

参赛密码 _____
(由组委会填写)

全国第九届研究生数学建模竞赛

| | |
|------|----------|
| 学 校 | 南京大学 |
| 参赛队号 | 10284001 |
| 队员姓名 | 1.董纯洁 |
| | 2.刘昊 |
| | 3.徐鹏 |

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 D:基于卫星云图的风矢场度量模型与算法探讨

摘 要 :

根据云的运动来推导风的原理就是对一幅图像上的云进行连续几幅图像的跟踪,然后计算在这几幅图像的观测时间内,云移动的距离和方向.本文主要对云的识别和追踪进行了分析建模,主要内容为:

问题一:建立以球心为原点,球心指向同步卫星为 x 轴,球心指向北极点为 z 轴, xoy -平面为赤道平面的直角坐标系,球面的探测点的坐标满足

$$\begin{cases} y = \tan\beta(l-x) \\ z = \tan\alpha(l-x) \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \end{cases} \quad (\alpha \text{ 为按步进角}, \beta \text{ 行扫描角}), \text{由此确定灰度矩阵中每个像元}$$

对应的经纬度,经计算得到指定像元对应的经纬度结果为:

- 500 行 500 列经纬度: (32.7405, 46.4851)
- 500 行 501 列经纬度: (32.7353, 46.5696)
- 500 行 502 列经纬度: (32.7302, 46.6538)

$$\text{再根据} \begin{cases} y = \tan\theta \cdot x \\ z = \tan\varphi \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \end{cases} \text{将海岸线经纬度坐标转换成灰度矩阵像素的}$$

行列值,据此作出了带有海岸线的卫星云图。

问题二:首先使用阈值剔除法识别云,将阈值小于 150 全部剔除;之后是本文创新点,小波频谱法匹配.传统的傅立叶相位法不能反映时频关系,而小波

变换有时频局部化特点. 本文使用了 Haar 小波函数, 对初始云块与目标云块分别做小波变换和去噪, 对云块做频谱匹配, 同时利用方差、能量特征再做匹配, 从交集中依据设定的原则确定目标云块. 计算了指定范围内的风矢, 在指定的 5 个经纬度处的计算结果为:

| 纬度 | 经度 | 角度 (北顺) | 速度 (米/秒) |
|-------|-------|---------|----------|
| 26.05 | 52.01 | 237.85 | 17.07 |
| 26.03 | 53.03 | 221.45 | 13.73 |
| 26.02 | 54.03 | 272.68 | 7.44 |
| 26.01 | 57.06 | 163.64 | 14.11 |
| 26.01 | 58.04 | 266.09 | 10.17 |

问题三: 本文根据局部灰度均值的变化方法来选取窗口大小和搜索范围, 对中心点窗口尺寸进行不断扩张, 比较扩张边缘的灰度均值与中心点附近的灰度均值, 以此确定尺寸. 在容许足够的灰度变化下, 保持了云块的稳定性. 比较固定窗口尺寸的方法及自适应窗口尺寸的风矢数据, 差别并不大, 即题设给的窗口 16×16 个像素, 搜索范围限定为 64×64 个像素是合理的.

问题四: 根据非零风矢所处的经纬度确定其对应灰度矩阵的行列, 根据灰度与温度的对应关系获得该云块处的温度, 从全球温度数值预报文件中获得该经纬度点不同等压面对应的温度, 找到离地面最近的且与该云块处温度最接近的两个等压面, 再利用线性插值:

$$P_a = Plevel[38 - p] - \frac{(V_2(p - 1) - V[ceil(A[i, j])]) * (Plevel[38 - p] - Plevel[37 - p])}{V_2(p - 1) - V_2(p)}$$

获得该风矢所在的等压面值.

关键词: 小波变换, 相位匹配, Haar 函数, 卫星云图

1. 问题重述

1.1 研究背景

在日常气象预报和灾害性天气学研究工作中，卫星云图已成为非常重要的信息来源，人类可以利用卫星云图检测天气系统。

本文旨在通过对灰度数据的研究，运用小波频谱法识别云团并对其追踪研究。首先确定灰度矩阵中的每个元素的经纬度，然后通过追踪同一云块在前后两个时刻在卫星云图中的位置，计算云移动矢量。在云迹风的计算过程中，主要应用了小波频谱法。通过此方法，希望对数值天气预报的准确性有所帮助。

1.2 换算视场坐标

首先，要确定灰度矩阵中每个元素对应采样点在地球上的经纬度。已知，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 微弧采样，灰度矩阵中第 1145 行和第 1145 列相交处星下点东经 86.5 度，北纬 0 度。通过建立球坐标系，构建几何模型即可将灰度矩阵中的每个点对应到经纬度。

其次，要将已知经纬度的海岸线添加到卫星云图上。这个过程是灰度→经纬度的反演，即经纬度→灰度，构建几何模型即可将海岸线经纬度还原为灰度值，然后即可将海岸线添加到卫星云图上。

1.3 计算风矢

要计算南纬 40 度至北纬 40 度，东经 46 度至 126 度的风矢（大小，方向），风矢的大小由云块移动的速度决定。主要工作有两个，一，识别云；二，追踪云，即用 21:00 和 21:30 这两幅静止气象卫星云图追踪云块，并用 20:30 时刻的卫星云图进行校正；三，计算风矢。

1.4 优化窗口大小和搜索范围

在计算风矢时，我们限定了像素块匹配所用的窗口大小为 16*16 个像素，搜索范围为 64*64 个像素，但是现在的理论尚未证明这样的窗口搜索范围大小是最合适的，或者说还不存在普遍适用型。所以本文要在利用卫星云图计算风矢这个案例上优化窗口大小和搜索范围。考虑在时间间隔为半小时又保持云块稳定性的条件下，精确窗口大小和搜索范围。

1.5 计算等压面

要计算北纬 40 度到南纬 40 度，东经 46 度到东经 126 度整数经纬度点对应的非零风矢所在的等压面，并在卫星云图上添加非零风矢量，以及非零风矢所在的等压面。

2. 基本假设

1. 本文将地球视为理想椭球；
2. X 轴：同步卫星与椭球中心所在直线；
3. Z 轴：地球中心与椭球极点所在直线；
4. Y 轴：垂直于与 xoz -平面并且经过 o 点.

3. 变量说明

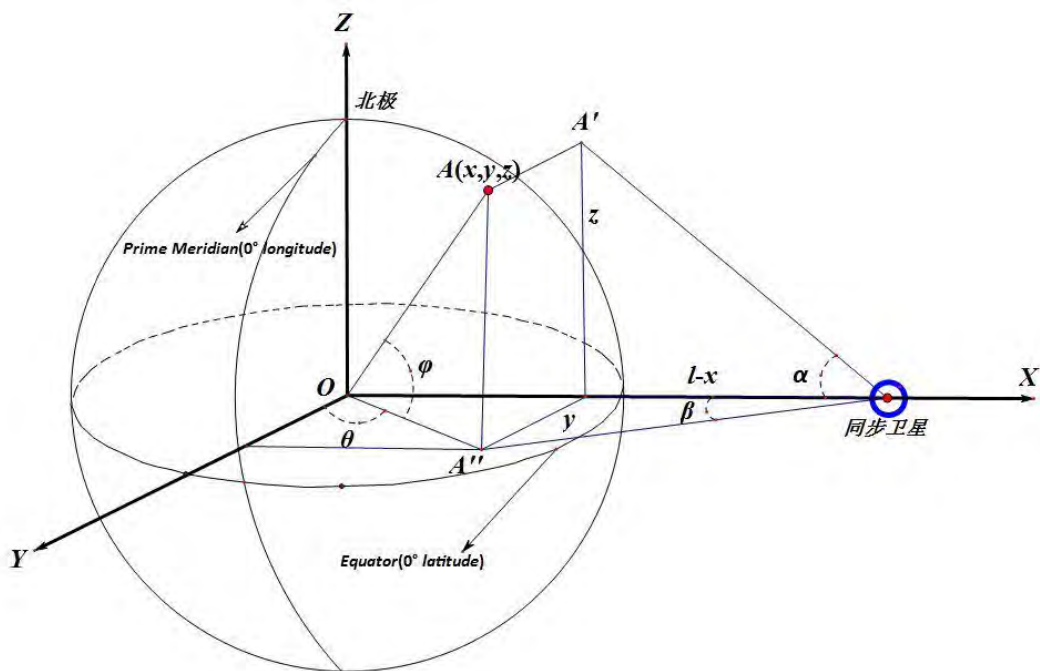
- l : 同步卫星与地球中心的距离, 即 42164000m;
- a : 椭圆截面的长半轴 (赤道半径), 即 6378136.5m
- b : 短半轴 (极半径), 即 6356751.8m
- α : 南北方向按步进角与 xoy -平面所成夹角;
- β : 东西方向行扫描角与 xoz -平面所成夹角;
- θ : 经度 (为从原点 O 到 A 点的连线在 xoy -平面的投影线, 与正 x -轴的夹角);
- φ : 纬度 (为从原点 O 到 A 点的连线与其在 xoy -平面的投影线的夹角);
- r : 地球表面一点到地球中心的距离.

4. 换算视场坐标

4.1 换算坐标

要确定灰度矩阵中每个元素对应采样点在地球上的经纬度, 假设地球为理想椭球. 基于红外探测器扫描采样, 即按步进角和行扫描角各形成一个面, 两个面的交线与椭球相交得到的点即为灰度矩阵中的元素, 联立方程组即可求得该元素在地球上的经纬度.

为方便讨论, 建立如下直角坐标系:



【数学模型】

设 $A(x, y, z)$ 为球面上一点, 可得:

$$\begin{cases} y = \tan\beta(l-x) \\ z = \tan\alpha(l-x) \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \end{cases}$$

其中 α 为南北方向按步进角与 xoy -平面所成夹角, β : 东西方向行扫描角与 xoz -平面所成夹角;

通过上述方程组求出 x, y, z . 再根据

$$\begin{cases} y = \tan\theta \cdot x \\ z = \tan\varphi \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \end{cases}$$

求出经纬度 θ 和 φ .

【问题求解】

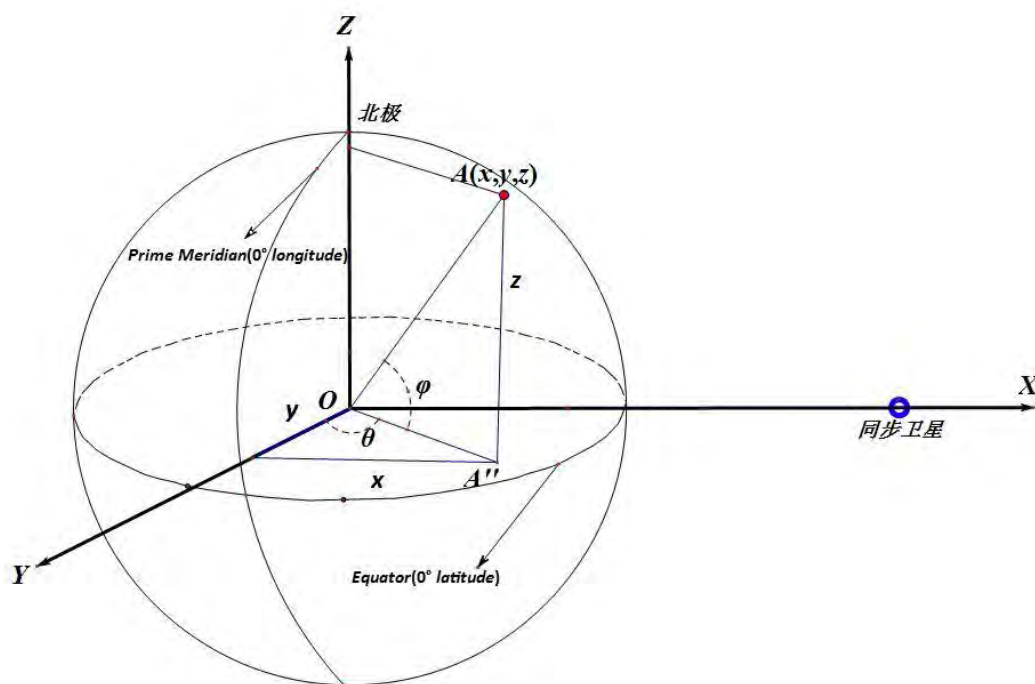
- 500 行 500 列经纬度: (32.7405, 46.4851)
- 500 行 501 列经纬度: (32.7353, 46.5696)
- 500 行 502 列经纬度: (32.7302, 46.6538)

4.2 添加海岸线

确定了灰度矩阵中每个探测点的经纬度后，可在卫星云图上添加出海岸线。这个过程其实是换算坐标的一个逆过程，目标要将海岸线经纬度坐标转换为灰度值。

【数学模型】

设 $A(x, y, z)$ 为球面上一点，如图：



由：

$$\begin{cases} y = \tan\theta \cdot x \\ z = \tan\varphi \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \end{cases}$$

【约束条件】

$$\begin{cases} \theta \in [0, \pi] \\ \varphi \in [0, 2\pi] \end{cases}$$

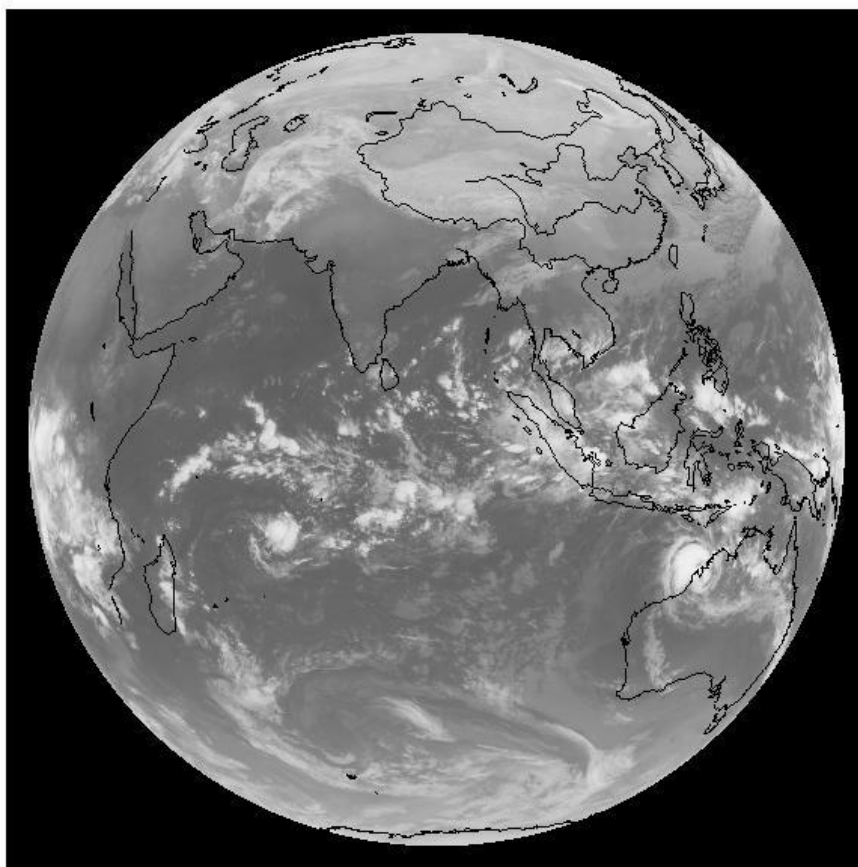
再通过

$$\begin{cases} y = \tan\beta(l - x) \\ z = \tan\alpha(l - x) \end{cases}$$

求出步进角 α 和行扫描角 β 。

【问题求解】

添加了海岸线的卫星云图如下：



5. 计算风矢

5.1 识别云

首先是对卫星云图图像进行预处理，通常用阈值分割法把云块先从卫星云图中分割出来，然后利用数学形态学等方法对云块进行进一步的处理。而阈值分割法识别对云图比较通用，而且计算量小、准确度高，故本文采用阈值法识别云。

由于在一幅卫星云图图像中，不可避免存在一些噪声点和干扰信息，这些噪声会影响到识别效果。所以首先对卫星云图进行去噪，本文采用均值平滑法。

【均值平滑】

均值平滑也就是模块中心的像素灰度值用周边其他像素灰度值的平均值代替，均值平滑公式为：

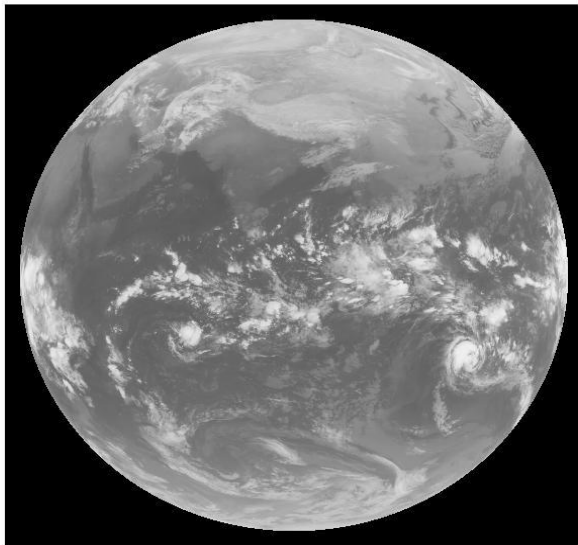
$$f_{(x,y)} = \frac{1}{(2k+1) \times (2k+1)} \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k f(i+x, j+y)$$

其中 k 值的大小决定平滑模块的大小, k 值越大, 图像边缘会被平滑的越模糊, 容易失真, 本文选取 3*3 模块对卫星云图做平滑处理.

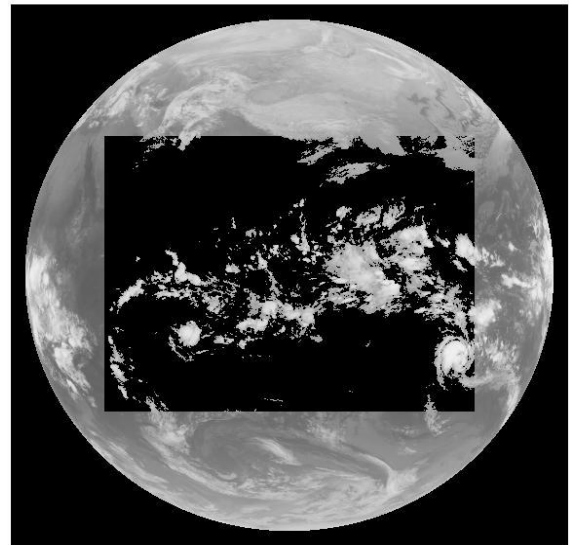
经过一次平滑处理后, 消除图像中的噪声干扰, 然后再对上述平滑处理后的卫星云图做一次 k 值较大的平滑.

【阈值剔除】

通过设定灰度值亮度阈值, 剔除区域平滑处理后保留下的云. 首先, 通过大量实验, 将图像阈值设为 150, 将云图中阈值小于 150 的区域的灰度设为 0, 阈值大于等于 150 的区域灰度保持不变. 如下图, 云图中亮度高的云会被识别出. 因此, 阈值大小取 150 是较合适的.



(正常的卫星云图)



(阈值剔除后的卫星云图)

5.2 追踪云团

【国内外研究现状】

当今主流的追踪云团方法主要是傅立叶相位法计算和相关系数计算. 本文将先对这两种方法做简单介绍, 然后导入创新点: 小波频谱法.

5.2.1 傅立叶相位法

若连续周期函数 $f(x) \in L^1(R)$, 在 t 时刻记为 $f(x, t)$, 周期为 $M=2L$, 在 t 时刻可展开为傅立叶级数:

$$\begin{aligned} f(x, t) &= \frac{a_0(t)}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} \left(a_k(t) \cos \frac{k\pi x}{L} + b_k(t) \sin \frac{k\pi x}{L} \right) \\ &= \frac{a_0(t)}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} c_k(t) \cos \left(\frac{k\pi x}{L} - h_k(t) \right) \end{aligned}$$

$$\text{其中} \begin{cases} a_0(t) = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x, t) dx \\ a_k(t) = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x, t) \cos \frac{k\pi x}{L} dx \\ b_k(t) = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x, t) \sin \frac{k\pi x}{L} dx \end{cases}$$

$$\text{并且} \begin{cases} c_k(t) = \sqrt{a_k^2(t) + b_k^2(t)} \\ h_k(t) = \arctan \frac{b_k(t)}{a_k(t)} \end{cases} \quad k = 1, 2, 3 \dots$$

$c_k(t)$ 、 $h_k(t)$ 分别为第 k 次谐波的振幅和相位，由上式可知，在 t_1 时刻，

$$f(x, t_1) = \frac{a_0(t_1)}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} c_k(t_1) \cos \left(\frac{k\pi x}{L} - h_k(t_1) \right)$$

假设 $f(x, t)$ 以速度 u 沿 x 方向运动，即各次谐波都以相同的速度 u 沿 x 方向平移，在 t_2 时刻应有

$$f(x, t_2) = \frac{a_0(t_1)}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} c_k(t_1) \cos \left(\frac{k\pi x}{L} - h_k(t_1) \right) \quad (1)$$

另一方面，在 t_2 时刻

$$f(x, t_2) = \frac{a_0(t_2)}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} c_k(t_2) \cos \left(\frac{k\pi x}{L} - h_k(t_2) \right) \quad (2)$$

比较(1)和(2)，因为各次谐波仅以速度 u 沿 x 方向平移，振幅和频率不变，所以有

$$a_0(t_1) = a_0(t_2), c_k(t_1) = c_k(t_2)$$

进而可得

$$u_k = \frac{h_k(t_2) - h_k(t_1)}{\frac{k\pi}{L}(t_2 - t_1)}$$

u_k 为各次谐波的运动速度，也就是 $f(x, t)$ 在 $t_1 \rightarrow t_2$ 时间内沿 x 方向上的运动速度 u . 这表明，由于 $f(x, t)$ 各部分以相同的速度 u 运动，则各次谐波的速度都相等

$$u_1 = u_2 = \cdots = u_n = u$$

对于卫星云图导风而言， $f(x, t)$ 代表 t 时刻像素值分布函数， u 就是云块在 (t_1, t_2) 时段内沿 x 方向上的运动速度。

用同样的方法假设 $f(x, t)$ 以速度 v 沿 y 方向运动，即各次谐波都以相同的速度 v 沿 y 方向平移，可以求得 $f(x, t)$ 在 (t_1, t_2) 时段内沿 y 方向上的速度 v . 根据

$V = \sqrt{u^2 + v^2}$ 即可求得云图上各点风矢速度的大小， $\text{Angle} = \text{tg}^{-1} \left[\frac{v}{u} \right] + \pi$ 为风矢速度的方向。

5.2.2 相关系数法

相关系数导风原理是通过对示踪云目标追踪，在连续的时间间隔（通常为半小时或一小时）的 A, B, C 三幅云图上搜索到目标模块所对应的匹配模块，则最初模块和最后模块的中心间的位移就是提供了云的运动值，由此计算出目标模块所对应的云迹风矢。

假定两追踪图像像素点灰度矩阵分别为 $u_{m \times n}, v_{m \times n}$ (m 行 n 列)，则相关系数 coef 计算公式如下：

$$\text{coef} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (u_{ij} - \bar{u})(v_{ij} - \bar{v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (u_{ij} - \bar{u})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (v_{ij} - \bar{v})^2}}$$

$$\text{其中 } \bar{u} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u_{ij}, \bar{v} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij}.$$

5.2.3 小波分析法

5.2.3.1 小波原理

将函数 $f(t)$ 表示为下面的小波级数：

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \langle f, \tilde{\varphi}_{j,k} \rangle \varphi_{j,k}(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_{j,k} \varphi_{j,k}(t)$$

$$\varphi_{j,k} = \varphi(2^j t - k)$$

其中 $\varphi(t)$ 是小波函数， $d_{j,k}$ 是小波系数，且 $d_{j,k} = \langle f, \tilde{\varphi}_{j,k} \rangle$. 由上公式可知，小波级数是两重求和，小波系数的指标不仅有频率指标 j ，而且还有时间指标 k . 也就是说小波系数不仅像傅立叶系数那样，是随频率不同而变化的，而且对于同

一个频率指标 j ，在不同时刻 k ，小波系数也是不同的. 这样克服了傅立叶不能反映振幅变化的情况.

由于小波函数具有紧支撑的性质，即某一区间外为零，这样在求各频率水平不同时刻的小波系数时，只用到该时刻附近的局部信息. 这样克服了傅立叶不能反映局部信息的缺点.

小波变换的‘时间-频率窗’的笛卡儿积是：

$$[b + at^* - a \Delta_\varphi, b + at^* - a \Delta_\varphi] \times \left[\frac{w^*}{a} - \frac{1}{a} \Delta \tilde{\varphi} \right]$$

其中 $a = 2^{-j}$ ，时间窗的宽度为 $2a \Delta_\varphi$ ，随着频率的增大（即 j 的增大）而变窄，随着频率的减小（即 j 的减小）而变宽，之所以有这样的结果，关键在于时间变量 t 前面乘了个‘膨胀系数’ 2^j .

小波变换‘时间-频率窗’的宽度，检测高频信号时变窄，检测低频信号时变宽，正是小波这个宽度可变的特点，解决了傅立叶高频与低频的时间局部化不能同时满足的缺陷.

5.2.3.2 选取小波函数

为了检测到不同频率水平信息，即求出不同频率水平下不同时刻的小波系数，关键要选好小波函数.

理想的基本小波是一个过程很短的震荡函数（即具有紧支集或者在一个短区间以外只有很小的幅度），而且此函数所有的二进平移和伸缩都是正交归一的. Haar 函数很好的说明了这一点，其他可以得到的小波函数就不能呢个全部满足这些准则. 所以本文选取的小波函数为 Haar 函数.

Harr 函数的尺度函数为

$$\phi_H(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

由 MRA 构造的基本小波函数为

$$\psi_H(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

由(1)式可知 Harr 小波的时间局部化能力很强，但在频域衰减速度仅为 $O(\frac{1}{|t|})$.

5.2.3.3 小波实现

本文选取 20:30, 21:00, 21:30 三个时刻的云图，依次定义为 A, B, C 云图，以 B 图为准目标云图，在灰度矩阵相应的行列 (i, j) ，选取以 (i, j) 为中心

的 16×16 像素窗口大小的灰度矩阵，并在 C 图中选取同样以 (i, j) 为中心的，大小为 64×64 像素的灰度矩阵作为搜索范围，来进行示踪云的搜索匹配。

【灰度矩阵小波分解】

本文对示踪云像素点灰度矩阵进行一层二维小波变换，把 16×16 像素点灰度矩阵分解得到 4 个 8×8 的矩阵：cA, cH, cV, cD, 其中 cA 表示近似小波系数矩阵，cH, cV, cD 分别表示（水平，垂直，倾斜）细节小波系数矩阵。cH, cV, cD 给出了云层水平，垂直，倾斜方向的细节差别。

【小波系数矩阵除噪】

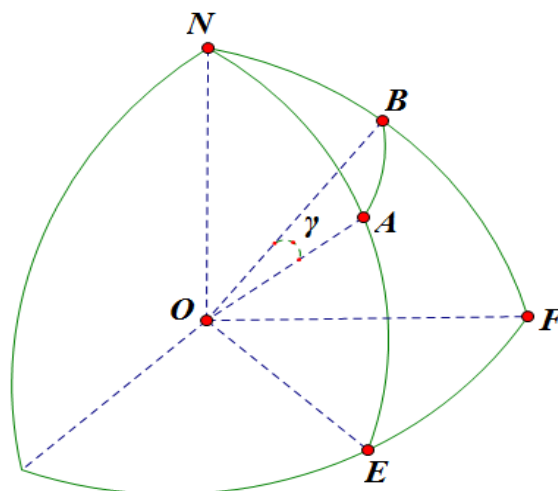
对于许多信号，低频成分很重要，常包含信号的特征，而高频成分则给出信号的细节和差别，很多高频成分中包含噪音，在本课题中，云块边缘的云的运动可能会比较剧烈，噪音较多，会影响云层匹配的计算，所以本文对小波分解后的细节矩阵进行除噪处理，选取垂直方向以及倾斜方向的细节矩阵，将其高频部分去掉一部分，但是考虑到高频去掉太多会导致候选云块太多，本文适当调节高频部分的比例，最后得到除噪模型。

【目标云层搜索匹配】

本文计算小波变换后示踪云和追踪区云层的频谱差，选取频谱差最小的追踪区云块作为我们的目标匹配云块。考虑到云块在移动的过程中可能会有旋转，会对目标云层搜索匹配造成较大影响，加入方差，能量等不随云层旋转而变化的特征量来建立模型，选取与示踪云频谱差最小的几个区域，方差大小差距以及能量差最小的几个区域，对它们进行匹配，如果存在唯一匹配，即是要寻找的区域，如果有多个匹配区域，则选取频谱差与方差与能量差三者之和最小的区域。如果不能匹配，则认为该部分云层比较不稳定，不加以考虑。

5.3 计算风矢

设示踪云目标的初始位置 $A(\psi_A, \lambda_A)$ 和终点位置 $B(\psi_B, \lambda_B)$ ，由小波分析法求出后就可以求出风矢，下图为球面上 A, B 两点之间的位移示意图。



在上图中，

$$ON = OA = OB = OE = OF = R$$

$$\angle NOA = 90^\circ - \psi_A, \angle NOB = 90^\circ - \psi_B$$

$$\angle N = \angle EOF = \lambda_B - \lambda_A = \Delta\lambda$$

$$\gamma = \angle AOB, \angle A = \text{球面角 } NAB$$

由球面三角形 NBA 的余弦定理

$$\begin{aligned} \cos\gamma &= \cos(90^\circ - \psi_A) \cos(90^\circ - \psi_B) + \sin(90^\circ - \psi_A) \sin(90^\circ - \psi_B) \cos N \\ &= \sin\psi_A \sin\psi_B + \cos\psi_A \cos\psi_B \cos\Delta\lambda \end{aligned}$$

$$\gamma = \cos^{-1}[\sin\psi_A \sin\psi_B + \cos\psi_A \cos\psi_B \cos\Delta\lambda]$$

且 $AB = r\gamma$ ，则风速

$$fff = r\gamma/\Delta t$$

Δt 为第二张图扫描到 B 点的时间与第一张图扫描到 A 点的时间之差，再由球面三角形 ABN 的余弦定理，

$$\cos(90^\circ - \psi_B) = \cos\gamma \cos(90^\circ - \psi_A) + \sin\gamma \sin(90^\circ - \psi_A) \cos A$$

$$\cos A = (\sin\psi_B - \cos\gamma \sin\psi_A) / (\sin\gamma \cos\psi_A)$$

$$A = \cos^{-1}[(\sin\psi_B - \cos\gamma \sin\psi_A) / (\sin\gamma \cos\psi_A)]$$

若 $\lambda_B > \lambda_A$ ，则风向

$$DD = A$$

若 $\lambda_B < \lambda_A$ ，则风向

$$DD = 360^\circ - A$$

【小波频谱法结果】

使用小波频谱法一共找出 1408 个非零风矢，其中纬度 26 度，经度分别是 52, 53, 54, 57, 58（度）处的非零风矢为：

小波频谱法结果

| 纬度 | 经度 | 角度（北顺） | 速度（米/秒） |
|-------|-------|--------|---------|
| 26.05 | 52.01 | 237.85 | 17.07 |
| 26.03 | 53.03 | 221.45 | 13.73 |
| 26.02 | 54.03 | 272.68 | 7.44 |
| 26.01 | 57.06 | 163.64 | 14.11 |
| 26.01 | 58.04 | 266.09 | 10.17 |

【小结与窗口尺寸理解】

傅立叶相位法着眼于研究图像上确定的模块处的流动，计算所得风速较为稳定。但是傅立叶分析不能刻画时域信号的局部特性，而且对非平稳信号的处理效果不好，所以在瞬息万变的大自然不具有普遍适用性。

相关系数是标准化的协方差函数，因而当源图像的灰度与目标图像的灰度之间存在线性畸变时，仍然能较好地评价它们之间的相似性程度。但是使用相关法计算出的云迹风，不能反映风场的瞬时变化。

小波变换有效地克服了傅立叶的缺点，信号变换到小波域后，小波不仅能检测到高频与低频，而且还能将高频与低频发生的位置与原始信号相对应。也就是说小波既能在时域很好地刻画信号的局部性，同时也能在频域反应信号的局部性。

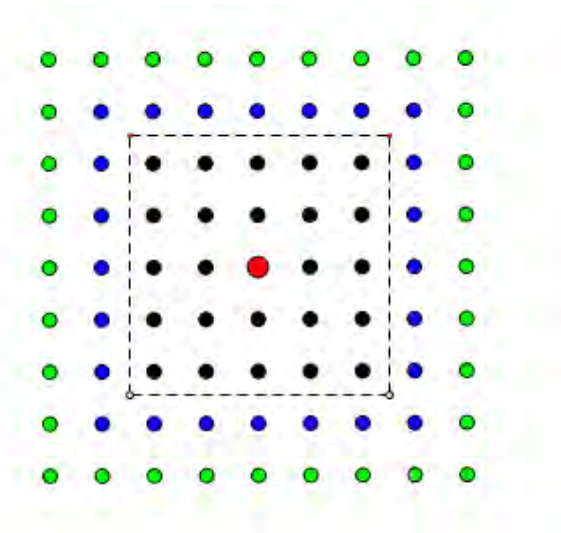
2288×2288 个像素点包括了 180 纬度和经度，也就是 1 度包含大概 $2288/180 \approx 13$ 个像素。 16×16 的窗口尺寸应该包含经纬度跨度大于 1 度的区域，这块区域应该包含了足够多的灰度变化信息进行匹配。 64×64 的搜索区域的边缘，离匹配区域中心最近的地方，经纬度跨度也超过 1.5 度。半小时经纬度跨度为 1.5 度的风速超过 80 米/秒。而台风中心附近的风力也才 50、60 米/秒，如果搜索区域超出 64×64 那么明显是不合理的。所以搜索区域为 64×64 是合理的。

6. 优化窗口大小和搜索范围

基于灰度的匹配算法的中心问题是选择一个适当尺寸的窗口。一方面，窗口尺寸要尽可能地大，以便为可靠匹配包容足够的灰度变化；另一方面，窗口尺寸又要尽可能地小，以避免投影畸变的影响。如果窗口太小，没能覆盖足够的灰度变化，则会因信噪比太低而造成所得视差估值不良；相反，若窗口太大且跨越物方深度（即视差）的较大变化，则因左右图像上不同的投影畸变，使得最大相关系数或最小方差和的位置并不代表正确匹配位置。出于这样的原因，理想的情况应是，窗口尺寸须按灰度和视差的局部变化自适应地选取。

【自适应选窗口法】

自适应选取窗口尺寸的方法有很多，比如用非线性迭代的方法扩展匹配窗口，最终得到最佳匹配窗口；或者利用由窗口内的平均误差、较大窗口的偏移及误差方差组成的能量函数来确定窗口。但以上方法较为复杂，短时间内较难实现。我们采取一种根据局部灰度的均值变化的方法来选取。



(自适应像素选择图)

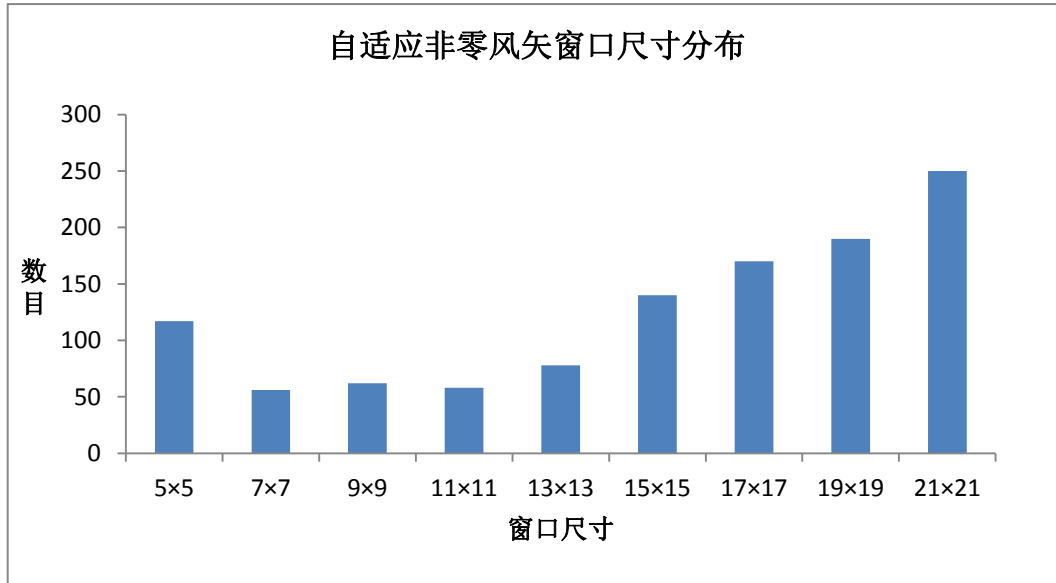
如图, 我们首先选取以目标点 (i, j) 为中心的正方形内 (虚线区域内) 5×5 个点, 求出这 25 个点灰度的平均值. 然后向外扩张, 每次向外扩张一排, 如第一次扩张为 $7 \times 7 = 49$ 个点. 每扩张一次, 计算所有增加点的均值, 并与中间 25 个点的均值进行比较. 这里我们设定一个阈值, 如果两个均值之差大于 10, 则我们选没扩张之前的矩阵尺寸作为点 (i, j) 的窗口尺寸; 如果两个均值的差小于或者等于 10 (灰度值最高为 255) 则继续扩张, 直到某一次均值之差大于 10, 或者扩张 8 次, 我们最多选取 21×21 作为点 (i, j) 的窗口尺寸. 这样每个点都有根据自己附近灰度变化的自适应的窗口尺寸. 每一个窗口既包含了足够多的灰度化, 又不至于包含投影畸变.

我们使用固定窗口尺寸的小波频谱法的结果进行对比, 得到的在在纬度 26 度, 经度分别是 52, 53, 54, 57, 58 (度) 处的风矢为:

自适应窗口尺寸法结果

| 纬度 | 经度 | 角度 (北顺) | 速度(米/秒) | 窗口尺寸 |
|-------|-------|---------|---------|----------------|
| 26.05 | 52.01 | 237.85 | 17.07 | 17×17 |
| 26.03 | 53.03 | 221.45 | 13.63 | 21×21 |
| 26.02 | 54.02 | 272.66 | 3.72 | 21×21 |
| 26.04 | 57.06 | 163.64 | 14.11 | 19×19 |
| 26.01 | 58.04 | 204.09 | 12.35 | 15×15 |

统计各个非零风矢点的自适应窗口尺寸, 结果如下:



通过比较固定窗口尺寸的方法及自适应窗口尺寸的风矢数据,使用自适应方法得到的非零风矢个数相对较少,但是在大多数地区,风矢差别不大.两个算法进行比较,自适应算法需要多一步计算每一个点的窗口尺寸,但是得到的结果并没有多大差别.所以采用 16×16 的窗口尺寸是比较合理的方法.

7. 计算等压面

7.1 计算温度

对给定的经纬度 (latitude, longitude), 求出灰度矩阵 A 中对应的行和列 (i, j), 得到该点处的灰度 $A[i, j]$, 为计算非零风矢处的温度, 需要将卫星探测的灰度数据转换成温度值. 我们选取 `k_temp.txt` 中前面 1024 个值生成温度向量 V , 其中 $V(1)$ 是灰度等于零时对应的温度值, 则在给定的经纬度处, 该点的温度等于 $V[\text{ceil}(A[i, j])]$.

7.2 求等压面

通过灰度矩阵对应的行和列求出对应的经纬度 (latitude2, longitude2), `temp.mat` 给出 21:00 时刻 36 个离散等压面:

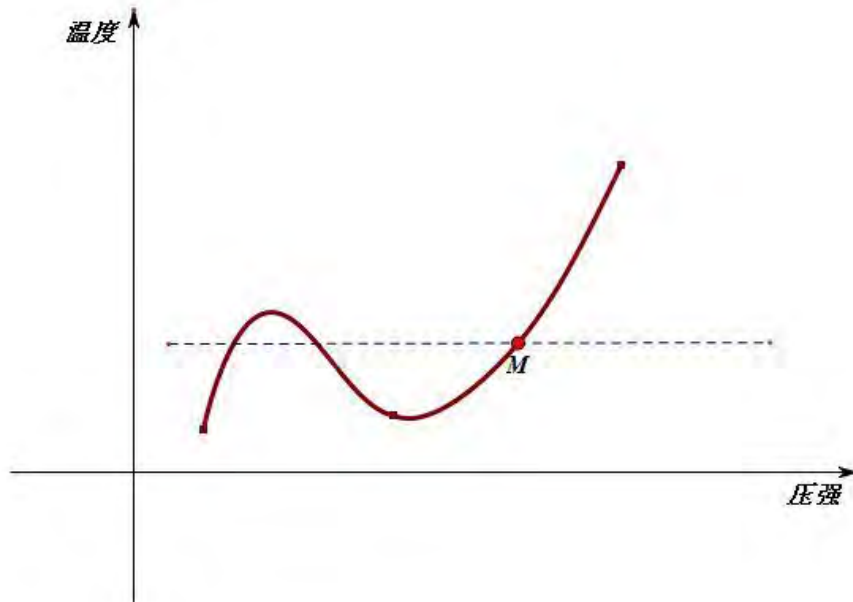
$\text{PLevel} = [0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 925, 950, 975, 1000]$ 上不同经纬度对应的温度值, 不同等压面矩阵第一行第一列元素代表北纬 90 度, 东经零度地点的该等压面的温度. 其中行间隔, 列间隔均为 0.28125 度.

对 (latitude2, longitude2), 我们可以计算出其在等压面矩阵对应的行列, 我们选取该行列 36 个等压面的对应温度, 按照等压面从低到高排列 ($1000 \sim 0.1$), 生成温度向量 $V2$, 然后用 $V[\text{ceil}(A[i, j])]$ 与 $V2[p]$ 比较, 直到 $V[\text{ceil}(A[i, j])]$ 第一次大于 $V2[p]$, 然后我们对 $\text{PLevel}[37-p]$ 以及 $\text{PLevel}[38-p]$ 进行线性插值求出该点所在的等压面. 插值公式如下:

$$P_a = Plevel[38 - p] - \frac{(V_2(p - 1) - V[ceil(A[i, j])]) * (Plevel[38 - p] - Plevel[37 - p])}{V_2(p - 1) - V_2(p)}$$

即求得给定经纬度对应的等压面.

选取等压面的准则：在给定的经纬度，如果存在非零风矢，则该点中心附近存在云块，所以该点的温度应该具有如下特征：

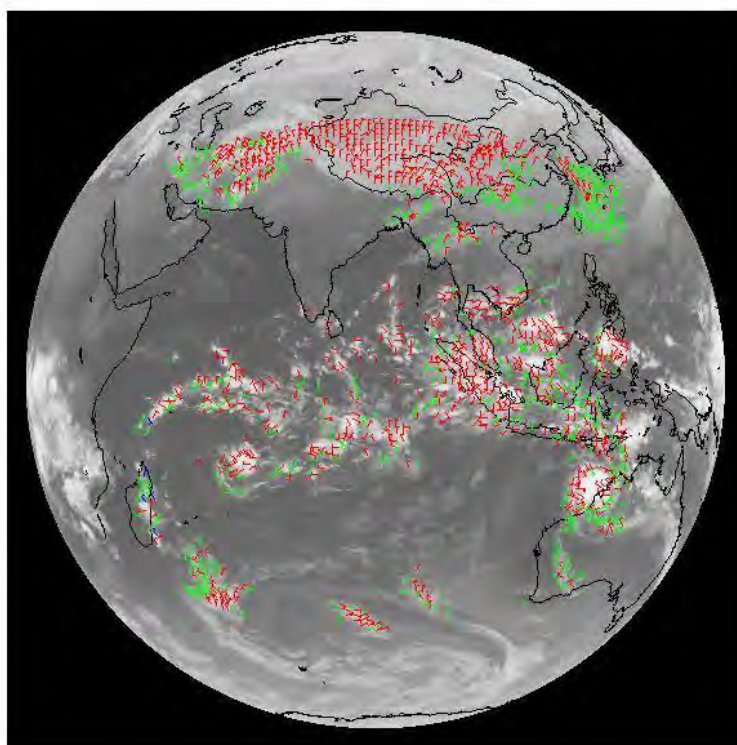


所以该点压强应该不会太小，我们可以从高压强往下搜索，找到该经纬度温度对应的区间，然后进行插值处理.

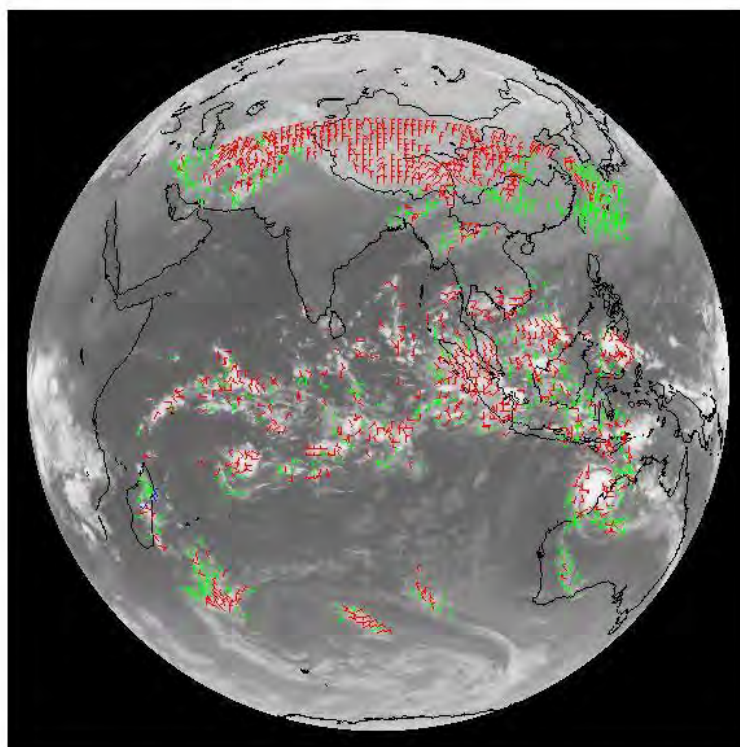
我们用该模型求纬度 26 度，经度分别是 52, 53, 54, 57, 58（度）处附近求出的风矢量所在的等压面，结果如下：

| 纬度 | 经度 | 角度（北顺） | 速度（米/秒） | 压强（毫巴） |
|-------|-------|--------|---------|---------|
| 26.05 | 52.01 | 237.85 | 17.07 | 405.434 |
| 26.03 | 53.03 | 221.45 | 13.73 | 424.317 |
| 26.02 | 54.03 | 272.68 | 7.44 | 551.558 |
| 26.01 | 57.06 | 163.64 | 14.11 | 503.415 |
| 26.01 | 58.04 | 266.09 | 10.17 | 476.173 |

我们在问题 1 中画出的卫星云图上添加非零风矢量以及等压面，结果如下：



16×16 固定窗口尺寸小波频谱法云导风图



自适应窗口尺寸小波频谱法云导风图

8. 模型评价与改进

在识别云的模型中，本文采用了均值平滑法，有效地去除了卫星云图图像中存在的噪声点和干扰信息，在此基础上，我们给出一个灰度阈值，结果表明，该模型识别云块效果良好。然后在示踪云云层匹配模型中，本文创新性地引入小波频谱法匹配，有效地克服了傅立叶的缺点。小波既能在时域很好地刻画信号的局部性，同时也能在频域反应信号的局部性。在自适应选窗口模型中，本文采取根据局部灰度均值的变化方法来选取窗口大小和搜索范围，在容许足够的灰度变化下，保持了云块的稳定性。

模型不足之处在于：

对每个示踪云，我们需要去做 $48*48+1$ 次小波变换，模型占用内存较多，计算量大，计算时间久，可以在算法上得到进一步改进。

没有进行目标云的识别，也没有将目标云分为高中低云，而是在质量控制中才有灰度阈值方法来简单代替了目标云的识别过程。

参考文献

- [1]王振会, 许建明, G. Kelly, 基于傅立叶相位分析的卫星云图导风技术, 气象科学, 2004. 3
- [2]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, 1997. 2
- [3]张红, 二维傅立叶相位导风技术的研究, 中国知网, 2004. 5
- [4]黄磊, 基于图像匹配和模式识别技术的卫星资料应用, 中国知网, 2007. 5
- [5]寿亦萱, 模式识别技术及其在气象研究中的应用, 中国知网, 2004. 5
- [6]许建明, 一维傅立叶相位导风技术的研究, 中国知网, 2003. 5
- [7]包晓丹, 基于卫星云图的对流云自动识别方法研究, 中国知网, 2011. 5
- [8]于开平, 邹经湘, 杨炳渊, 小波函数的性质及其应用研究, 哈尔滨工业大学学报, 2000. 4
- [9]张永生, 引入自适应窗口的立体图像匹配算法, 解放军测绘学院学报, 1996. 6