决于该云块的运行速度。这一速度可以根据云块类型及经验值进行先行确定。

除此之外，在风矢计算过程中，时常计算某一区域内很多个经纬度坐标点的的风矢。则当前风矢计算点搜索范围的确定，可以参考周围各个风矢计算点的“靶云”位移。

在搜索过程中，因为局部地区地形地貌气象环境的差异性，会出现部分“靶云”偏移量较大的情况。则“靶云”的初始位置可能被定位到搜索空间边缘，这意味着在搜索空间外可能存在更优的“靶云”初始位置。此时，以搜索空间边缘的“靶云”初始位置为中心，在新的搜索空间内进行再次匹配。

2. 搜索范围大小的自适应方法：

(1) 若“靶云” i 相邻一定距离内无已完成匹配过程的“靶云”。则依据当前区域的云朵类型及经验值预估计该云朵在 t 时间内的移动速度 v 。该云预测位移为： $s = v \times t$ 。则搜索空间初始化为一个正方形，该正方形的边长为：

$$l_{i,j} = \alpha \times s \quad (37)$$

其中， α 为保护因子， α 初始化为 $\sqrt{2}$ ，作用为保证“靶云”初始位置在搜索

空间内。

(2) 第 i 个“靶云”相邻一定距离内已有“靶云”完成匹配过程，则其搜索空间正方形边长为：

$$l_i = \frac{\sum_{j=1}^N l_{i,j} \times \rho_{i,j}}{N} \quad (1 \leq N \leq 4) \quad (38)$$

$$\rho_{i,j} = \frac{\sum_{j=1}^N d_{i,j}}{N \times d_{i,j}} \quad (1 \leq N \leq 4) \quad (39)$$

第 i 个“靶云”最多考虑其周围四个相邻的“靶云”的计算结果。其中， $l_{i,j}$ 为 i 相邻第 j 个“靶云”经过匹配计算后得到的该“靶云”在 t 时间内的位移。 $\rho_{i,j}$ 为影响 $l_{i,j}$ 的权重，即距离第 i 个“靶云”越近的“靶云”，其“风矢”情况与地 i 个“靶云”越接近，越应该优先考虑。

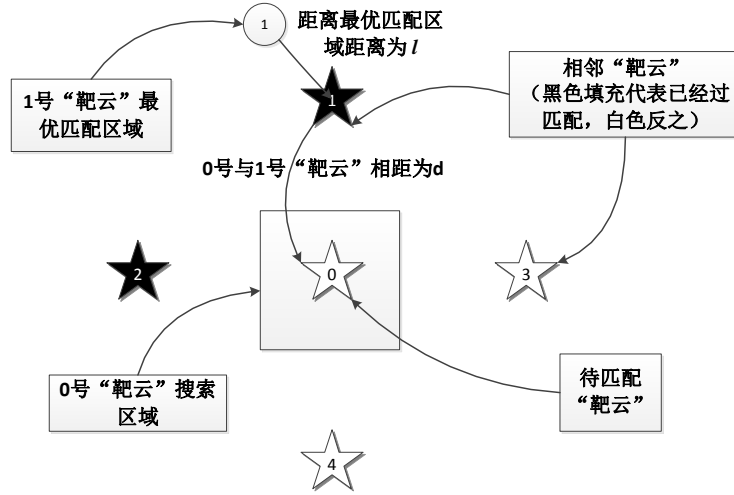


图 11. 搜索空间的自适应过程

(3) 在“靶云” i 的匹配过程中，在当前的搜索空间内，最优的匹配结果为 β_i 。若 β_i 的对应区域位于搜索空间的边缘，且匹配结果 β_i 不够好， $\beta_i < \beta_{threshold}$ ($\beta_{threshold}$ 为匹配度阈值，此处假设匹配结果越高越好)。则以 β_i 的对应区域为中心，以 R 为边长作新的正方形搜索区域。其中：

$$R = |\beta_{threshold} - \beta_i| \times R_C \quad (40)$$

其中， R_C 为常数。则 β_i 与阈值差距越小，以其对应区域为中心所画的新的搜索空间边长越小。

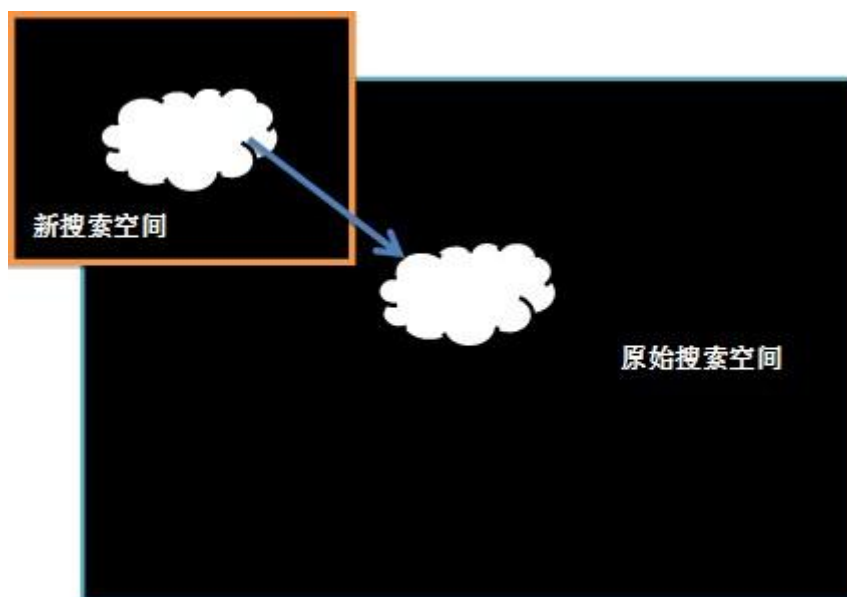


图 12 搜索空间对比示意图

本模型算法与问题 2 中的模型法结果比较如下：

表 4 问题 2 模型与问题 3 模型对比数据

纬度	经度	角度（北顺°）		速度（m/s）	
		问题2模型	问题3改进模型	问题2模型	问题3改进模型
26	52	145.5846	149.9314	12.0333	10.0109
26	53	338.9986	341.5651	15.9498	19.4435
26	54	338.9986	239.0362	18.9286	23.7450
26	57	178.1354	180.0	18.2332	13.2636
26	58	11.3099	18.4349	12.5970	10.4645

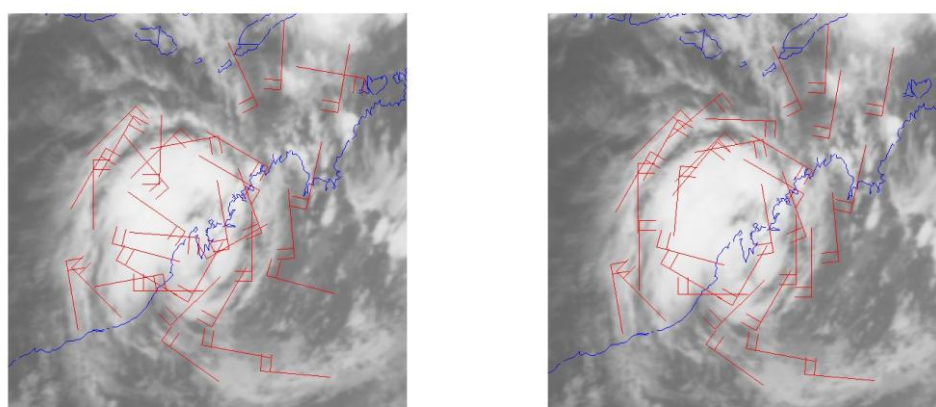


图 13 CC 算法与自适应算法比对（左为 CC，右为自适应算法）

由图 13 可见，窗口及搜索空间采用自适应之后，所求得的风矢图一致性很强，与 CC 相比有了明显的性能改进。

4.4 问题 4 的解决

4.4.1 对问题 4 的分析

灰度与压强的换算：由于在全球温度数值预报文件 temp3.mat 中，按照以下格式进行存储：存放的数据按“等压面高度”从上到下分 36 层，每层大气压相同。同一层是个矩阵，有 641 行，每行纬度相同；有 1280 列，每列经度相同，相邻两行(列)相差 0.28125 度，排列顺序是从北到南，从西到东。获得此数据后，需要完成的工作在于根据问题 2,3 中获得的纬度 26° N，经度 52° E，53° E，54° E，57° E，58° E 附近，步长逐步寻找最匹配的值，并求得对应压强值，得到等压面。

4.4.2 灰度与压强值的换算流程

1. 换算流程：

(1) 根据 temp3.mat 的对应关系可以得到经纬度为(lon,lat)的分层温度向量 $Temp_l(lon,lat)$ $1 \leq i \leq 36$ ；

(2) 由灰度与温度对应关系文件 k_temp.txt 可以将经纬度为(lon,lat)的灰度值转换成温度值 t ；

(3) 从 $Temp_l(lon,lat)$ 中找出与 t 之差绝对值最接近的索引值，即 $index = \arg \min |t - Temp_l(lon,lat)|$ ；

(4) 根据所获得的索引值，根据上下各层对应等压面压强值的关系可以获得 $Temp_l(lon,lat)$ 处的压强值。

2. 特定经纬度附近的风矢量所在等压面：

以下风矢位于纬度 26° N，经度 52° E，53° E，54° E，57° E，58° E 附近：

表 5 特定经纬度附近的风矢量的具体参数

纬度	经度	角度(北顺)	速度(米/秒)	压强(毫巴)
26	52	149.9314	10.0109	925
26	53	341.5651	19.4435	70
26	54	239.0362	23.7450	10
26	57	180.0000	13.2636	20
26	58	18.43490	10.4645	4

上表列出四个规定区域内风矢量的具体参数，详细值见附件 winsh.txt。

4.4.3 标有风矢的卫星云图的绘制

1. 风矢标志定义：

根据风矢的定义，本文中绘制的标记风矢的卫星云图以确定的经纬度坐标为起点，按照方向角正北顺时针的规则指向风矢的方向， \uparrow \uparrow \uparrow 表示风速分别为每秒 0 至 20 米，20 至 40 米，40 米以上的风矢。

2. 带压强显示的卫星云图：

考虑到压强也是气象学中的重要因素，在对问题 4 解答的过程中，已经获得灰度-压强的换算方式，因此在本文所显示的卫星云图中，红色风矢表示压强在 150 毫巴以下，黄色风矢表示压强在 150-250 毫巴之间，绿色风矢表示压强

在 250 至 550 毫巴之间，青色风矢表示压强在 550 毫巴以上。

下图以 coastline0.txt, IR1_2100.mat, temp3.mat 为数据源，分别可以获得海岸线，卫星云图灰度图和压强值，进而可以画出对应的带压强显示的卫星云图。

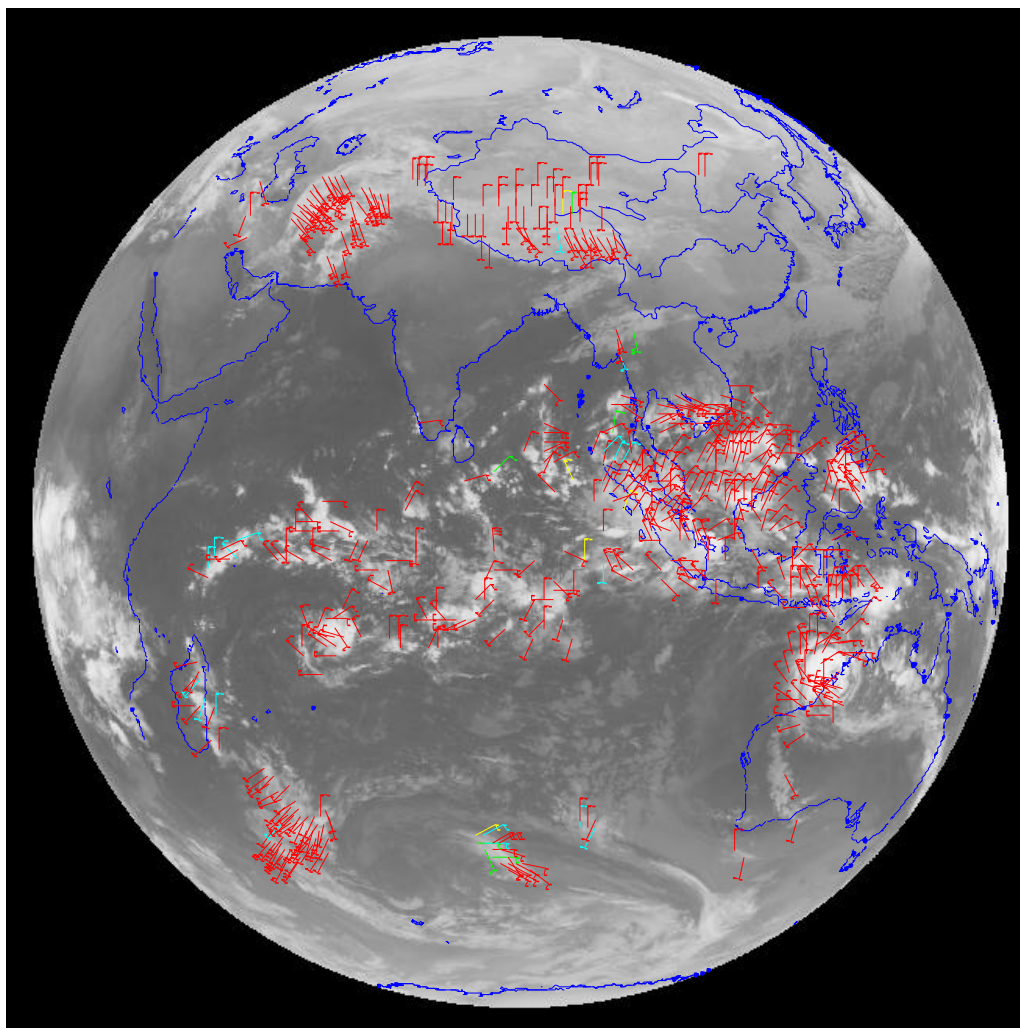


图 14 带压强显示的卫星云图

模型优缺点及其改进

本文提出的数学模型在效果最好的红外亮温交叉相关匹配法基础上进行改进。考虑到在搜索模板空间内，追踪模块获得的相关系数值 CC 可能具有多个临近的峰值，如果直接选取最优点作为匹配的返回值，这样极有可能因为测量或噪声等误差导致返回的最优匹配值并不在真实的匹配值上，导致针对这种情况，我们提出了如下的匹配算法流程进行甄别和改进。改进主要体现在如果最优匹配值小于设定阈值 $MATCH_{th}$ ，在匹配值空间曲面上显示为在阈值以下的多个山峰，则选取前 $\alpha\%$ 作为候选集合 C ，在集合 C 内获得每个点的坐标值 $C(x_i, y_i)$ ，计算每个坐标值在集合 C 内的标准差值，如果标准差大于标准差阈值 $ERROR_{th}$ ，则剔除该坐标值，然后采用加权平均法返回最优匹配值。

除此之外，云导风需符合时间连续性和空间连续性。对于平移运动的云系风矢量，由第 2 问中算得的两个矢量应无大的差别，将矢量差大于阈值的矢量剔除，要对矢量的长度和方向分别设定阈值。

这样改进后的算法能很好的克服噪声带来的误差，对示踪云的匹配更加准确。但是，由于近似等效等因素，云图匹配过程和云导风的求取过程中均存在误差，因此如何减少这些误差，使定位的准确性得到改善和提高的问题还是本模型需继续探究的。

参考文献

- [1] 刘晓光,陈曦,陈政伟等.基于图像灰度的 SSDA 匹配算法[J].航空计算技术,2010,40(1):54-57.
- [2] 刘正光,喻远飞,吴冰等.利用云导风矢量的台风中心自动定位[J].气象学报,2003,61(5):636-640.
- [3] 魏清宇.FY-2C 气象卫星半小时间隔云图导风业务系统的设计与开发[D]. 南京:南京信息工程大学.2006.
- [4] 何芬,沈桐立,贺哲等.伴随同化系统中用云导风修正模式地形的试验[J].高原气象,2007,26(2):300-308.
- [5] 王萍,宋振龙,孔秀梅等.基于云导风场的形成期台风定位[J].模式识别与人工智能,2005,18(6):752-757.
- [6] 张红,王振会,许建明等.利用静止卫星云图进行二维傅里叶相位导风试验[J].高原气象,2006,25(1):105-109.