

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	北京邮电大学	
参赛队号	10013010	
队员姓名	1.	王志国
	2.	李敏良
	3.	杨 杰

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（云导风）度量模型与算法探讨

## 摘            要：

本文利用空间几何、图像匹配原理、梯度计算等原理很好的解决了根据卫星云图对坐标点的地理经纬度映射、云迹风风矢计算、云迹风模板和搜索范围的自适应确定等问题，建立了相应的模型并给出了模型的求解结果，最后对结果以及模型进行了讨论。

问题 1：论文主要建立空间几何模型来实现。利用卫星云图的成像原理，建立起目标点在卫星云图上的坐标 $(p_x, p_y)$ 和目标点在地球上对应的地理位置的经度 $\varphi$ 、纬度 $\phi$ 之间的数值关系式，并利用此公式对灰度矩阵中的 451 行至 550 行，第 451 列至 550 列的全部元素进行了视场坐标换算。

问题 2：将题目抽象为一个在相邻的两幅图之间进行特征匹配的问题来实现。采用了当前应用较为广泛的交叉互相关系数（MCC）算法，通过在固定大小的搜索范围中对固定大小的云迹风模板进行图像匹配，来确定目标点移动在相邻两幅图间移动的位移和方向，从而得到风矢。

问题 3：论文利用梯度法的思想，通过求以目标点为中心的  $15 \times 15$  个点的灰度均值来得到自适应地计算云迹风模板和搜索区域上、下、左、右四个方向上扩展量的阈值，然后利用云迹风模板和搜索区域各自的四个扩展量构建出自适应大小的云迹风模板和搜索区域。然后利用问题 2 中的 MCC 算法来完成图像匹配和风矢的计算。

问题 4：论文通过查找给定区域中非零风矢点的灰度值和温度以及温度和压强之间的对应关系，最终建立起灰度和压强之间对应关系，从而用给定区域的灰度值矩阵计算出各个点的压强值和所在的等压面。

**关键词：** 视场坐标换算   MCC   自适应匹配   云迹风   等压面

## 一、问题重述

卫星云图是人类了解大气环流、中长期天气预报、灾害天气的预报以及研究人类生态环境的变化提供了有力的手段。同步地球卫星通过探测地球上空的温度，对应转化为灰度数据，下发到地球接收站。人类可以充分卫星图像数据及其特点建立准确的描述实际风矢场的度量模型和算法，实现云导风的反演。

**题目要求解答以下问题：**

**问题一：**换算视场坐标。首先需要先给出灰度矩阵元素行列号对应于经纬度坐标的换算公式，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。以文本文件(jwd.txt)的形式给出结果的范围为：灰度矩阵中的第 451 行至 550 行，第 451 列至 550 列，对应的经纬度坐标。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。并且将卫星灰度矩阵 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。

**问题二：**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  $16 \times 16$  个像素，搜索范围限定为  $64 \times 64$  个像素。

利用建立的方法计算 21:00 时刻在各个（整数）经纬度处的二维风矢。计算范围为：南纬 40 度至北纬 40 度，东经 46 度至 126 度。

在论文中给出上面计算结果中全部非零风矢的个数，并给出在纬度 26 度，经度分别是 52, 53, 54, 57, 58（度）处的风矢，这些风矢的表示形式可参照下面问题 4 中对 winsh.txt 要求的格式。

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。

**问题三：**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。提出对云图数据量和云导风风矢场计算研究的建议。

**问题四：**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。

## 二、模型假设

- 地球可视为理想椭球，椭球截面的长半轴是赤道半径，短半轴是极半径
- 卫星在云图成像过程中与地球同步运动且距地高度不变，不考虑卫星状态变化
- 地心纬度和地理纬度相同

- 卫星云图的像素坐标均匀分布，坐标的单位长度与实际长度换算比例为 1:5000 米
- 不考虑云层高度对实际距离的影响

### 三、问题分析

卫星云图是由地球同步卫星上的红外探测仪探测到地球上空的温度数据转化为灰度数据制作而成的，没有云层的地方探测到的温度相对较高，有云层的地方相对较低，且云层距地越高则探测到的温度越低。由于卫星云图在掌握大气环流、中长期天气预报以及天气学的研究中有重要意义。因此如何通过卫星云图进行云图上的平面坐标和地球上经纬度的换算、大气风矢场的建模与计算以及大气等压面的计算与描述等问题，具有很强的现实意义。本文正是针对这些问题，提出了数学模型和相关的算法。

首先，针对卫星云图上的平面坐标和地球上经纬度的换算这个问题，论文利用同步卫星的成像原理，建立空间坐标系，借助立体几何最终导出了卫星云图上的坐标  $(p_x, p_y)$  和目标点在地球上对应的地理位置的经度  $\varphi$ 、纬度  $\phi$  之间的换算公式：

$$\varphi = \frac{1}{2} \left( \arcsin \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} + \arctg \frac{b}{a} \right) + \theta \quad (3.1)$$

$$\phi = \arctg \frac{p_y \sin(\varphi - \theta)}{p_x (1 - e)^2} \quad (3.2)$$

其中  $a, b, c$  为  $p_x, p_y$  的函数， $\theta$  为星下点的经度， $e$  为常量。

利用换算公式对灰度矩阵中的 451 行至 550 行，第 451 列至 550 列的全部元素进行了视场坐标换算，并通过对 IR1\_2100.mat 转化而来的卫星云图添加海岸线验证了换算公式的正确性。

第二个问题的核心是计算风矢，限定了风矢计算中的像素匹配块（即云迹风模板）的大小为  $16 \times 16$ ，搜索范围为  $64 \times 64$ ，论文将问题转化为了在搜索区域中对匹配块进行图像匹配的算法。判定图像特征匹配的算法有很多，论文中选取了应用较广的 MCC 算法，即通过交叉互相关系数：

$$R_1(v, w) = \frac{\sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}] [g(i+v, j+w) - \bar{g}]}{\left[ \sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}]^2 \sum_i \sum_j [g(i+v, j+w) - \bar{g}]^2 \right]^{1/2}} \quad (3.3)$$

来完成图像匹配，确定目标点移动在相邻两幅图间移动的位移和方向，从而得到风矢。

显然传统的 MCC 法固定了示踪云模板和搜索范围的大小，从而在进行计算的时候只利用了图像的灰度信息，并没有利用图像的梯度信息，而图像的梯度信息会直接影响到正确的搜索范围的大小进而影响到图像匹配的相似程度。所以要

更精确地对示踪云进行追迹,可以考虑利用图像的梯度信息自适应地构建示踪云模板和搜索范围,然后再在搜索范围内利用 MCC 算法对示踪云模板进行特征匹配,从而确定示踪云中心移动后的坐标。

从这一点出发,论文在第三问题中提出一种自适应确定示踪云模板和搜索范围的算法,该算法基于图像的灰度信息和梯度的思想,针对每一个目标点都能自适应地计算出从目标点出发构建示踪云模板和搜索区域各自所需的四个方向上的扩展量。该算法通过引入梯度思想自适应构建示踪云模板和搜索区域的大小,提高了像素块的匹配质量,后面进行了相关结果的讨论。

第四问中论文通过灰度与温度的关系、温度与压强的关系建立起了灰度与压强的直接关系,从而通过给定区域的灰度值得到了相应的压强信息。

## 四、问题一的求解:

问题要求建立视场坐标换算模型,分以下四步完成:

- 1) 数据预处理,检查、剔除明显不合理数据,利用插值的方法填充趋势的数据;找到卫星探测边缘对应的像素行列号。
- 2) 根据同步气象卫星的视成像原理,建立同步气象卫星云图像素的直角坐标和视地理坐标转换的理论模型,推导出其转换关系。
- 3) 根据转换关系,计算灰度矩阵中的第 451 行至 550 行,第 451 列至 550 列,对应的经纬度坐标。并在论文中给出第 500 行和第 500、501、502 列三个交叉点处对应的经纬度。
- 4) 根据卫星云图像素的直角坐标和视地理坐标的逆转换关系,求出海岸线经纬度对应的像素直角坐标,添加到卫星云图上。

### 4.1 数据预处理

① 检查三个灰度矩阵 IRI\_2030.mat,IRI\_2100.mat,IRI\_2130.mat 数据,剔除明显突变的不合理数据。

② 卫星探测边缘对应的像素行列号:

### 4.2 地理坐标与像素直角坐标间转换模型的建立

#### 4.2.1 涉及地理概念介绍

##### 1) 纬度的定义和分类

① 纬度的定义:纬度是指地球上某点的垂线方向与赤道平面的夹角。根据垂线的不同种类有多种纬度定义。常用的定义有以下 4 种:

② 地心垂线与地心纬度:从地球表面某点到地心之间的连线为地心垂线。它与赤道平面的夹角就是地心纬度。

③ 引力垂线和引力纬度:地球表面某点的质量与所受地球引力方向线叫引力垂线。它与赤道平面的夹角就是引力纬度。引力垂线一般不经过地心,但差别较小,一般不用它。它可能对卫星的定位有影响。

④ 地理垂线和地理纬度:地球表面某点的法线方向线叫地理垂线,也叫测地垂线。它与赤道平面的夹角就是地理纬度,也叫测地纬度。

⑤ 重力垂线和重力纬度:地球表面某点实际重力作用的方向线叫重力垂线,它与该点的水准面垂线。它与赤道平面的夹角就是重力纬度。因为受到天文因素

的影响，也可以用天文方法测出该纬度，因为也叫天文纬度。天文纬度与地理纬度的差别也不大。

虽然纬度的定义有多种，但是它们是针对不同的用途和研究问题的方便而定义的，而它们之间也确实存在差异。在大地测量、地图绘制、精确导航和定位中，都使用地理纬度。本文使用的纬度也是地理纬度。

## 2) WGS-84 坐标系

WGS-84 坐标系是美国 1984 年制定并启用的全球大地坐标系。该标准的坐标系把地球看做一个椭球体，每一个子午圈平面都是椭圆，长半轴  $R_e$  是赤道平面半径，短半轴  $R_p$  是南北极轴上得地球半径  $R_e = 6378.137km$ ，地球南北向轴半径  $R_p = 6356.753km$ 。扁率  $e = \frac{R_e - R_p}{R_e} = \frac{1}{298.266788}$  等。

## 3) 地理坐标

太空探测器所探测的三维地表地理位置就是由上述子午线坐标点所组成的集合，并把探测到的三维地表坐标转换成二维平面直角坐标或者转换成二维平面上的地理坐标，以获得各种比例（分辨率）的探测图片。就地球同步气象卫星而言，轨道在地球的赤道上，轨道周期与地球同步，所以它探测的地球表面是固定的区域，所获得图像就是该区域某分辨率的云图，云图上所标识的像素直角坐标就是卫星所“看到”的子午线坐标的集合，本文中使用  $P_x$ 、 $P_y$  来表示（见图 4.1）。

像素的直角坐标所对应的地理坐标就是经纬度坐标。从图 4.1 可得：经纬度地理坐标是三维球面坐标经点射线源投影后，在平面上形成的二位坐标。

## 4) 卫星云图

同步气象卫星是按“数字化”方式扫描大气层的，就是根据最低分辨率把能够识别的地表最小面积形成一个最小识别单位，这就代表一个像素点，把连续扫描的全部面积单位排列成一条像素数据链，再按固定行列宽“折叠”成一张完整的图像，这就是我们常见的数字化卫星云图。

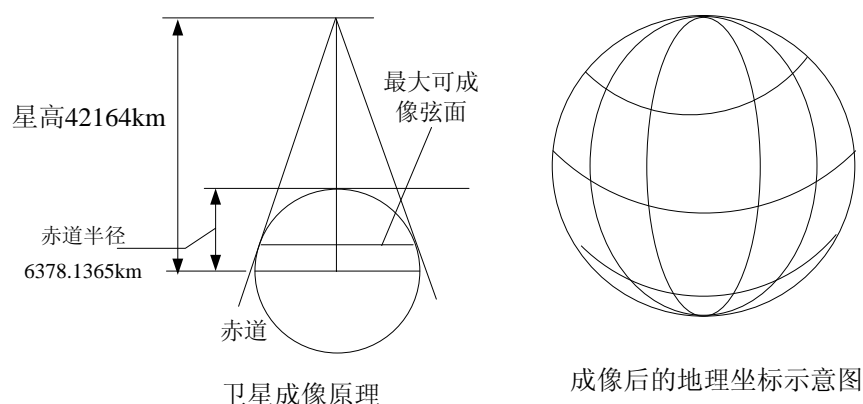


图 4.1 同步气象卫星的成像原理和地理视坐标原理

#### 4.2.2 子午圈直角坐标与纬度的对应关系

在子午圈平面直角坐标系中，原点在地心，而非地理中心，横坐标在赤道的法线方向，纵坐标是极轴，指向正北，按照 WGS-84 坐标系模型的规定，子午圈平面都是椭圆平面。根据椭圆方程的定义，可导出地区表面任意点  $C(x,y)$  的直角坐标与纬度  $\phi$  的关系（见图 4.2）。

对椭圆方程  $\frac{x^2}{R_e^2} + \frac{y^2}{R_p^2} = 1$  求微分，得  $\frac{dy}{dx} = -ctg\phi = -\frac{R_p^2}{R_e^2} \cdot \frac{x}{y}$ ，带入椭圆度

$e = \frac{R_e - R_p}{R_e}$  得：  $\frac{y}{x} = (1-e)^2 tg\phi$ ，回带入椭圆方程得：

$$\text{横坐标: } x = \frac{R_e}{\sqrt{(1-e)^2 \cdot tg^2\phi + 1}} \quad (4.1)$$

$$\text{纵坐标: } y = \frac{R_e \cdot (1-e)^2 tg\phi}{\sqrt{(1-e)^2 tg^2\phi + 1}} \quad (4.2)$$

上述二式就是 WGS-48 坐标系中子午面上地表任意一点的直角坐标与纬度的对应关系，当然它们适用于任意子午线。

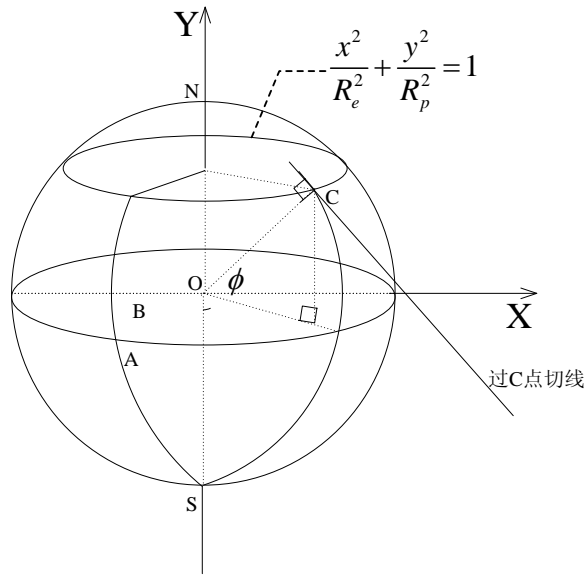


图 4.2 地球表面任意点  $C(x,y)$  的直角坐标与纬度  $\phi$  的关系

#### 4.2.3 地理坐标与像素直角坐标的几何模型

图 4.3 是一维地理坐标成像原理。半视宽  $AD$ （常数），在视距  $PA$ （常数）增加  $AB$  后，在  $AD$  上得像为  $AE$ 。由三角函数关系可得， $AE$  与  $AB$  的对应关系

是：  $\frac{AE}{AD} = \frac{PA}{PA + AB}$

对三维地球表面上任意点  $C$ ，见图 4， $P$  是同步气象卫星， $A$  是星下点。图中  $OA = R_e$ ,  $OC = R$ , 则三维球面坐标的成像原理见图 4.4。

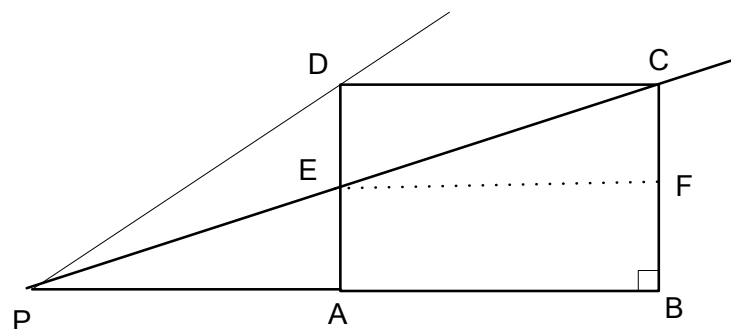


图 4.3 视觉成像原理

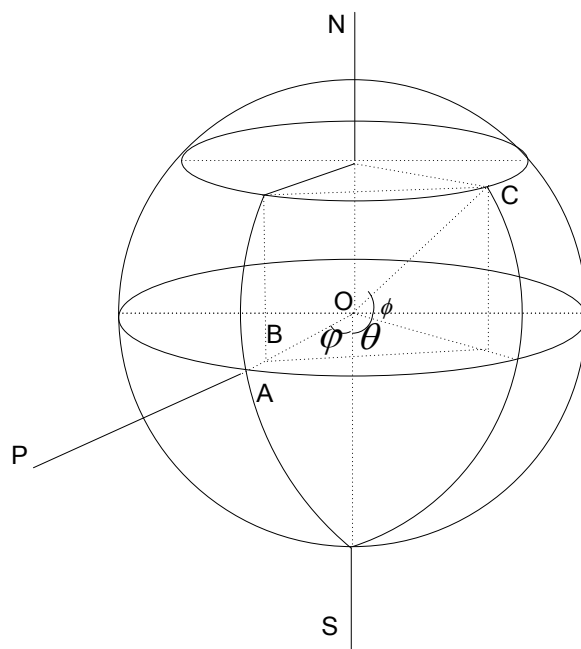


图 4.4 同步气象卫星成像原理

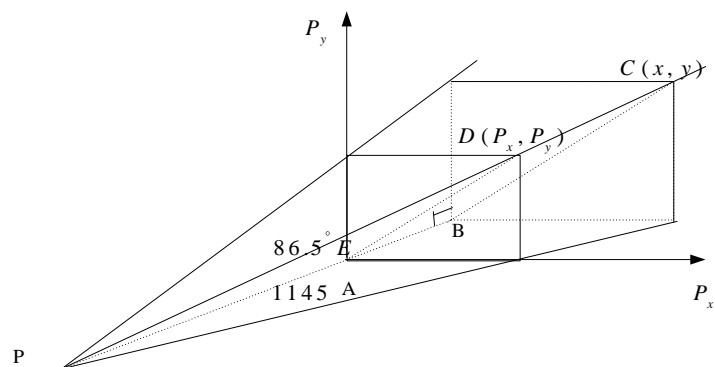


图 4.5 子午线任意点  $C(x, y)$  的视坐标成像原理



图 4.5 中，直角坐标系的原点是星下点 A，横坐标指向正东，纵坐标指向正北且平行于极轴。平面  $p_x A p_y$  是成像面，子午线上任意一点  $C(x, y)$  的像是  $D(p_x, p_y)$ ，在 WGS-84 坐标系中， $C(x, y)$  的坐标值由 (1) 和 (2) 式给出。根据几何相似原理，并考虑到图 4.3 中  $C(x, y)$  坐标在赤道平面和星下点子午面上得投影，不难得到下面的几何相似比例关系：

$$\frac{DA}{CB} = \frac{PA}{PB} = \frac{h}{h + R_e - x \cdot \cos(\varphi - \theta)} \quad (4.3)$$

式中  $\theta$  是星下点的经度， $\varphi$  是  $C$  点子午线经度。星高  $h = PA$ 。在图 4.3 和图 4.4 中，根据几何相似比例关系：

$$\frac{P_x}{x \cdot \sin(\varphi - \theta)} = \frac{h}{h + R_e - x \cdot \cos(\varphi - \theta)} \quad (4.4)$$

$$\frac{P_y}{y} = \frac{h}{h + R_e - x \cdot \cos(\varphi - \theta)} \quad (4.5)$$

变换后：

平面直角横坐标：

$$P_x = \frac{h \cdot x \cdot \sin(\varphi - \theta)}{h + R_e - x \cdot \cos(\varphi - \theta)} \quad (4.6)$$

平面直角纵坐标：

$$P_y = \frac{h \cdot y}{h + R_e - x \cdot \cos(\varphi - \theta)} \quad (4.7)$$

则可知：

$$\frac{P_x}{P_y} = \frac{x \cdot \sin(\varphi - \theta)}{y} = \frac{\sin(\varphi - \theta)}{(1 - e)^2 \tan \phi} = \frac{R_e^2 \cdot \sin(\varphi - \theta)}{R_p^2 \cdot \tan \phi} \quad (4.8)$$

将 (1)、(2) 式代入 (6)、(7) 式，化简后得：

平面直角横坐标：

$$P_x = \frac{h \cdot \sin(\varphi - \theta)}{\frac{\sqrt{(1 - e)^2 \tan^2 \phi + 1}}{\sin \alpha_e} - \cos(\varphi - \theta)} \quad (4.9)$$

平面直角纵坐标：

$$P_y = \frac{h(1 - e)^2 \tan \phi}{\frac{\sqrt{(1 - e)^2 \tan^2 \phi + 1}}{\sin \alpha_e} - \cos(\varphi - \theta)} \quad (4.10)$$

式中  $\alpha_e$  是同步卫星扫描地球时东西向的最大可视半角。

$$\alpha_e = \arcsin \frac{R_e}{R_e + h}$$

这就是地理坐标与与像素平面直角坐标的转换关系。当  $\theta < \varphi < 180^\circ$  或  $\varphi > 180^\circ$ （西经）时， $p_x \geq 0$ ，否则， $p_x < 0$ 。对于  $p_y$ ，北纬时  $p_y \geq 0$ ，南纬时， $p_y \leq 0$ 。

(4.9)、(4.10) 式等号右边除经纬度外，其他的都是常量，这说明在 WGS-84 坐标系下，同步气象卫星云图的像素直角坐标仅与地理坐标有关，与子午圈的半径无关。需要特别说明的是， $p_x$  和  $p_y$  的原点在云图的几何中心，也就是像素链的中间点。按照 (4.9)、(4.10) 式，只要知道地理坐标，就可以确定该店在像素数据链中的位置，反之，也可以根据像素在像素数据链中的位置。

在卫星云图上， $p_x$  和  $p_y$  是无量纲的像素点的坐标值，按照 (4.9)、(4.10) 式中，卫星高度  $h$ 、赤道半径  $R_e$  的单位用无量纲的像素数表示。

$R_e$  的无量纲像素表示即指在像素直角坐标系中地球赤道上的点距离坐标原点的像素点的个数。

#### 4.2.4 像素平面直角坐标与地理坐标之间的逆转换关系

由 (4.8) 式可得：

$$\tan \phi = \frac{\sin(\varphi - \theta)}{(1-e)^2} \cdot \frac{p_y}{p_x} \quad (4.11)$$

则可得：  $\phi = \arctg \frac{p_y \sin(\varphi - \theta)}{p_x (1-e)^2}$

由 (4.9) 式可得：

$$p_x \left[ \frac{\sqrt{(1-e)^2 \tan^2 \phi + 1}}{\sin \alpha_e} - \cos(\varphi - \theta) \right] = h \cdot \sin(\varphi - \theta) \quad (4.12)$$

令  $\beta = \varphi - \theta$ ，将 (4.11) 式带入 (4.12) 式，得：

$$(1-e)^2 p_x^2 + p_y^2 \cdot \sin^2 \beta = \sin^2 \alpha_e \cdot (1-e)^2 (h \sin \beta + p_x \cdot \cos \beta)^2 \quad (4.13)$$

令  $k = \sin^2 \alpha_e \cdot (1-e)^2$ ，整理得：

$$2(p_x^2(1-e)^2 - kp_x^2) - (kh^2 - kp_x^2 - p_y^2) = 2khp_x \sin 2\beta - (kh^2 - kp_x^2 - p_y^2) \cos 2\beta \quad (4.14)$$

令  $a = 2khp_x$ ， $b = kh^2 - kp_x^2 - p_y^2$ ， $c = 2(p_x^2(1-e)^2 - kp_x^2) - (kh^2 - kp_x^2 - p_y^2)$ ，

得：  $a \cdot \sin 2\beta - b \cdot \cos 2\beta = c \quad (4.15)$

$$\text{令 } \cos \omega = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad \sin \beta = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

$$\text{得:} \quad \sin(2\beta - \omega) = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4.16)$$

由  $\varphi = \beta + \theta$  得经纬度的坐标变换公式:

$$\varphi = \frac{1}{2} \left( \arcsin \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} + \arctg \frac{b}{a} \right) + \theta \quad (4.17)$$

纬度计算表达式:

$$\phi = \arctg \frac{p_y \sin(\varphi - \theta)}{p_x (1 - e)^2} \quad (4.18)$$

其中:

$$k = \sin^2 \alpha_e \cdot (1 - e)^2$$

$$a = 2khp_x$$

$$b = kh^2 - kp_x^2 - p_y^2$$

$$c = 2(p_x^2(1 - e)^2 - kp_x^2) - (kh^2 - kp_x^2 - p_y^2)$$

(4.17) 式和 (4.18) 式就是图像平面直角坐标转换为地理坐标的关系式。式中  $p_x$

和  $p_y$  是像素坐标值, 其余为常数。

### 4.3 问题一模型求解

①利用此换算关系, 计算得出题目要求的灰度矩阵中第 451 行至 550 行, 第 451 列至 550 列所对应的经纬度, 详见附件 jwd.txt。

②利用此换算关系, 灰度矩阵中第 500 行和第 500、501、502 列三个交叉点处对应的经纬度表如下 (表 4.1):

表 4.1 第 500 行和第 500、501、502 列三个交叉点处对应的经纬度

	500 行 500 列	500 行 501 列	500 行 502 列
维度	31.1649	33.1596	33.1543
经度	46.0238	46.1094	46.1949

### 4.4 绘制卫星云图及添加海岸线

首先利用地理坐标系和像素直角坐标系的转换公式, 求出所有海岸线的地理坐标对应的像素直角坐标, 然后, 在卫星云图的灰度矩阵中寻找并标记这些点, 赋予这些点不同其他点的颜色, 如本文中把海岸线标记为蓝色, 最后绘制带有海

岸线的卫星云图（见图 4.6）。（使用的数据源为卫星灰度矩阵 IRI\_2100.mat），同时添加海岸线的卫星云图已按要求保存为附件 spic.pdf。

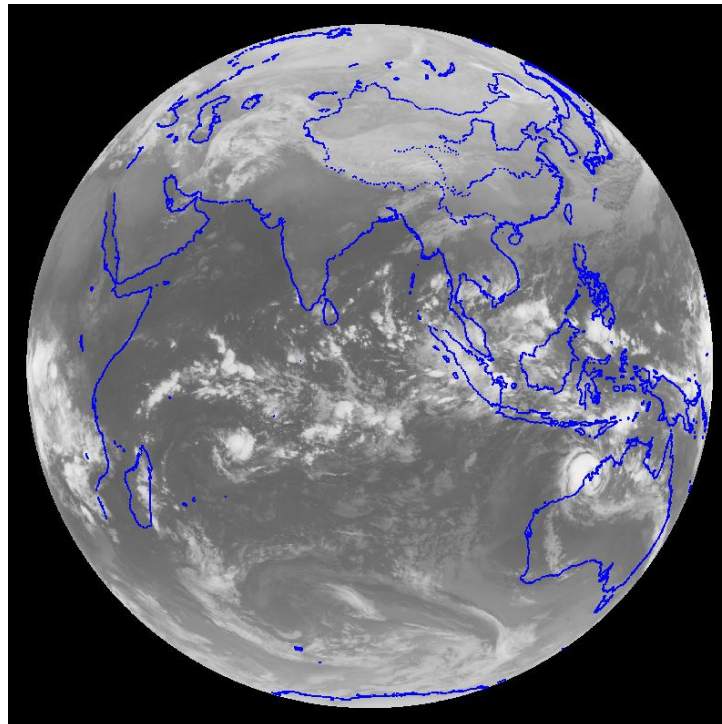


图 4.6 添加海岸线的卫星云图

## 五、问题二的求解

### 5.1 问题二的求解思路

问题二要求充分利用卫星图像数据及其特点建立尽可能准确地描述实际风矢场的度量模型和算法，即利用卫星云图实现反演云迹风。

云迹风是指在连续几幅静止气象卫星云图上追踪图像上示踪图像块（简称示踪云）的位移，并计算示踪云所代表的云的移动方向和移动速度，从而实现风矢场的反演。

本文利用三幅卫星灰度矩阵来进行云迹风反演方法的研究，其中包括云图数据预处理、示踪云选取、两幅图像的匹配算法和云导风矢量的计算。

首先对云图数据进行检查，剔除明显突变不合理的数值，利用插值的方法填充空缺数据。所给数据源很准确，没有出现明显错误值或数据缺失的现象。然后通过坐标变换，将题目中要求的南纬 40 度至北纬 40 度，东经 46 度至 126 度范围内各整数经纬度变换为云图上的像素直角坐标。利用经过上述处理的连续三幅图像，先在第二幅图像中确定示踪云，即确定搜索窗口，在第一幅和第三幅图像中确定搜索范围，在搜索范围内进行图像的灰度匹配。本文采用最大交叉相关系数法（MCC: maximum cross-correlation coefficient），分别在第一和第三幅图像中找出最大交叉相关系数值所在的位置。该位置被认定为示踪云在上一时刻和下一时刻所在的位置，进而计算得到相对前一时刻和下一时刻的风速值和风向，前后

时刻计算结果的平均值作为示踪云的云导风矢量。

问题二要求建立风矢场的度量模型，分以下三步完成：

- ① 数据处理：对题目要求的计算范围进行坐标变换，得到范围内各整数 经纬度对应的像素直角坐标。
- ② 利用最大交叉相关系数（MCC）法，构建风矢场度量模型；
- ③ 利用计算机编程实现度量模型，计算题目中要求的南纬 40 度至北纬 40 度，东经 46 度至 126 度范围内各整数经纬度处的二维风矢。

5.2 风矢场度量模型建立

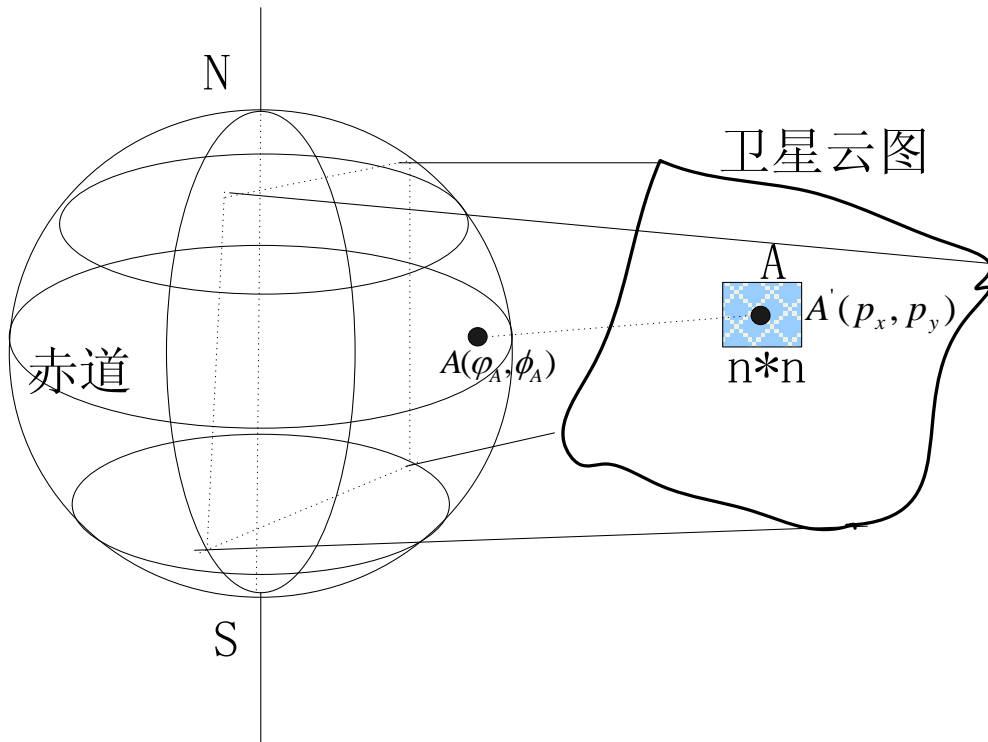
5.2.1 云图数据预处理

1) 检查三幅卫星灰度矩阵数据源，剔除明显突变不合理的数值，利用插值的方法填充空缺数据。经检查，数据源没有出现上述错误现象。

2) 坐标变换：计算出南纬 40 度至北纬 40 度，东经 46 度至 126 度范围内各整数经纬度对应的云图上的像素直角坐标。

5.2.2 示踪云选取

设地球表面一点的视地理坐标为  $A(\varphi_A, \phi_A)$ ，其对应的卫星云图上的像素直角坐标为  $A'(p_x, p_y)$ ，以  $A'(p_x, p_y)$  为中心，在卫星云图上选取一个云块为  $n \times n$  的窗口作为示踪云。具体选取方法如下图（图 5.1、图 5.2）示。



图

5.1 地球表面 A 点在卫星云图上的映射示意图

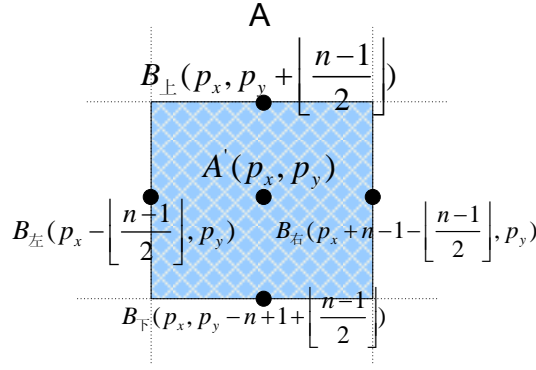


图 5.2 以  $A'(p_x, p_y)$  为中心选取  $n \times n$  的示踪云方法

如图 5.1，地球表面上一点  $A(\varphi_A, \phi_A)$  在卫星云图上的映射为  $A'(p_x, p_y)$ 。以  $A'(p_x, p_y)$  为中心，向左取  $\left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor$ ，向右取  $(n-1 - \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor)$ ，向上取  $\left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor$ ，向下取  $(n-1 - \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor)$ ，然后分别以  $B_{\text{左}}(p_x - \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor, p_y)$ 、 $B_{\text{右}}(p_x + n - 1 - \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor, p_y)$ 、 $B_{\text{上}}(p_x, p_y + \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor)$ 、 $B_{\text{下}}(p_x, p_y - n + 1 + \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor)$  四个点为 midpoint（或离 midpoint 最近的整数点）做直线，组成一个  $n \times n$  的匹配窗口，这就得到了搜索目标：示踪云块，见图 5.2。

### 5.2.3 云迹风的图像匹配算法

#### 5.1.3.1 MCC 算法

云迹风通常追踪图像块（示踪云）在三幅连续云图中的移动来估算风速，其原理如下图（图 5.3）所示，左侧为  $t_0$  时刻的云图， $A$  区域为示踪云块，右侧为  $t_1$  时刻云图，在搜索区域  $C$  中寻找示踪云块在  $t_1$  时刻的位置。

示踪云匹配搜索方法中目前使用较广泛的是最大交叉相关系数（maximum cross-correlation coefficient, MCC）法，即在搜索区域滑动，计算示踪云块（为  $n \times n$  的像素图像块）在目标搜索区（为  $m \times m$  的像素图像块，其中  $m > n$ ）里的交叉相关系数的最大区域即为目标区域，交叉相关系数  $R_1(v, w)$  为

$$R_1(v, w) = \frac{\sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}] [g(i+v, j+w) - \bar{g}]}{\left[ \sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}]^2 \sum_i \sum_j [g(i+v, j+w) - \bar{g}]^2 \right]^{1/2}}$$

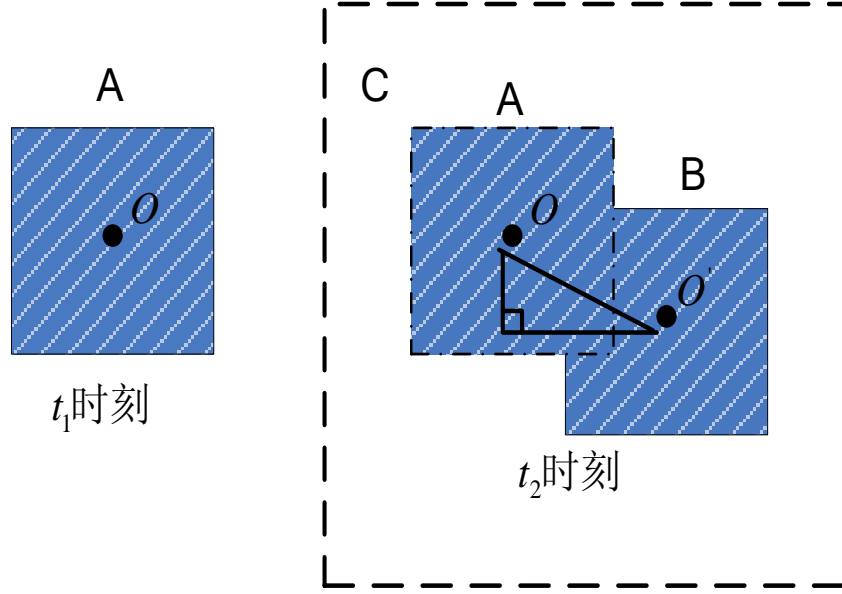


图 5.3 云导风匹配搜索原理示意图

其中  $i, j \in [1, n]$  分别为示踪云模板中的行与列号,  $v, w \in [0, m-n]$  为目标搜索区位移改变量,  $f(i, j)$  为示踪云模板的灰度值,  $g(i, j)$  为目标搜索区云的灰度值,

记  $\bar{f} = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j f(i, j)$  为示踪云的平均灰度,  $\bar{g} = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j g(i+m, j+n)$  为目标搜索区的平均灰度, 其中取  $N = n$ 。

当交叉相关系数取得最大值时, 即在目标搜索区内找到了和示踪云最接近的目标云, 等同于示踪云从  $t_1$  时刻  $O$  点移动了  $t_2$  时刻  $O'$  点, 见图 5.4 所示。

#### 5.2.3.2 本文搜索匹配算法的具体实现

本文中选定的示踪云窗口为  $16 \times 16$  个像素, 即  $n = 16$ ; 采用的搜索范围限定在  $64 \times 64$  个像素点内, 即  $m = 64$ 。

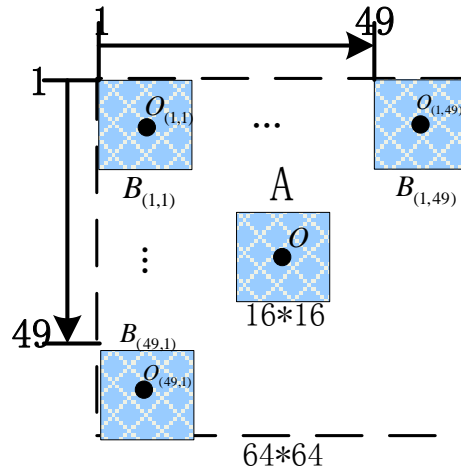


图 5.4 搜索匹配方法示意图

图 5.4 中  $A$  代表  $16 \times 16$  个像素点的踪云块,  $B_{(i,j)}$  为待搜索匹配的云块,  $i, j$  分别代表行数和列数,  $i \in [1, 49], j \in [1, 49]$ , 搜索的范围为  $64 \times 64$  个像素点。

具体搜索步骤:

- ① 在搜索范围区域选取其边缘的第一个点  $C(1,1)$  为  $B_{(1,1)}$  的起点, 然后以向下和向右沿拓 15 个像素点, 组成一个  $16 \times 16$  个像素点的待匹配块;
- ② 完成第一次匹配后, 先以行为移动方向, 待匹配块的起始点向右移动 1 个像素点到达  $C(1,2)$ , 再形成一个  $16 \times 16$  的待匹配块, 进行匹配;
- ③ 完成匹配之后, 待匹配块起始点再向右移动 1 个像素到  $C(1,3)$ , 形成匹配块... 直到完成对  $B_{(1,49)}$  块的匹配, 此时第一行 ( $i=1$ ) 的匹配已经到达了边界, 开始第二行 ( $i=2$ ) 的匹配。
- ④ 第二行 ( $i=2$ ) 的匹配过程重复第一行 ( $i=1$ ) 的方法, 直到完成  $i=49$  行的匹配, 至此, 整个搜索范围已经被全部扫描, 搜索结束。
- ⑤ 总共进行了  $49 \times 49$  次匹配, 形成一个  $49 \times 49$  的相关系数矩阵, 在这个矩阵中找出最大的相关系数, 其横纵坐标即代表和示踪云灰度最接近的云块, 示踪云块的中心和这个云块的中心的连线  $OO_{(i,j)}$  即为风矢量。

#### 5.2.4 云迹风矢量的计算

当最大相关系数取得时, 目标搜索区内相对于示踪云在  $P_x, P_y$  方向上分别移动了  $v$  和  $w$  个像素点, 根据问题一中建立的地球经纬度坐标和像素直角坐标的转换关系, 可计算出目标云相对于示踪云在地球表面的位移量, 除以两幅图像的观测时间间隔可得到风矢量。

##### 5.2.4.1 地球半径表达式的推导

考虑地球是一个椭球, 地球半径在各个纬度上是不相同的。下面给出地球半径表达式的推导过程。地球子午面上的椭圆方程可以表示为:

$$\frac{x^2}{R_e^2} + \frac{y^2}{R_p^2} = 1 \quad (5.1)$$

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地球的半径, 且  $R_e = 6378136.5m$ ,  $R_p = 6356751.8m$ , 那么地球的偏心率为:

$$\varepsilon^2 = 1 - (R_p / R_e)^2 \approx 0.006739502 \quad (5.2)$$

若子午线上任意一点的地心纬度为  $\varphi$ , 则这一点与地心连线的方程为:



$y = x \cdot \tan \varphi$ ，将此式代入上面的椭圆方程可得到地心纬度  $\varphi$  处地球的半径为

$$r = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} = R_p \left[ (1 + \tan^2 \varphi) / (1 + \tan^2 \varphi - \varepsilon^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

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

#### 5.2.4.2 风矢量的求解

假设示踪云的  $t_1$  时刻的初始位置为  $A(\varphi_A, \phi_A)$  和搜索到的目标云块中心位置为  $B(\varphi_B, \phi_B)$ ，即在  $t_2$  时刻，示踪云移动了  $B(\varphi_B, \phi_B)$ 。风速即为  $AB$  两点的球面距离除以移动时间  $t_2 - t_1$ ，风向为由  $A$  点指向  $B$  点，具体表示为从正北方顺时针方向量得的角度。

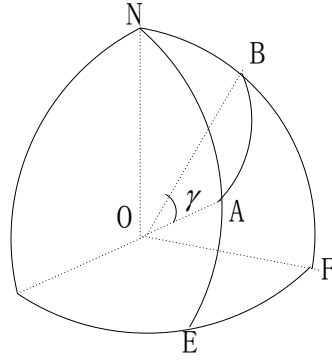


图 5.5 地球球面上  $A$ 、 $B$  两点之间的位移示意图

图 5.5 为地球表面上  $A$ 、 $B$  两点之间的位移图示，其中：

$$ON = OA = OB = OE = OF = R, \angle NOA = 90^\circ - \varphi_A, \angle NOB = 90^\circ - \varphi_B,$$

$\angle N = \angle EOF = \phi_B - \phi_A = \Delta \phi, \gamma = \angle AOB, \angle A = \text{球面角 } NAB, \angle A \text{ 即为所求}$ 。对于球面三角形  $NAB$ ，由球面三角形余弦定理可得：

$$\cos(\gamma) = \sin(\varphi_A) \sin(\varphi_B) + \cos(\varphi_A) \cos(\varphi_B) \cos(\Delta \lambda) \quad (5.4)$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left[ \sin(\varphi_A) \sin(\varphi_B) + \cos(\varphi_A) \cos(\varphi_B) \cos(\Delta \lambda) \right] \quad (5.5)$$

$$AB = r\gamma, \text{ 风速 } V_{\text{风}} = r\gamma / \Delta t \quad (5.6)$$

$\Delta t$  为前后两张云图的扫描时间之差，再由球面三角余弦定理得：

$$\cos(90^\circ - \varphi_B) = \cos(\gamma) \cos(90^\circ - \varphi_A) \cos(A) \quad (5.7)$$

$$\cos(A) = [\sin(\varphi_B) - \cos(\gamma) \sin(\varphi_A)] / [\sin(\gamma) \cos(\varphi_A)] \quad (5.8)$$

$$A = \cos^{-1} \left[ (\sin(\varphi_B) - \cos(\gamma) \sin(\varphi_A)) / \sin(\gamma) \cos(\varphi_A) \right] \quad (5.9)$$

若  $\phi_B > \phi_A$ ，则风向为：
$$\theta_{\text{风向}} = A$$

若  $\phi_B < \phi_A$ ，则风向为：
$$\theta_{\text{风向}} = 360^\circ - A \quad (5.10)$$

综上所述，由公式（5.6）、（5.10）可得计算风矢量的速度和方向。

为了提高云到风反演的准确性，可以考虑把第一、二幅图求得的风速和风向和第二、三幅图求得的风速和风向进行求平均，用得到的平均值作为最后的风速和方向。但在本文中只使用第二、三幅图求得的风速和方向作为第二幅图的风矢量参数，第一、二幅图求得的风矢量只是作为连续性和一致性的检验的参考。

说明：在计算机上建立此风矢量模型时，考虑到实现的原因，没有采用严格计算示踪云中心和匹配块中心的球面距离，而是使两个中心相差的像素点 $\times$ 分辨率得到在地球表面的实际距离。

### 5.3 问题二模型求解

根据建立的风矢量度量模型，计算 21:00 时刻在南纬 40 度至北纬 40 度，东经 46 度至 126 度范围内各个（整数）经纬度处的二维风矢。

计算结果：

- ① 经计算上述范围内非零风矢的个数为：5734。
- ② 在纬度 26 度，经度分别是 52,53,54,57,58（度）处的风矢表（表 5.1）：

表 5.1 纬度 26 度，经度为 52,53,54,57,58（度）的风矢

纬度	经度	角度（北顺）	速度（米/秒）	压强（毫巴）
26	52	243.43	68.32	750.00
26	53	71.57	17.57	700.00
26	54	90.00	19.44	450.00
26	57	-1.00	0.00	650.00
26	58	108.43	8.78	800.00

示踪云模板的窗口大小指的是能表征以目标点为中心的特征图像模块的最小尺寸，即认为至少需要用这个窗口大小的图像来表征目标点的图像特征。而搜索范围的窗口大小指的是能够对示踪云模板进行有效的图像匹配的最小区域，即至少需要在这个窗口大小的图像区域中才能找到示踪云模板的有效匹配结果。

## 六、问题三的求解

### 6.1 基于图像灰度和梯度信息的自适应 MCC 算法的提出

前一节中介绍了现在在示踪云追迹方法中目前使用最多的最大交叉相关系数（MCC）法，虽然 MCC 在图像特征识别等领域中已经被证明具有较好的效果和可靠性，但是将对示踪云模板和搜索范围分别限定为 16\*16 和 64\*64 这一规定会带来明显的缺陷。

传统的 MCC 法固定了示踪云模板和搜索范围的大小，从而在进行计算的时候只利用了图像的灰度信息，并没有利用图像的梯度信息，而图像的梯度信息会

直接影响到正确的搜索范围的大小进而影响到图像匹配的相似程度。所以要更精确地对示踪云进行追迹,可以考虑利用图像的梯度信息自适应地构建示踪云模板和搜索范围,然后再在搜索范围内利用 MCC 算法对示踪云模板进行特征匹配,从而确定示踪云中心移动后的坐标。

这里提出一种自适应确定示踪云模板和搜索范围的算法,该算法基于图像的灰度信息和梯度的思想,通过与传统 MCC 算法的结果进行对比可知该算法能够得到较好的匹配效果。

## 6.2 自适应 MCC 算法的原理和实现步骤

设根据时间先后得到两幅连续的卫星云图 Image1 (图 6.1) 和 Image2 (图 6.2), 在 Image1 设有一点  $o1(x, y)$  是需要进行追踪的中心, 现在需要通过算法确定  $o1(x, y)$  经过一段时间的运动后在 Image2 上最可能的位置  $o2(x2, y2)$ 。这个任务将分以下几步逐渐完成:

**第一步**、如图 6.1 所示, 现在 Image1 中取以  $o1$  为中心的  $15*15$  的一个窗口, 取此窗口的平均灰度值 Match\_avg。

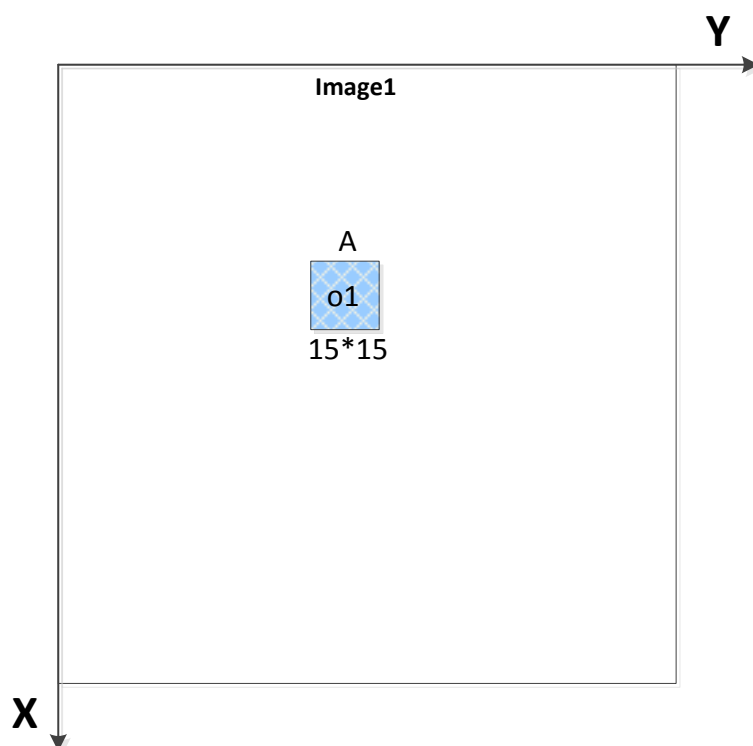


图 6.1 卫星云图 Image1

传统的 MCC 算法将示踪云模板定位  $16*16$ , 这里参照  $16*16$ , 取  $15*15$  的窗口计算 Match\_avg, 以 Image1 上  $o1$  点的灰度值和 Match\_avg 作差的绝对值为阈值 Threshold。Threshold 是进行窗口大小的自适应判断的重要参数。

若  $o1$  周围的某点  $ox$  和  $o1$  灰度值之差的绝对值超过  $k\_match * Threshold$  的时候, 就认为这一点与  $o1$  所在的示踪云模板差别太大, 则判定  $ox$  不属于中心  $o1$  所在的示踪云模板。但是在进行判定的时候如果要对  $o1$  周围各个方向的点都进行判定的话, 一方面增加了运算量, 更重要的是最终得到的以  $o1$  点为中心的示踪云模板是一个不定型的区域, 对这样的区域很难用统一的方法在 Image2 上

进行特征匹配。所以折中的思想是确定以  $o1$  中心的上、下左、右四个方向的示踪云模板的有效范围，这将在第二步中完成。

**第二步**、如图 6.2 所示，现在通过计算获得  $o1$  中心的上、下、左、右四个方向的示踪云模板的有效范围，分别是  $Up\_match$ 、 $Down\_match$ 、 $Left\_match$ 、 $Right\_match$ 。

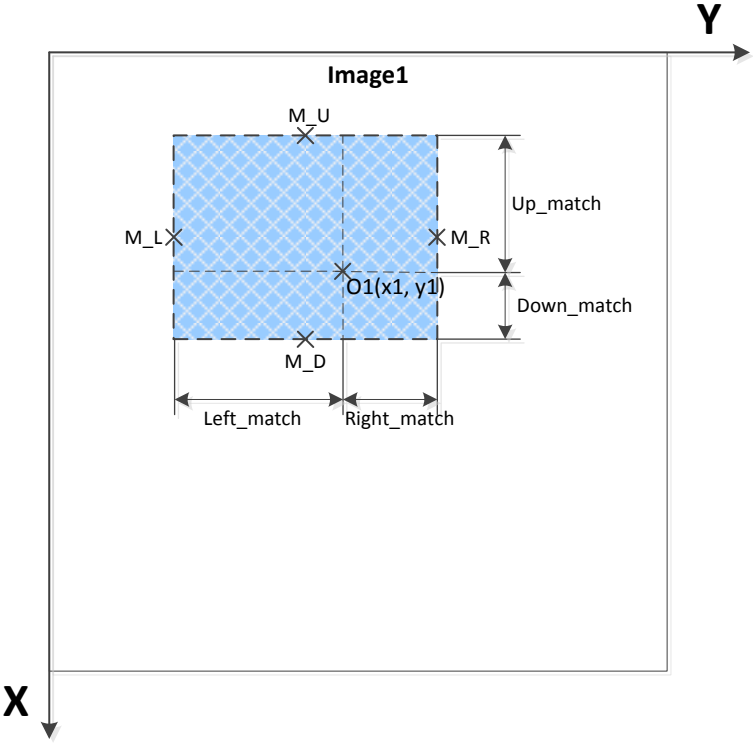


图 6.2 卫星云图 Image2

获取  $Up\_match$ 、 $Down\_match$ 、 $Left\_match$ 、 $Right\_match$  这四个值的思想完全一样，这里以  $Up\_match$  为例说明获取的原理。

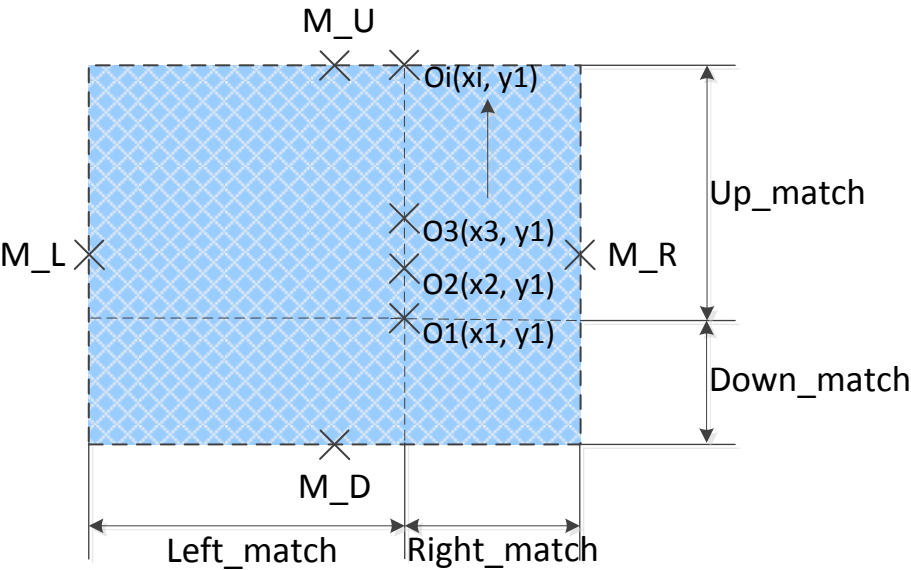


图 6.3 自适应确定示踪云有效范围示意

如图 6.3 所示，在 Image1 上依次取  $o_1$  点正上方的各个点  $o_2$ 、 $o_3$ 、 $o_4$ ... $o_i$ ，将每个点和  $o_1$  进行灰度值作差得到  $Up\_minus$ ，显然，如果  $Up\_minus$  的绝对值不超过  $k\_match * Threshold$ ，那么就认为该点在示踪云的有效范围内（本文在构建示踪云模板时  $k\_match$  取 2），。根据这个条件可以找到满足此条件的最“高”的点  $o_i$ ，根据向上移动的次数  $i-1$  就可以算出  $o_1$  上方的示踪云有效范围  $Up\_match$ 。

接下来用完全相同的思想可以获得其他三个方向的示踪云有效范围  $Down\_match$ 、 $Left\_match$ 、 $Right\_match$ 。

按照图 6.3 所示那样根据四个方向的有效范围即可自适应地构建出追迹  $o_1$  所需的示踪云模板，是一个矩形区域。在这个算法中， $o_1$  并不一定在示踪云模板的几何中心上。同时还可以得到示踪云模板四条边界的中点  $M_U$ 、 $M_D$ 、 $M_L$ 、 $M_R$ 。

实际运行时，考虑到一些异常情况，对示踪云模板的自适应构建算法添加了以下规定：

1) 如果  $Up\_match$ 、 $Down\_match$ 、 $Left\_match$ 、 $Right\_match$  四个值的计算结果为 0，就直接赋值为 7（参照传统 MCC 算法得到的）；

2) 如果  $Up\_match$ 、 $Down\_match$ 、 $Left\_match$ 、 $Right\_match$  四个值超过一个上限值  $limit\_match$ ，则直接赋值为  $limit\_match$ 。参照传统的 MCC 算法，这里的  $limit\_match$  定为 8。

在 Image1 中自适应构建示踪云模板完成后，接下来需要在 Image2 中自适应地构建搜索范围，这将在第三步中完成。

**第三步**、如图 6.4 所示，在 Image2 中计算示踪云模板上、下、左、右四个方向的搜索区有效范围，分别是  $Search\_match$ 、 $Search\_match$ 、 $Search\_match$ 、 $Search\_match$ 。

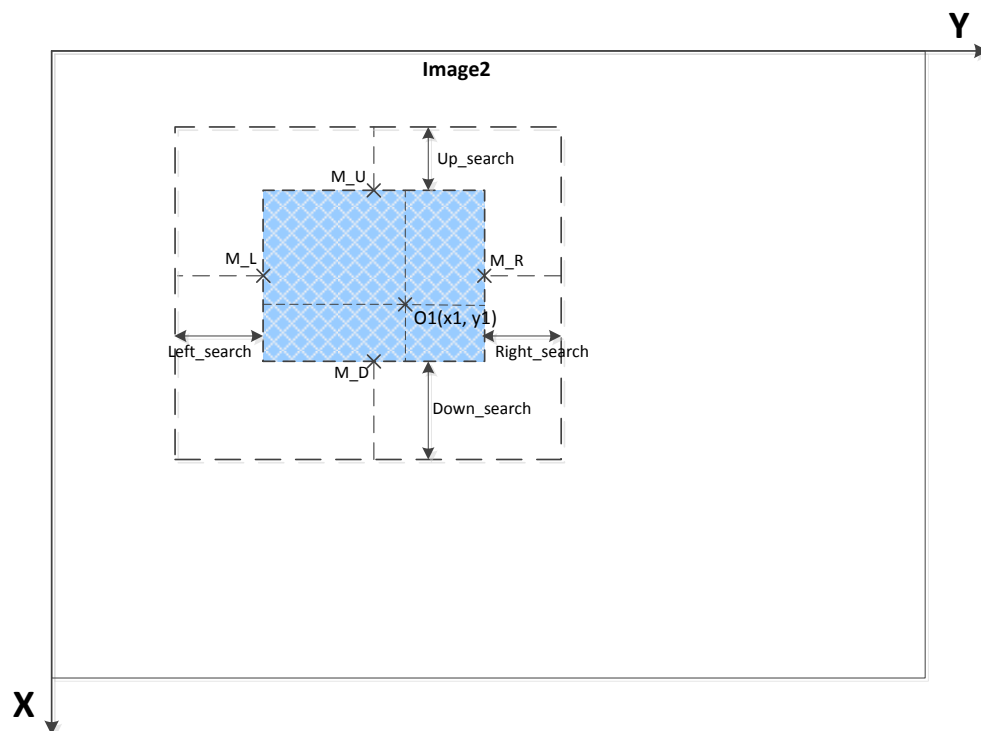


图 4 自适应确定搜索区有效范围示意

这一步中，首先需要将第二步中得到的示踪云模板区域对应到 Image2 中。具体方法在 Image2 中找到  $o1(x1, y1)$ ，然后通过第二步计算出的  $Up\_match$ 、 $Down\_match$ 、 $Left\_match$ 、 $Right\_match$  就可以确定出矩形区域，然后计算出这个矩形区域四条边界的中点  $M\_U$ 、 $M\_D$ 、 $M\_L$ 、 $M\_R$  坐标。

然后由  $M\_U$ 、 $M\_D$ 、 $M\_L$ 、 $M\_R$  这四个点出发，分别向上、下、左、右四个方向的搜索区有效范围。具体做法是首先取得以示踪云模板上边界中点  $M\_U$  为中心的  $15 \times 15$  的平均灰度值，然后对  $M\_U$  点进行类型第二步中对  $o1$  点进行的向上扩展的范围确定，得到  $Up\_search$ 。然后同理对  $M\_D$ 、 $M\_L$ 、 $M\_R$  三个点进行类似的操作，可以得到  $Down\_search$ 、 $Left\_search$ 、 $Right\_search$ 。

所以如图 6.5 所示，在 Image2 中构建的搜索区就应该以  $o1$  为中心，分别向上、下、左、右扩展  $Up\_match+Up\_search$ 、 $Down\_match+Down\_search$ 、 $Left\_match+Left\_search$ 、 $Right\_match+Right\_search$  的一个区域。

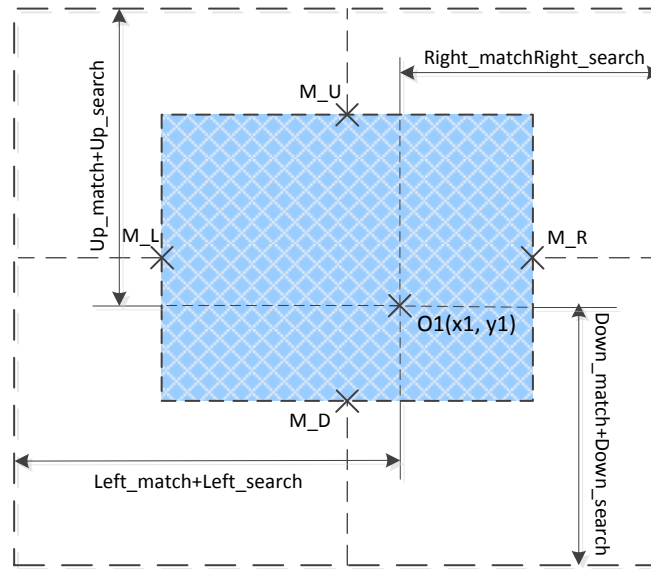


图 6.5 根据灰度梯度信息确定搜索区方法示意

同样地，考虑到实际运行时的一些情况，对搜索区域的自适应构建算法添加了以下规定：

1) 由  $M\_U$ 、 $M\_D$ 、 $M\_L$ 、 $M\_R$  出发计算搜索区域扩展范围的时候，用到的判定值为  $k\_search \times Threshold$ ，其中的  $k\_search$  取值为 3，这是因为搜索区域理论上构建的大一些能得到更准确的匹配结果， $k\_search$  取为 3 就能获得更大的搜索区域。

2) 同样地， $M\_U$ 、 $M\_D$ 、 $M\_L$ 、 $M\_R$  四个值也有一个上限  $limit\_search$ ，当  $M\_U$ 、 $M\_D$ 、 $M\_L$ 、 $M\_R$  大小超过  $limit\_search$  时就直接赋值为  $limit\_search$ 。参考传统 MCC 算法确定的搜索区域大小 ( $64 \times 64$ )，将  $limit\_search$  定为 32。

于是这样就完成了对搜索区域的自适应构建，接下来的一步将在 Image2 中的搜索区域中利用 MCC 算法对 Image1 中的示踪云模板进行匹配，得出 Image1 中的  $o1$  点经过一段时间后在 Image2 上的对应点  $o2$ 。

**第四步**、如图 6.6 所示，在 Image2 中的搜索区域中利用 MCC 算法对 Image1 中的示踪云模板进行匹配，得出 Image1 中的  $o1$  点经过一段时间后在 Image2 上的对应点  $o2$ 。

采用自适应算法构建的示踪云模板和搜索区域都是矩形区域，在搜索区域对示踪云模板进行匹配所采用的算法仍然是 **MCC** 算法。即如图 6 所示的那样，从搜索范围的左上角开始，每次选取大小与示踪云模板相同大小的区域，计算示踪云模板和这个区域的交叉相关系数：

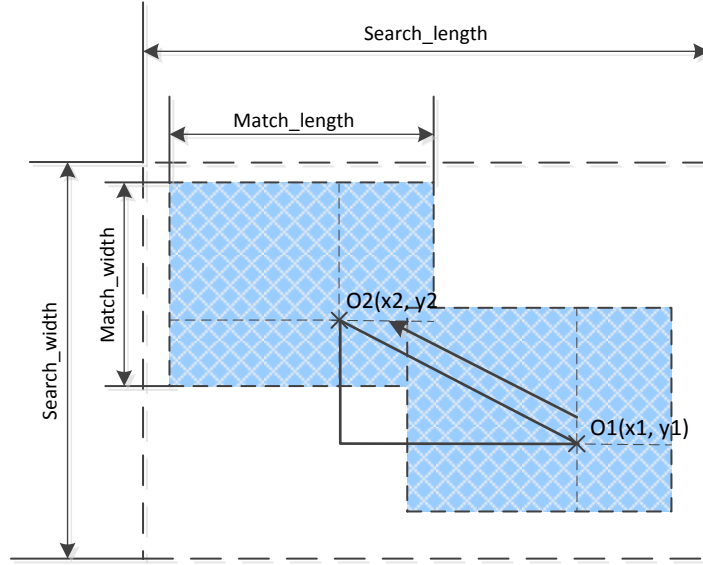


图 6.6 利用 MCC 算法进行示踪云匹配

$$R_i(v, w) = \frac{\sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}] [g(i+v, j+w) - \bar{g}]}{[\sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}]^2 \sum_i \sum_j [g(i+v, j+w) - \bar{g}]^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\bar{f} = \frac{1}{Match\_width * Match\_length} \sum_i \sum_j f(i, j) \text{ 为示踪云模板的平均灰度}$$

$$\bar{g} = \frac{1}{Search\_width * Search\_length} \sum_i \sum_j g(i+v, j+w) \text{ 为搜索区域的平均灰度值}$$

$$i \in [1, Match\_width], j \in [1, Match\_length]$$

$$v \in [0, Search\_width - Match\_width], w \in [0, Search\_length - Match\_length]$$

$$Match\_width = Up\_match + Down\_match + 1$$

$$Match\_length = Left\_match + Right\_match + 1$$

$$Search\_width = Up\_search + Down\_search + 1$$

$$Search\_length = Left\_search + Right\_search + 1$$

由于这里对示踪云模板和搜索区域都是进行了自适应构建，得到的两个矩形区域的长、宽是不定的，所以每一次都必须另行计算，然后利用计算出来的示踪云模板和搜索区域的长、宽来完成 **MCC** 运算。

当取得最大交叉相关系数时，就认为在搜索区域内找到了匹配块，通过匹配块的  $v$ 、 $w$  值就可以计算出匹配块的中心  $o2$  相对示踪云中心  $o1$  在  $x$  和  $y$  方向上位移量，建立适当的地球模型就可以计算出匹配块中心相对于示踪云中心的实际位移量，除以观测两幅图的时间间隔就可以得到 **Image1** 上  $o1$  点在该时刻的风速，结合位移量可以获得 **Image1** 上  $o1$  点在该时刻风速方向（顺北角度）。获得风速和风向后就获得了  $o1$  点的完整风矢。

计算完 o1 点的风矢后，获取 Image 上的下一个需要计算的目标点，进行和 o1 完全相同的运算即可获得新的点的风矢。这样一直往复计算下去至 Image1 上的最后一个目标点，即可获得所有点的风矢。

### 6.3 问题三模型求解

利用基于图像灰度和梯度信息的自适应 MCC 算法，自适应确定示踪云窗口大小和搜索的有效范围，计算在纬度 26 度，经度分别是 52,53,54,57,58（度）处的风矢，结果见下表（表 6.1）：

表 6.1 由自适应算法计算的纬度 26 度，经度 52,53,54,57,58（度）处的风矢

纬度	经度	角度（北顺）	速度（米/秒）	压强（毫巴）
26	52	255.96	68.72	750.00
26	53	80.54	16.90	700.00
26	54	293.20	21.15	450.00
26	57	135.00	3.93	650.00
26	58	90.00	19.44	800.00

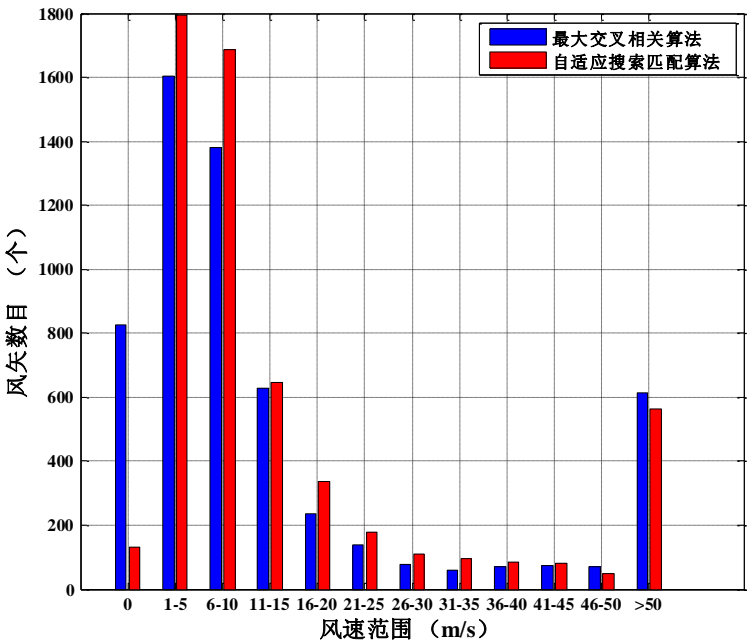


图 6.7 风速分布直方图

从图 6.7 风速分布直方图来看，固定窗口大小的 MCC 算法和自适应窗口大小的 MCC 算法对风速的计算结果在高速风区的统计量很接近，这是很符合实际情况的，因为高速风矢的示踪云具有较为明显的图像特征，可以更为准确地匹配出来；但是自适应窗口法计算结果中的零风矢数远少于固定窗口法计算结果中的零风矢数，而低速风矢数更多，这一点也是符合实际情况的，说明固定窗口法计算出来的很多零风矢在自适应窗口法中被识别为了非零但是速度很低的风矢，说明自适应窗口法能够更精准地进行图形匹配



## 七. 问题四的求解

### 7.1 目标经纬度范围内等压面的获取

为了获得南纬 40 度至北纬 40 度，东经 46 度至 126 度范围内，整数经纬度处的压强值，并且由于已知像素灰度值与温度之间的关系如图 7.1 所示，所以首先应该获取与目标经纬度范围相对应的像素点的灰度值。通过前文介绍的卫星云图像素坐标与地理坐标（即经纬度）之间的对应关系，即获得要求的目标经纬度范围内各点的灰度值。由图 7.1 可以看出，随着卫星云图灰度值的增加（卫星云图上各像素点的灰度值的取值范围为 0 到 1023 之间），对应的温度成单调递减的趋势。通过此对应关系，便可求目标经纬度范围内各点的具体温度值  $T_0$ 。如图

7.2 所示为全球经纬度等压面温度表（即为题目中所提供的 temp3.m 文件），由于此等压面温度表中同一行的纬度相同（共 641 行），而同一列的经度相同（共 1280 列），且相邻两行或相邻两列之间纬度或经度之间的差值  $\Delta\alpha = 0.28125$  度，可知此温度表经度跨越范围为： $\theta_{longitude} = \Delta\alpha \cdot 1280 \approx 360^\circ$ ，即表中从左到右每列对应的经度值从西经 180 度到东经 180 度；而此温度表纬度跨越范围为： $\theta_{latitude} = \Delta\alpha \cdot 641 \approx 180^\circ$ ，即表中从上到下每行对应的纬度值从北纬 90 度到南纬

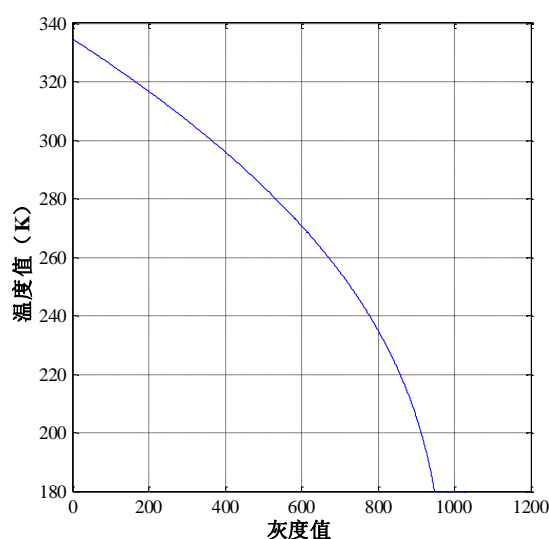


图 7.1 卫星云图温度与像素点灰度值的对应关系

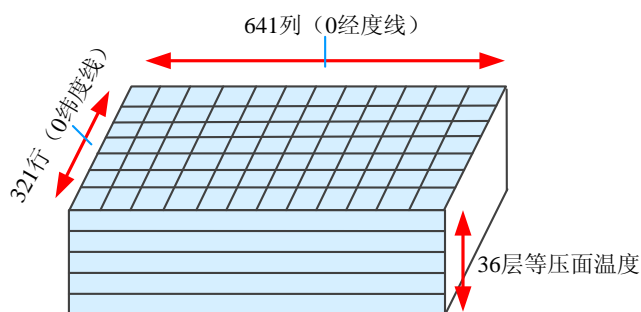


图 7.2 全球经纬度等压面温度对应表

90 度。因此可以确定出在图 7.2 中表示 0 纬线与 0 经线相交的点在第 321 行、641 列的位置（此位置即为温度对应表的地理原点，记作  $g_x = 321$ ,  $g_y = 641$ ）。则要求的南纬 40 度至北纬 40 度，东经 46 度至 126 度范围内整数经纬度点的在图 7.2 中所对应的位置（行标  $N_{row}$  和列表  $N_{col}$ ）可以通过下面的关系得到：

$$\Delta\alpha \cdot (g_x - N_{row}) = \theta_{latitude} \Leftrightarrow N_{row} = Round \left\{ g_x - \frac{\theta_{latitude}}{\Delta\alpha} \right\} \quad (7.1)$$

$$\Delta\alpha \cdot (N_{col} - g_y) = \theta_{longitude} \Leftrightarrow N_{col} = Round \left\{ \frac{\theta_{longitude}}{\Delta\alpha} + g_y \right\} \quad (7.2)$$

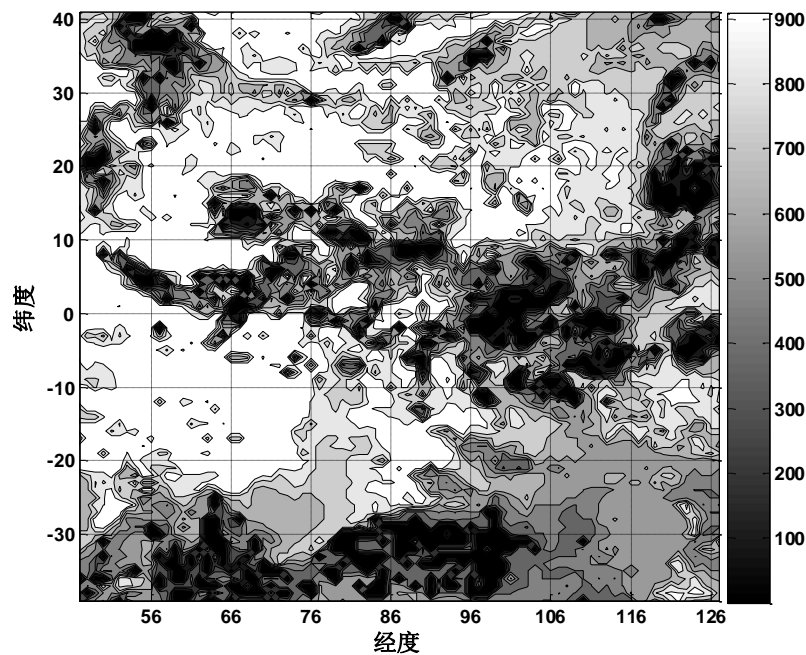


图 7.3 所求经纬度范围等压面灰度图

图 7.2 为 36 层包含了各层等压面上的温度值。将由卫星云图的灰度值根据图 7.1 所对应的温度值  $T_0$ ，与图 7.2 中与之位置相对应的 36 层中各层的温度  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 36$ ) 进行比对，并找出其中与  $T_0$  相差最小的温度值，记下去相应的层号  $i$ ：

$$I = \arg \min_i \{ |T_0 - T_i| \} \quad i = 1, 2, \dots, 36 \quad (7.3)$$

进而，根据层号对照题目所给的对应压强值，即可获得此该目标经纬度点处的压强值。图 7.3 为所求目标经度范围内等压面的灰度图，其中颜色越深所表示的压强越小。并且地球表面的压强比大气层上空的气压要大，所以压强小的地方即为卫星云图上有云层的地方，相反，压强大的地方为卫星云图上没有云的地方。对比图 7.3 与题目所给的卫星云图，可以发现深色和浅色的部分与卫星云图中有云和没云的地方基本对应，因此验证了通过上述过程能求压面的正确性。

## 7.2 卫星云图上风矢的标记

根据题目要求，需要在卫星云图上面标注目标经纬度范围内（南纬 40 度至北纬 40 度，东经 46 度至 126 度）的风矢。针对此问题，在卫星云图某一经纬度的位置处标记风矢时，我们以此经纬度所在的像素坐标为中心，在大小为  $100 \times 100$  像素的框内进行标记。『 F F 三个符号表示风速的大小分别为 0 至 20 m/s，20 至 40 m/s，>40 m/s，并且均表示正北风的方向。由于风矢具有一定的方向，且卫星云图中某一位置处的风矢的方向与云移动的方向相同，所以在卫星云图上标记风矢的时候，还涉及到根据具体风矢的方向，对风矢图标旋转。如图 7.4 a 所示，设原坐标系为  $X-Y$ ，将  $X-Y$  顺时针旋转  $\theta$  后变为了  $X'-Y'$ 。设原坐标系  $X-Y$  下

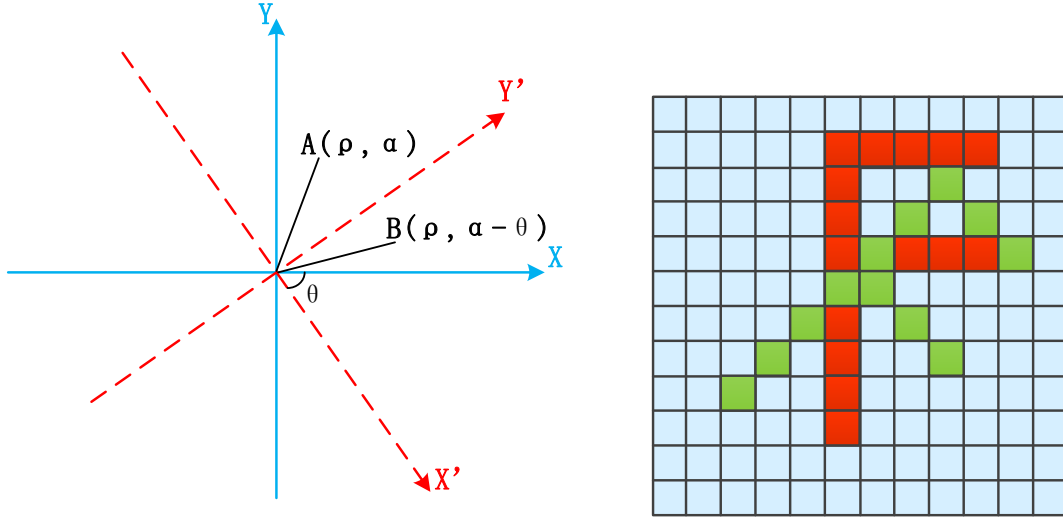


图 7.4 a 坐标旋转原理图 b 坐标旋转示意图

一点  $A$  的极坐标为  $(\rho, \alpha)$ ，顺时针旋转  $\theta$  后到  $B(\rho, \alpha - \theta)$ 。那么在  $X-Y$  坐标系下， $A$  和  $B$  点的  $x$ 、 $y$  坐标分别为：

$$\begin{aligned} x_A &= \rho \cos \alpha \\ y_A &= \rho \sin \alpha \\ x_B &= \rho \cos(\alpha - \theta) = \rho \cos \alpha \cos \theta + \rho \sin \alpha \sin \theta \\ y_B &= \rho \sin(\alpha - \theta) = \rho \sin \alpha \cos \theta - \rho \cos \alpha \sin \theta \end{aligned} \quad (7.4)$$

显然可以在  $A$  和  $B$  点的  $x$ 、 $y$  坐标之间建如下系式——

$$\begin{aligned} x_B &= \rho \cos(\alpha - \theta) = x_A \cos \theta + y_A \sin \theta \\ y_B &= \rho \sin(\alpha - \theta) = -x_A \sin \theta + y_A \cos \theta \end{aligned} \quad (7.5)$$

这便是在直角坐标上的某点以原点为中心顺时针旋转  $\theta$  后得到的新的点的坐标变换公式。根据此公式，知道原来  $A$  点的坐标  $(x_A, y_A)$  和  $\theta$  的具体值就可以计算出旋转后的点  $B$  的坐标  $(x_B, y_B)$ 。

图 7.4 b 所示为风矢标记进行坐标旋转的示意图。要对风矢符号进行旋转，只需根据原来风矢符号上各个点的坐标和该风矢所对应的风向顺北角度，就可以计算出旋转到风矢方向上之后的各个对应点的坐标，再将新的坐标所对应的点显

示出来即可画出所需的风矢符号。

另外,在卫星云图上标记风矢的时候,由于题目所提供的卫星云图为灰度图,若要标记彩色的风矢标记,则需要将卫星云图灰度图转变为 RGB 图。具体操作为取出卫星云图灰度图中各个像素点上的灰度值(取值范围为 0 到 1023),然后将此灰度值除以 1023,再把此结果赋值为该像素点所对应的 R、G、B 三个值即可。在特定位置填充风矢标记是,只需要改变此 RGB 存储的卫星云图相应位置上 R/G/B 对应的值。图 7.5 为最大交叉相关系数算法中,压强小于等于 500 毫巴,非零风矢卫星云图。图 7.6 为最大交叉相关系数算法中,黄色风矢压强小于等于 200 毫巴,红色风矢压强为 250 毫巴到 500 毫巴;绿色风矢压强为 550 毫巴到 600 毫巴。图 7.7 为自适应匹配搜索算法中,压强小于等于 500 毫巴,非零风矢卫星云图。图 7.8 为自适应匹配搜索算法中,黄色风矢压强小于等于 200 毫巴,红色风矢压强为 250 毫巴到 500 毫巴;绿色风矢压强为 550 毫巴到 600 毫巴。我们从几副图中两个比较明显的区域(中国西北与蒙古和澳大利亚西北方向的台风眼),来分析最大交叉相关算法与自适应匹配搜索算法的性能。可以发现,在中国西北与蒙古一带,用最大交叉相关算法所算出的风矢有极大部分方向为正西风,而用自适应匹配搜索算法所算出的风矢方向具有较好的连续性,且体现出与中国实际季风气候相吻合的西北风方向。澳大利亚西北方向的台风眼附近的风矢,最大交叉相关算法中,部分风矢与台风眼中心有明显的偏移,而自适应匹配搜索算法中,风矢基本都在台风正中心附近的位置。

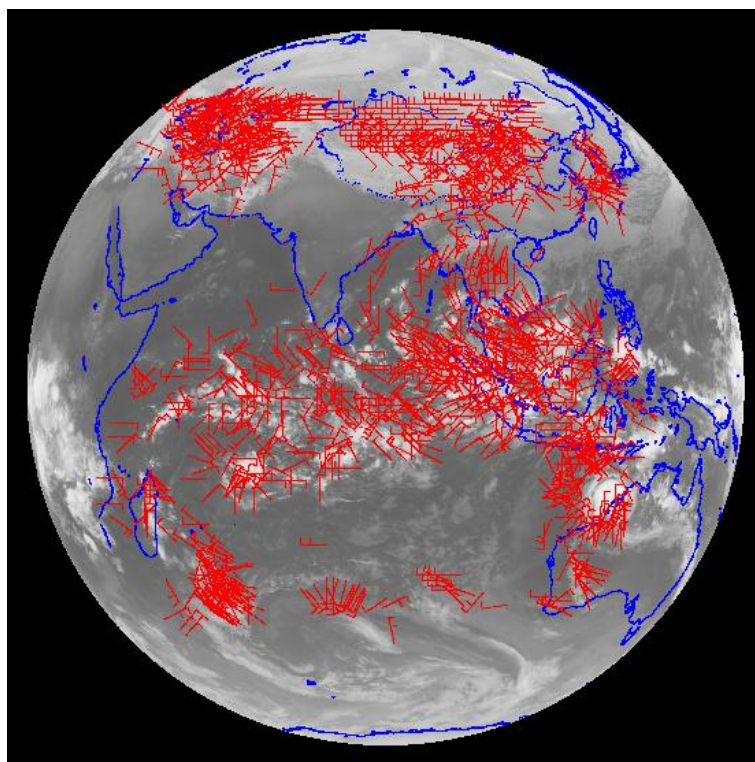


图 7.5 最大交叉相关系数算法压强小于等于 500 毫巴下的风矢量



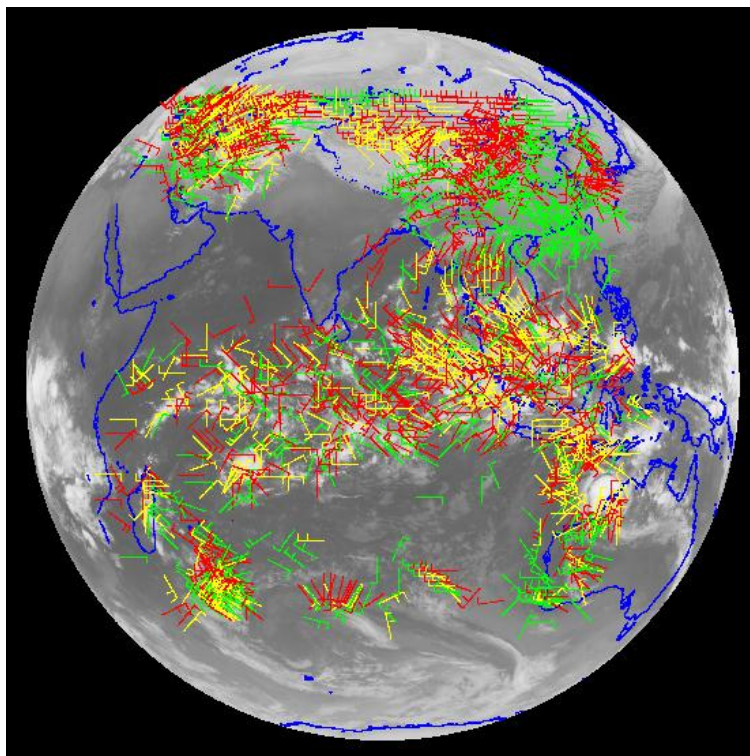


图 7.6 最大交叉相关系数算法在 3 种不同气压条件下的风矢量

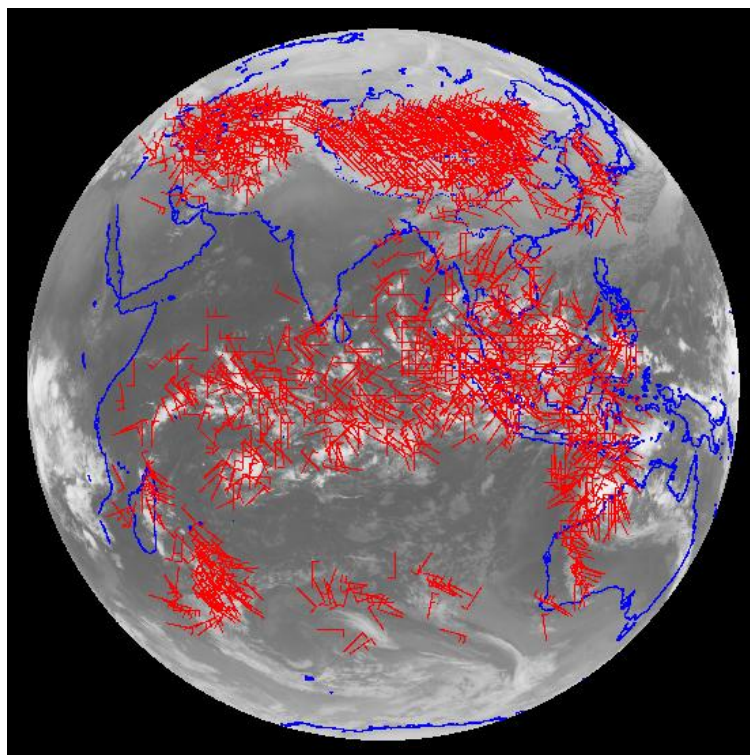


图 7.7 自适应匹配搜索算法压强小于等于 500 毫巴下的风矢量

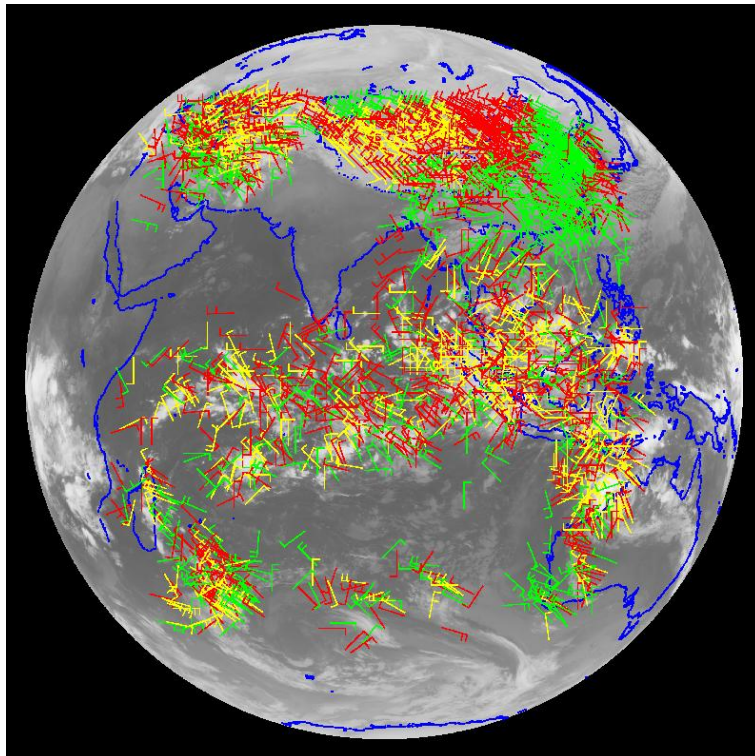


图 7.8 自适应匹配搜索算法在 3 种不同气压条件下的风矢量

### 参考文献

- [1] 张总麟, 惯性导航与组合导航, 北京: 航空工业出版社, 2000
- [2] 董明伦, 周炯, 同步气象卫星视地理坐标与像素直角坐标的转换关系及误差分析, 海洋预报, 第 28 卷第 2 期: 48—54, 2011
- [3] 龙智勇, 石汉青, 黄思训, 利用卫星云图反演云导风的新思路, 物理学报, 第 60 卷第 5 期: 1—6, 2011
- [4] 白洁, 王洪庆, 陶祖钰, GSM 卫星红外云图云迹风的反演, 北京大学学报, 第 33 卷第 1 期: 85—92, 1997
- [5] 许建民, 张其松, 方翔, 用红外和水气两个通道的测值指定云迹风的高度, 气象学报, 第 55 卷第 4 期: 408—417, 1997