

第九届“华为杯”全国研究生数学建模竞赛



题 目 基于网络流联合相关的卫星云图导风技术

摘 要：

本文针对气象卫星云图计算云导风的过程进行建模、求解和优化；根据传统云导风法存在的缺陷，提出了新的风矢计算方法——网络流联合相关法并建立了像素窗口和搜索范围的自适应调整模型。

通过卫星云图实现云导风的计算，需要建立卫星灰度矩阵与经纬度的换算。本文利用射影几何基本原理，建立了基于解析几何的简单模型将卫星云图的灰度矩阵到经纬度坐标的映射模型，并实现了在卫星云图上绘制海岸线等地理信息。

本文首先用相关法建立了云导风的基本模型，选取中心矩相关系数作为匹配的相关指标。由于传统相关法利用局部点对点的匹配方式，会造成一定的凌乱风矢出现，并且未对云图信息进行充分利用。本文在相关法基础上，提出了网络流联合相关法，直接利用三幅卫星云图信息，采用周围辅助采样点风矢对中心采样点风矢进行修正的方式，有效避免了传统相关法缺陷，提高了计算精度。

此外，本文通过实例计算与分析，得出了像素窗口大小和搜索范围变化的对算法影响一般规律，并在此基础上提出了可以自适应调整窗口大小和搜索范围的云导风方法，提高了匹配质量。

同时本文还基于垂直大气轮廓线方程，通过最小二乘拟合的方式建立了在卫星云图灰度与所在等压面的映射模型，实现了对风矢等压面的估计。

获得了根据已建立的换算视场坐标模型，本文利用风云2号卫星所拍摄的相邻的卫星云图，对相关法以及本文提出的网络流联合相关法和自适应调整法进行了实例计算。其中相关法、网络流联合相关法以及自适应调整法所得到非零风矢数分别为4491、4532和5376。并且通过比较和分析发现，本文提出的网络流联合相关法以及自适应调整法的风场连续性与一致性均优于相关法，且16×16窗口

大小对于间隔 30 分钟的云图序列是较为合理，而 64×64 的搜索范围则过大。

最后，本文针对云导风中的模式识别、旋转匹配、背景灰度修正和辅助数据的应用等模型的拓展进行了初步的讨论。

关键词：云导风；相关法；最大费用最大流；模糊模式识别

目录

一、	问题重述.....	4
二、	模型假设.....	4
三、	符号说明.....	5
四、	问题分析.....	6
4.1	云导风技术	6
4.2	视场坐标换算	6
4.3	云导风的方法探究	7
4.3.1	相关法	8
4.3.2	傅立叶相位分析法	8
4.3.3	TCFM 导风法	9
4.3.4	算法讨论	9
4.4	窗口大小与搜索范围的控制	10
4.5	风矢量的等压面高度	10
五、	模型的建立与求解.....	12
5.1	换算视场坐标模型	12
5.1.1	地球球面上的物点投影到视场平面上像坐标的换算	13
5.1.2	灰度矩阵的像素行列号与视场平面上对应点的关系	14
5.1.3	地球曲面上采样点的经纬度坐标确定	16
5.2	云导风模型	17
5.2.1	相关系数法	17
5.2.2	网络流联合相关法	20
5.3	自适应云导风	24
5.3.1	窗口大小与搜索范围的进一步分析	24
5.3.2	自适应匹配算法描述	27
5.4	风矢等压面的估计	31
六、	结果分析.....	32
6.1	网络流联合相关法与相关系数法	32
6.2	自适应匹配法与相关系数法	35
七、	模型的评价.....	38
八、	模型的拓展.....	38
8.1	模式识别	38
8.2	旋转匹配	39
8.3	背景灰度修正	39
8.4	辅助数据的应用	40
九、	参考文献.....	40

一、 问题重述

我国幅员辽阔、南北纬度差异大，在同一时间不同地点具有不同的气象特征。气象的变化对交通运输、工农业生产等许多国民经济部门有着重要的影响。地球上平均有1/3到1/2的区域被云层覆盖，云不仅对气候的变化起着举足轻重的作用，也是人类判别天气情况的重要依据。卫星云图是记录云层分布与运动的重要手段，并以其直观性、准确性和信息的多样性受到人们广泛关注。利用气象卫星云图获得云迹风，也称为云导风，是根据对连续几幅卫星云图中同一云块的跟踪，从云的运动估算出该区域的风速、风向与所在高度。近几十年来，利用气象卫星资料反演的云导风已广泛应用在台风范围、热带气旋移向预报、暴雨和洪涝灾害分析预测等方面，并越来越显示其重要的作用。因此，利用卫星云图对云迹风的判断是极为重要的。

问题 1：将卫星云图的视场坐标换算为经纬度，建立灰度矩阵与经纬度坐标的对应关系，将灰度矩阵绘制成卫星云图，并根据海岸线的经纬度在云图上添加海岸线轮廓。

问题 2：根据给出的三个相邻时刻的卫星云图数据，建立该时刻风矢场的度量模型，给出计算方案，并在给定的窗口大小与搜索范围条件下计算整数经纬度处的二维风矢，对采用的窗口大小和搜索范围进行理解与评价。

问题 3：分析调整窗口大小和搜索范围对计算结果的影响，设计自适应调整窗口大小和搜索范围的有效方法，建立风矢场的度量模型和算法。并利用获得的模型和算法计算数经纬度处的二维风矢。分析比较不同计算方法的优劣，提出关于云图数据量和云导风风矢场计算研究的建议。

问题 4：根据全球温度数值预报数据估算出用来推算出移动距离的云块的环境温度，由此温度推算出风矢量的等压面高度。再据此高度进行风矢量分层。根据计算结果，在卫星云图上添加风矢。

二、 模型假设

假设 1：卫星所接受到的红外探测光线沿直线传播，并且在传播过程中不存在吸收、反射或折射。这样卫星云图的拍摄过程可用几何光学简化模型建立和计算，且并不会影响计算结果精度。

假设 2：地球为理想椭球，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，且忽略地球表面的起伏对卫星云图的影响。

假设 3：气象卫星相对于地球中心的位置保持不变。

假设 4：不考虑地球和天空的其它热源对云层温度的影响。在测定时间范围内，地球表面的背景温度保持不变，且对云层温度无影响。事实上，在后面拓展部分可以看到地物以及海洋和大陆对卫星云图是有所影响，但由于相关地理数据不足，本文模型中不考虑这些因素。

假设 5：不考虑卫星云图的失真、畸变，认为是完美的光学成像。实际上由于卫

星距离地球较近，在拍摄过程中，不是远场成像，所得图片存在一定的畸变。但是由于是用两幅或两副以上图片进行比较，像差与畸变会在一定程度消除。故可以认为不考虑这些成像误差。

假设 6：本文认为从任意间隔 1 小时内的两幅卫星云图可以用于云导风的计算。

假设 7：卫星云图中等压面与温度以及灰度的关系符合已知的统计数据，即可以通过已有的统计数据估计示踪云的气压高。

假设 8：假设文中所讨论的地区的风速不超过 120 km/h，也就是搜索窗口固定为 64×64 像素，由于在气象学中超过 117 km/h 定义为 12 级飓风，为极端天气状况，出现概率较低，因此这个假设是较为合理的。

三、 符号说明

符号	符号说明
$(x_{(i,j)}, 0, z_{(i,j)})$	灰度矩阵中行列为 (i,j) 的像素所对应的卫星视场平面坐标
(x, y, z)	球面物点的空间点坐标
$\varphi_{(i,j)}$	灰度矩阵中行列为 (i,j) 的像素所对应的纬度坐标
$\theta_{(i,j)}$	灰度矩阵中行列为 (i,j) 的像素所对应的经度坐标
f	卫星云图灰度矩阵元素行列号与对应经纬度坐标的映射
G	卫星云图的灰度矩阵
G'	相邻时刻卫星云图的灰度矩阵
S	像素的窗口矩阵
S'	相邻时刻卫星云图像素的窗口矩阵
$G_{I,J}(i, j)$	卫星云图上目标模块内的像素灰度矩阵
$G'_{M,N}(i, j)$	卫星云图上匹配模块内的像素灰度矩阵
$\overline{G_{I,J}}$	目标模块平均灰度
$\overline{G'_{M,N}}$	匹配模块平均灰度
T	温度矩阵
P	等压面
(p, q)	辅助采样点的行列号
OC	交叉原点矩相关系数
TOC	原点矩相关度总和
G_f	最大费用流模型
J	背景修正矩阵

四、 问题分析

4.1 云导风技术

利用静止气象卫星获得云迹风是指用连续几幅（间隔一般小于 1 小时）静止气象卫星图像追踪图像上示踪云模块的位移，根据卫星云图的灰度估算出用来推算移动距离的云块的环境温度，由此温度并通过已有统计数据或其它辅助渠道计算出示踪云模块所代表的云或水汽特征所在的高度层次，以获得这些层次上风的估计值，即定量的计算出云的移动速度及云所在的等压高度。

反演风场是卫星云图应用的一个重要方面。尽管当前可采用无线电探空仪、风廓线仪等手段来获得风场，但观测频次和探测范围仍有较大不足，特别在海洋上，风场的观测缺乏，于是利用云图来观测和反演风场就显得尤为重要。云迹风目前已成为一种重要的卫星产品[1]。它作为陆地观测网常规风测量的补充资料，对于数值预报初始场的构造、台风、高空急流及水汽输送的研究等都具有非常重要的意义。

但必须指出的是，由于卫星只能扫描到高云以及没有被高云覆盖的中低云，因此，卫星云导风在客观上不能得到被高云覆盖的云层的风矢。而当大气运动的作用力没有使云产生运动或者云自身没有运动时，卫星云导风则失去了意义。对于全球风场资料的获得，卫星云导风获得的风场需要与各种其它探测工具获得的风场互相补充。

目前卫星云导风所能得出的主要为风矢（包括风行与风速）以及风矢所在的气压高，为了直观与观察方便，一般以标有风矢图标的卫星云图的方式给出云迹风信息。由于云图上的一个像素代表地球上的几公里或者十几公里，因此导风的精度是决定强风的量级和影响范围、暴雨的落区等的预报准确度的关键因素。而由于天气分析与预测的实时性，云导风方法的计算复杂度也是需要控制在可接受的范围内的。

在实现云导风的过程需要主要涉及几个问题：视场坐标与经纬度换算、具体导风算法的实现的与相关参数的设定以及风矢高度的确定，以下对这几个问题进行初步的分析。

4.2 视场坐标换算

为了实现云导风的计算，首先需要实现卫星云图灰度矩阵与经纬度的换算。而卫星云图的拍摄过程就是对地球的表面云块进行射影变换(即中心投影变换)，变换中心为拍摄云图的气象卫星，投影面为卫星的任意视场平面，如下图，其中 ABC 是地球表面的云块，则 $A'B'C'$ 即为卫星视场平面上云块的对应的像，其中卫星视场平面垂直于卫星与地球中心的连线的。

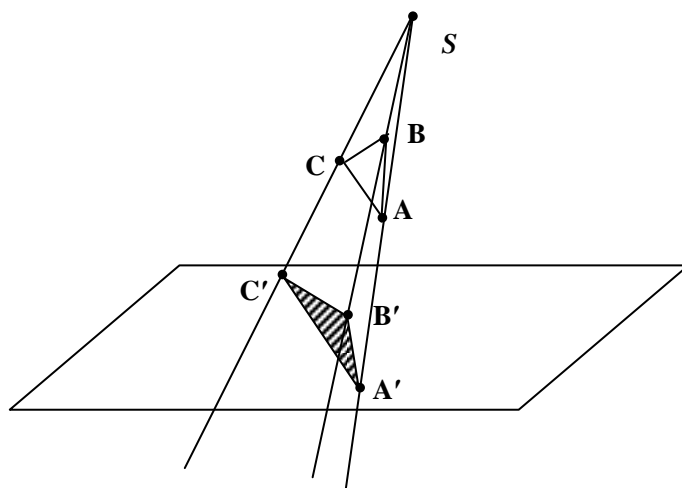


图 1 卫星对地球表面的中心投影变换

在此基础上，就可以通过简单的解析几何知识建立经纬度与卫星云图上的坐标（即灰度矩阵的行列号）对应关系。而具体的计算的方式可以分为两种不同的映射方式：将卫星云图的灰度矩阵的像素行列号映射到经纬度坐标，或者将经纬度坐标映射到像素矩阵行列号方法。

这两种映射虽然在理论上互为逆映射，本质上是等价的，但在实际计算中存在很多差异。前一种映射方法，每一个像素都能映射到一个经纬度坐标，对于在云图上绘制海岸线等地理信息在理论上不存在像素误差，但需要进行搜索匹配，降低了计算效率。而后一种映射方法的推导过程更加复杂，虽然对于云图绘制地理信息不需要匹配搜索，计算更为简便，但结果可能会由于计算精度问题而导致像素误差。

本文中所考虑的采样点较为少，因此为了保证计算精度选用将灰度矩阵的像素行列号映射到经纬度坐标的方法进行坐标的换算。

4.3 云导风的方法探究

应用静止气象卫星资料反演云迹风是从上世纪70年代开始的，早期的云迹风反演是通过人工识别追踪云团的移动，而目前主要的云导风方法是采用类似的基于局部云块匹配的思想，基本原理见图。以云图上的一个采样点为中心选取一个指定的（一般为方形）的目标模块（搜索窗口），即示踪云，在下一时刻云图的同样位置附近指定的搜索范围（虚线框）内寻找与目标模块相匹配的模块（匹配模块），然后通过两个模块的匹配信息计算风速与风向。而对于零风矢的判断，国家卫星中心的标准一致，均是将气压高度大于950毫巴的物象以及风速小于4m/s的像元认为是地物[2]。

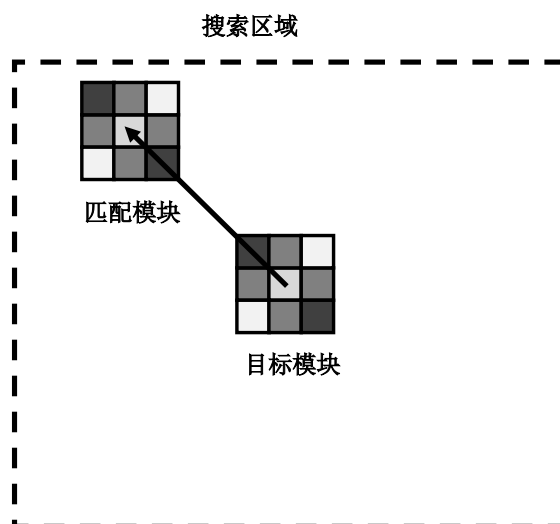


图 2 局部云块匹配原理的云导风计算

当前，卫星云图反演风场的具体方法有很多种，主要包括相关法、傅立叶相位分析法与TCFM云导风法。

4.3.1 相关法

相关法导风是目前开发和使用最为成熟的方法，利用相关法处理常规导风云图序列计算云迹风在美国、日本、欧洲、澳大利亚等国家和地区得到了广泛的应用。

相关法导风的原理是通过计算目标模块的灰度矩阵与搜索范围内所有模块的灰度矩阵的相关度或者相似程度，然后选取相关度最大的模块作为匹配模块，通过两个模块间的像素差（即相对位置）计算风矢。按相关度的计算方式的不同分为绝对值法、序列相似性检验法和交叉相关系数法等方法。由于这些方法仅仅是计算相关度的公式不同，因此在计算速度和精度上没有实质的上差异。其中交叉系数法由于数学理论依据较为充分，而被各国气象部门广泛应用。

由于相关法导风计算风速时是整像素数，对于位移不足一个像素的云团，或者在连续的间隔小于5分钟的快速区域云图上，目标模块的位移一般小于目前静止卫星红外云图上一个像素的尺度，就会出现“亚像素尺度位移”的问题[3,4]。由于相对于常规导风云图而言，快速区域云图仅提高了云图的时间分辨率，而云图的空间分辨率并没有提高，因此，此时传统的相关法在风速计算上会产生很大的误差。虽然可以通过拟合的手段来估计匹配度的峰值，但这种方法不仅在相关法计算量已经很大的基础上，进一步增加计算量，且并不能有效地解决问题。

4.3.2 傅立叶相位分析法

王振会[5]教授在研究1 分钟时间分辨率区域云图导风中的“亚像素尺度位移”问题时，创新性地提出了傅立叶相位分析技术，对示踪云进行频域波谱分析，由谐波的相位变化计算波速，最后由平均波速计算云迹风，经用美国GOES卫星1 分钟间隔云图进行探索性试验表明，这一方法不仅可以追踪位移小于一个像素的

示踪云块，获得云迹风矢，而且可以同时获得速度谱及其方差。这种方法更适合于短时间间隔的快速区域云图导风，成为卫星导风技术上对传统的相关技术的一种补充。该系统生成的云迹风场可以满足实际业务和科研工作的需要。

傅立叶相位法实质是目标模块与下一时刻的相同位置模块做频谱匹配，通过相位差计算风矢，因此，当云块位移大于两个像素单位时，计算过程中将出现相位重叠现象，计算的云块的相速度和真实速度不一致。所以对于时间间隔较长的云图序列，尤其是30分钟至60分钟间隔的常规云图，傅立叶相位法不适用。

4.3.3 TCFM 导风法

由于时间间隔较长的云图序列对于傅立叶相位分析法则不适用，而相关法计算位移又会由于像素分辨率问题导致风速计算存在误差。为了综合利用傅立叶相位分析和最大相关两种方法的优点，提高普通间隔云图序列导风的精度，朱平[6]等研究者们将两种导风方法的概念相结合，提出 TCFM (Tracking cloud with Combined Fourier phase analysis and Maximum correlation) 方法。

该导风方法首先用传统相关法进行模块匹配，然后通过判断匹配模块与目标模块的匹配度判断是否发生云块的亚像素位移，若发生亚像素位移，则进一步利用傅立叶相位分析法对目标模块和匹配模块进行频谱分析，根据相位差计算亚像素位移，计算得到亚像素风矢对传统匹配法得到的风矢进行修正。

该方法有效解决了长时间间隔云图亚像素位移的问题，提高了云迹风的精度，但由于在相关法的基础上加入了快速傅立叶变换，计算复杂度较高。

4.3.4 算法讨论

由于云导风计算复杂度较高，为了缩小匹配搜索范围，一般采用二次匹配法：一般情况下先将张红外云图原分辨率减半，计算云图上给定模块的位移，称为粗匹配；以此粗匹配风矢作为云迹风初值来缩小搜索区，用原分辨率云图重新搜索，称为精匹配，从而得到比粗匹配精度高的云迹风矢。由于本文所选取的示踪云较少，仅为 6400 个，因此二次匹配法不是必要的。

目前大部分的卫星云导风产品均是采用三幅相邻时刻的卫星云图进行云导风计算的。事实上，两幅相邻时间的云图提供信息已经足够用于计算云导风，如何有效的利用三幅卫星云图的信息是值得讨论的。

目前各国气象部门主要是采用前两图得到的云迹风矢对后两图云迹风矢进行质量控制的方法。欧洲 ESA 也采用二次匹配，但使用红外和可见光两种云图，即用红外图匹配得到的云迹风场（称为粗匹配风场）作为初始风场，进行可见光图匹配（称为精匹配）。

而实际上，这样做并没有有效地利用三幅图的灰度信息，而且目前大多数方法是基于单点的模块匹配。因此当计算出现错误时，无法对错误的方式进行修正。因此提出能够有效利用三幅图，并建立与周围采样点之间联系的方法，对提高云导风的精度有很大帮助。

4.4 窗口大小与搜索范围的控制

搜索窗口大小（模块大小）的选取是影响卫星云导风算法速度与精度的一个重要因素。如果选取的搜索窗口太小，虽然会有效地提高计算速度，但是由于过小的示踪云缺乏足够特征，会导致所得风矢杂乱无章，出现较大误差。而如果选取的搜索窗口过大，所得风矢的精度会有所提高，但由于示踪云的特征太复杂，使得极有可能无法在下一时刻云图上进行像素匹配或匹配度过低，而且过大的搜索窗口会极大的影响计算速度。Lunnon 和 Lowe(1992)在用指出相关法处理卫星云图时选取模块大小为 16×16 像素时，得到的风场要比由 32×32 的像元矩阵得到的风场效果更好。而且，在导风计算速度上选择 16×16 像素的目标模块要比选择 32×32 像素的目标模块快两倍。目前云导风主要是采用 16×16 的固定窗口大小，而自适应的根据云块特征或者区分度来调整窗口大小。

同样，搜索范围的大小对云导风模型计算也会产生重要的影响。显然搜索范围设置地越小，计算越快，反之范围设置越大会更精确，但是延长了计算时间，但是由于风速与云图间隔时间的限制，过大的搜索范围反而导致模型对模块匹配的错误判断从而降低精度。题目中给出的搜索范围限定为 64×64 个像素，云块大小限定为 16×16 个像素，可以通过计算得知相应的最大风速限制为 120 km/h。一般的卫星云导风产品都是根据最大风速使用固定大小的搜索范围，但由于云图中大部分云块运动速度远小于最大风速，因此使用相同的搜索范围是没有必要的。而如果能给出根据搜索过程中的匹配度进行自适应的调整搜索范围的方法，毫无疑问在保证精度的前提下会极大地提高计算效率。

此外，采样点的选取也十分重要。采样点太少了毫无疑问会降低云迹风图的信息量，而太多会必然导致搜索范围的重叠过多，对计算带来不必要的麻烦，而且信息冗余。一般采用隔 1 到 2 个经纬度取一个点进行匹配，这里本文采用每个整数经纬度作为采样点进行计算。

4.5 风矢量的等压面高度

云导风除了给出风矢的大小、方向，还必须推算出风矢量的等压面高度，通过等压面高度判断风矢高度。

示踪云等压面高度在气象学中的指定方法有很多，如近似法、气候学法、暗影法、立体法、窗区通道温度法、多通道测云高度法、二氧化碳多通道法和国家卫星中的双通道法等。本文采用窗区通道温度法确定示踪云高度。利用所给数据拟合的灰度与温度关系图，可以看出温度与灰度不是成简单的线性关系，由文献可知卫星云图的灰度对应的是红外线辐射量，而地球表面辐射量与温度关系近似符合普朗克黑体辐射公式，因此在一般情况下，需要根据灰体辐射规律进行灰度与温度的拟合于插值。但由于本题已经给出每个灰度对应的是红外辐射温度值，因此在本题中不需要对灰度和对应温度进行拟合。

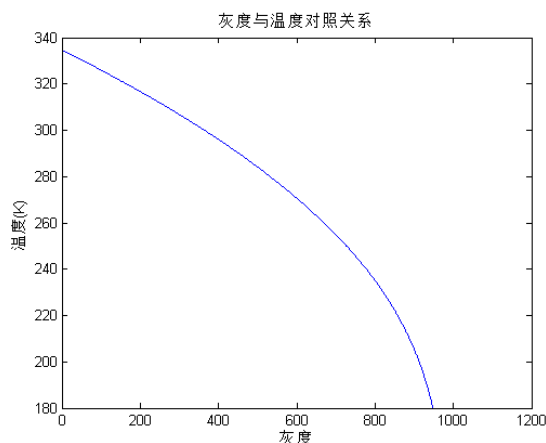


图 3 灰度与温度的关系曲线

而温度与气压高度同样不是呈现一般的线性关系，根据文献资料表示，当气压高于 200 HPa 时为对流层，热量绝大部分来自地面，气温随着高度的增加而递减。温度与等压面成对数关系：

$$T = a + b \ln P$$

而利用所给的温度与气压高度数据，可以画出温度与气压高度关系曲线。下图为任意选取了十个不同经纬度获得的温度与气压的关系曲线。图中可以看到，当气压高于 200 HPa 时基本符合上式。当气压低于 200 HPa 时，温度与气压的关系不符合上述的指数关系，而在此范围内通过温度推导压强也会得到两个结果，这显然是不符合实际的。而且气压低于 200 HPa 时，处于平流层、中间层和热成层，这几个区域中几乎不存在云层，因此可以利用温度与等压面的对数关系对风矢的等压面进行估计[7]。

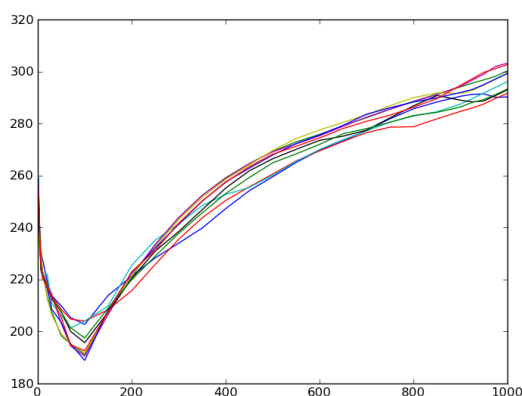


图 4 温度与气压的关系曲线

由于统计数据中的温度与等压面是离散的，对于中间温度需要插值。温度与等压面的关系式为对数关系，因此需要作对数最小二乘拟合，而且等压面小于 200 HPa 时的温度统计数据不符合对数规律，因此仅使用等压面高于 200 HPa 的数据。

五、模型的建立与求解

5.1 换算视场坐标模型

为实现根据卫星云图计算云迹风，首先要确定灰度矩阵像素中每个元素对应的采样在地球上的经纬度，本文根据之前分析部分的讨论，通过空间解析的方法建立从灰度矩阵像素映射经纬度的换算模型。

定义卫星云图对应的灰度矩阵为 $G = \{G_{ij}\}$ ，其中 $i, j \in [1, 2288]$ 。首先建立空间直角坐标系，为计算简洁，以地球中心为原点，地球中心与卫星连线为 y 轴，南北极轴线为 z 轴，赤道平面为 x - y 平面，建立三维直角坐标系。记卫星在该坐标系下的坐标为 $(0, D, 0)$ ，其中 $D = 42164000$ ，为同步卫星离地球中心的高度，如图。

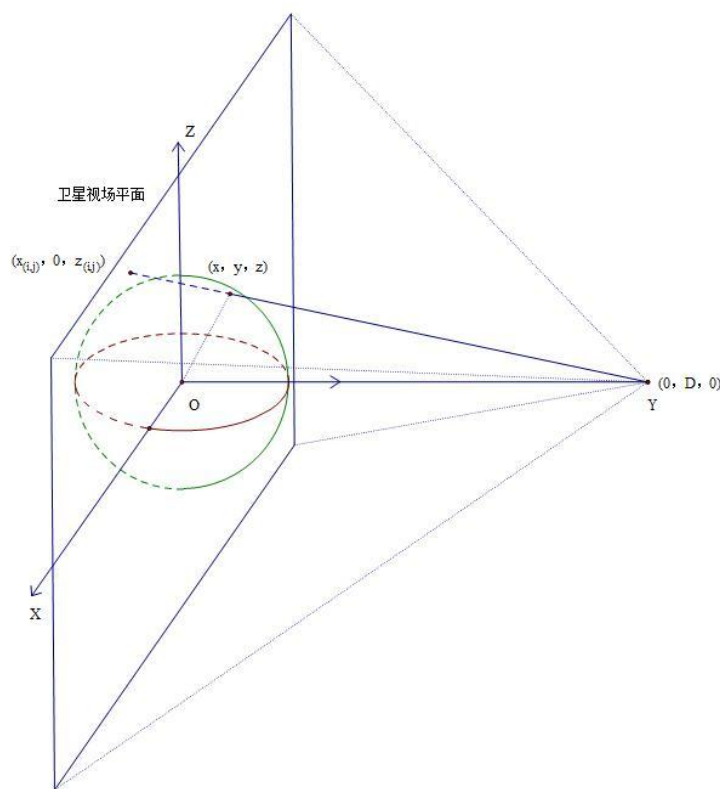


图 5 坐标系图像

卫星视场平面是指卫星所拍摄的图像投射到的平面，也就是说任意垂直于 y 轴（即卫星与地心的连线）平面均可作为卫星的视场平面，其中卫星靠近地球的这一侧的平面均为虚像面，另一侧均为实像面，这里为了计算方便取 x - z 平面（为虚像面）。

5.1.1 地球球面上的物点投影到视场平面上像坐标的换算

首先讨论将卫星视场（x-z 平面）的一个像点坐标如何对应到地球曲面上相应物点所对应的经纬度坐标。

记卫星视场平面上的某个虚像点 Q 的坐标为

$$(x_{(i,j)}, 0, z_{(i,j)})$$

对应的地球曲面上物点 P 坐标为(x,y,z)。则经过卫星与像点 Q 的直线方程如下形式：

$$\frac{x - x_{(i,j)}}{0 - x_{(i,j)}} = \frac{y}{D} = \frac{z - z_{(i,j)}}{0 - z_{(i,j)}} \quad (1)$$

化简可以得到

$$1 - \frac{x}{x_{(i,j)}} = \frac{y}{D} = 1 - \frac{z}{z_{(i,j)}} \quad (2)$$

地球可视为一个理想椭球，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轴线旋转得到，则地球球面的椭球方程可以表述为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (3)$$

其中 $a = 6378136.5$ 为椭圆截面的长半轴（赤道半径）， $c = 6356751.8$ 为短半轴（极半径），与上述直线方程联立可求解得到卫星与卫星视场平面像点的连线在椭球面的上交点，其中一个即地球表面上对应的物点。

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \\ 1 - \frac{x}{x_{(i,j)}} = \frac{y}{D} = 1 - \frac{z}{z_{(i,j)}} \end{cases} \quad (4)$$

消去变量 x 和 z 可得

$$\left(\frac{x_{(i,j)}^2}{a^2} + \frac{z_{(i,j)}^2}{c^2}\right)\left(1 - \frac{y}{D}\right)^2 + \frac{y^2}{a^2} = 1 \quad (5)$$

为后面表述与计算方便，这里记

$$K = \left(\frac{x_{(i,j)}^2}{a^2} + \frac{z_{(i,j)}^2}{c^2}\right)$$

上述的二次方程存在两个解，也就是说理论上卫星在一个方向上可以拍摄到地球球面上两个点， y 坐标如下

$$y_{\pm} = \frac{K/D \pm \sqrt{K/D^2 + 1/a^2 - K/a^2}}{K/D^2 + 1/a^2}$$

但是注意到由于地球球面的遮挡,实际上卫星所能拍摄到的云图只有距离卫星更近那一点。所以,所求对应物的点只能取 y 值更大的解。如图中只能看到坐标为 (x_+, y_+, z_+) 的点, 点 (x_-, y_-, z_-) 被遮挡。

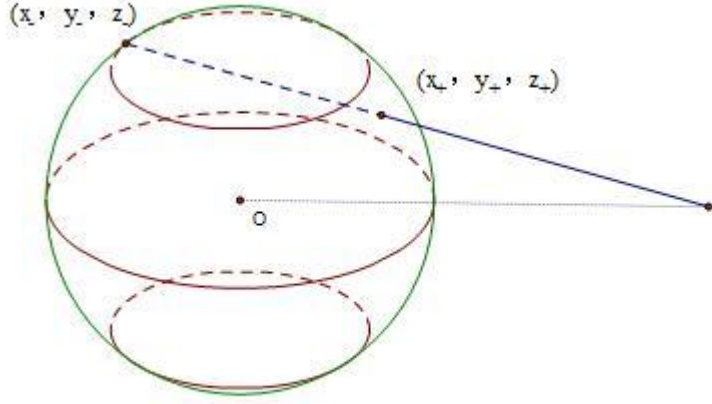


图 6 理论上卫星可拍摄到的地球表面上的两个点位置示意图

显然有 $y_+ \geq y_-$, 则取解为

$$y_+ = \frac{K/D + \sqrt{K/D^2 + 1/a^2} - K/a^2}{K/D^2 + 1/a^2} \quad (6)$$

5.1.2 灰度矩阵的像素行列号与视场平面上对应点的关系

为得到灰度矩阵中元素对应的地球经纬度, 这里首先确定灰度图上每个像素在该坐标系下卫星视场平面(即 x - z 平面)对应的坐标, 再根据视场平面与地球曲面点坐标的关系, 推导出像素行列号与经纬度坐标的关系。但是仅依靠空间坐标、视场平面坐标以及像素行列号无法求解出相应物点在地球曲面上的实际经纬度坐标, 必须根据所给的灰度照片上某已知参照物(如地球)的相关像素尺寸信息, 确定像素行列号与视场平面 x - z 上坐标对应关系。本文通过视场平面映射空间坐标, 根据灰度矩阵计算出地球投影在视场平面上的椭圆实际尺度。

考察地球在视场平面上的整体射影范围, 显然当方程判别式为零时

$$\frac{K}{D^2} - \frac{K}{a^2} + \frac{1}{a^2} = 0 \quad (7)$$

直线与椭球相切, 此时

$$K_0 = \frac{D^2}{D^2 - a^2} \quad (8)$$

故当且仅当卫星视场平面上的像点的坐标满足

$$\frac{x_{(i,j)}^2}{a^2} + \frac{z_{(i,j)}^2}{c^2} \leq K_0 = \frac{D^2}{D^2 - a^2} \quad (9)$$

卫星与卫星视场平面的连线与地球曲面存在交点，也就是说，在该范围内的像点对应的物点是在地球表面上的。

对上述不等式做如下变形有

$$\frac{x_{(i,j)}^2}{(\sqrt{K_0}a)^2} + \frac{z_{(i,j)}^2}{(\sqrt{K_0}c)^2} \leq 1 \quad (10)$$

上述不等式所表明，卫星所能观测到的地球表面上的点所对应的卫星视场平面像点，都必须落在 x - z 平面上的满足不等式(10)的椭圆区域内，也就是说该不等式描述的区域就是地球在视场平面上的像，如下图的阴影区域。阴影椭圆边界

为卫星与地球椭球的切点组成。其中 $2\sqrt{K_0}a$ 和 $2\sqrt{K_0}c$ 分别为视场平面上地球对应的像椭圆的在 x 方向上的长轴与 z 方向上的短轴。

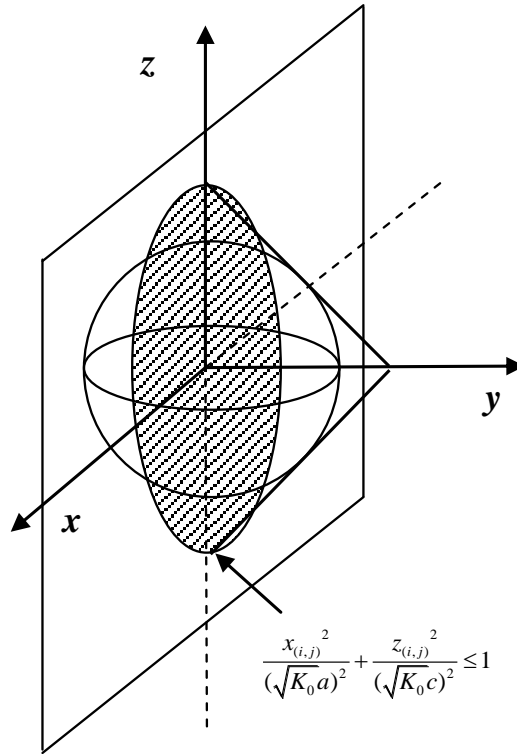


图 7 卫星所能观测到的地球表面上的点在卫星视场平面上的投影区域

由于卫星所得到的灰度图中的宇宙背景灰度为-1，故当像素的灰度值为 0 或者正数时，表明该像素位于地球对应的像椭圆（即图中的阴影区中）上。则根据灰度的分布范围可以知道地球对应的像素分布情况，从而可知道像椭圆长轴短轴在灰度图像上的对应的像素长度，根据所给数据分别为 2169 像素与 2163 像素。由于单位像素大小都是相同的，因此由射影几何可以知道单位像素大小对应的该坐标系下的尺度都是相等的。建立单位像素与选定视场平面的坐标尺度的关系：

$$\begin{cases} 2\sqrt{K_0}a = 2169 \times \text{width} \\ 2\sqrt{K_0}c = 2163 \times \text{height} \end{cases} \quad (11)$$

其中 width 与 height 分别为灰度图上单位像素在该坐标系下卫星视场平面

(即 x - z 平面) 对应的 x 方向和 z 方向的坐标尺度。计算可得

$$\begin{cases} \text{width} = \frac{2\sqrt{K_0}a}{2169} \\ \text{height} = \frac{2\sqrt{K_0}a}{2169} \end{cases} \quad (12)$$

则有灰度矩阵的元素与该坐标系下卫星视场平面 (即 x - z 平面) 对应的坐标

$$\begin{cases} x_{(i,j)} = (1145 - j) \cdot \text{width} \\ z_{(i,j)} = (1145 - i) \cdot \text{height} \end{cases} \quad (13)$$

5.1.3 地球曲面上采样点的经纬度坐标确定

根据上面求得的空间坐标关系, 通过下列反三角函数即可将地球球面上点的空间坐标换算成地球上经纬度坐标, 记像素 (i,j) 对应的经度与纬度分别为 $\theta_{(i,j)}$ 和

$\varphi_{(i,j)}$ 。

$$\begin{cases} y = \frac{K/D + \sqrt{K/D^2 + 1/a^2} - K/a^2}{K/D^2 + 1/a^2} \\ \frac{z}{y} = \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{D}\right) z_{(i,j)} \\ \frac{x}{y} = \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{D}\right) x_{(i,j)} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \varphi_{(i,j)} = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \arctan \frac{z/y}{\sqrt{(x/y)^2 + 1}} \\ \theta_{(i,j)} = \arccot \frac{x}{y} + \delta \end{cases} \quad (15)$$

其中, δ 是由卫星位置的经度不为 0 且处于东经位置时所带来的修正, 有

$\delta = \mu - 90^\circ$, μ 为卫星所处的经度, 在本题目条件下 $\mu = 86.5^\circ$ 。当本模型应用于其它位置时, 由于东西经的不同, 需进行不同的修正。

由函数组(12)-(15), 即可建立由灰度矩阵像素到经纬度的映射:

$$f : (i, j) \rightarrow (\theta_{(i,j)}, \varphi_{(i,j)}) \quad (16)$$

本文利用上面得到的映射关系可以得到在灰度矩阵中第 500 行和第 500、501、502 列三个交叉点处对应的经纬度, 其他详细信息见附件 jwd.txt 中。

表格 1 通过视场坐标换算得到的经纬度数据

灰度矩阵行列号	(500,500)	(500,501)	(500,502)
经纬度	(46.197, 32.719)	(46.282, 32.713)	(46.366, 32.708)

此外，本文还通过上述映射和简单的搜索匹配，实现了在卫星云图上绘制海岸线等地理信息，效果见下图。可以从图中看到我国国土轮廓线，澳大利亚轮廓线，印度轮廓线，以及长江黄河等明确的地理特征，说明以上算法精确可靠。

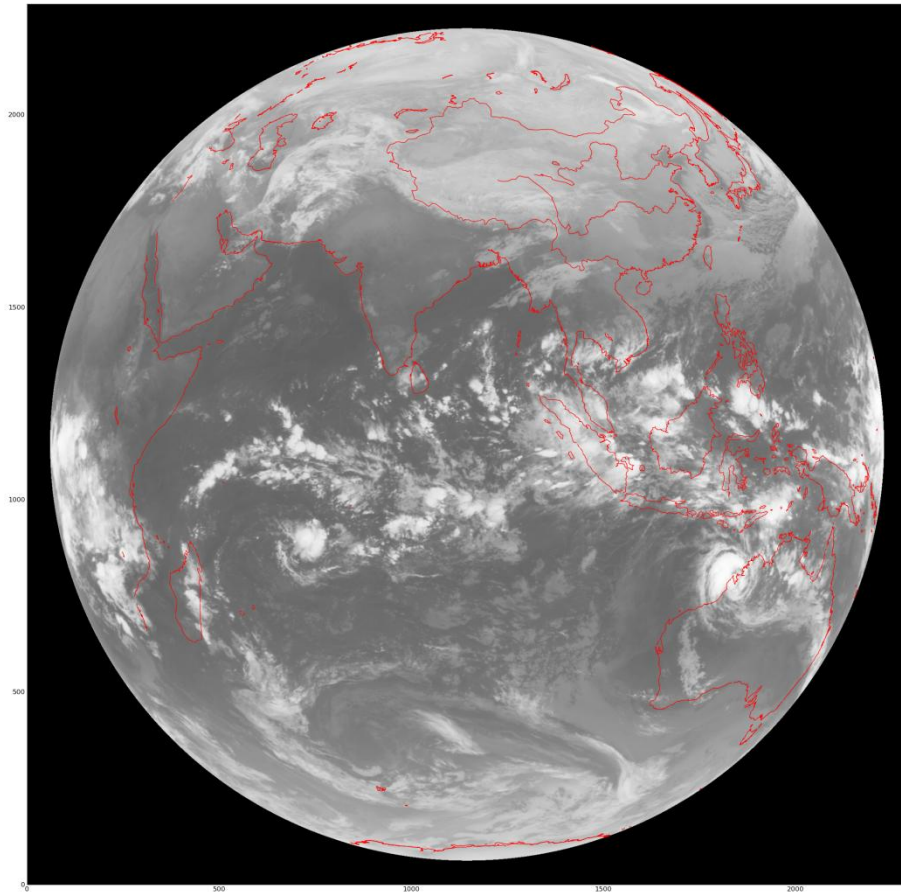


图 8 绘制了海岸线的卫星云图

5.2 云导风模型

文章前面已经确立了卫星云图灰度矩阵元素行列号与对应经纬度坐标的映射 f 。在此基础上，本文对云导风进行数学建模，首先采用传统的相关法进行建模。

5.2.1 相关系数法

对于给定的经纬度 (θ, φ) 的采样点，利用第 1 问计算得到的映射关系 f

$$f:(I, J) \rightarrow (\theta, \varphi) \quad (16)$$

通过简单的搜索匹配，可得到灰度矩阵中相应像素的位置 (I, J) 。定义大小为

16×16 像素的窗口矩阵 S ， S 是灰度矩阵 G 的子矩阵，且 $S_{9,9}$ 为窗口的像素中心，

$$S_{9,9} = G_{I,J}。$$

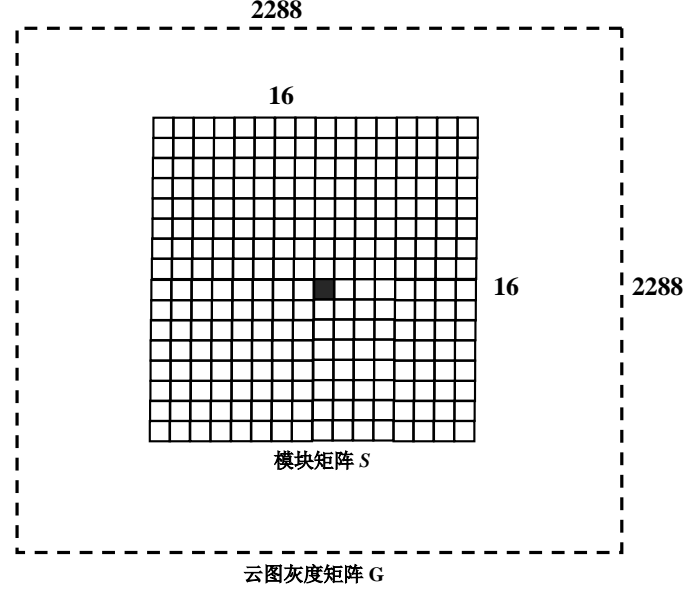


图 9 云图灰度矩阵与模块矩阵的关系以及模块矩阵中心点的确定

如上图所示，一方格为一个像素，中间为 16×16 像素大小的搜索窗口，并将它定义为矩阵 S ，将第 9 行第 9 列的像素作为窗口的中心。 S 为 2288×2288 像素大小的云图灰度矩阵 G 的子矩阵。

在相邻一时刻的相邻云图，获得云图的灰度矩阵 G' ， G' 中选取的匹配中心位置为 (M,N) ，相应的窗口矩阵为 S' ，同理 S' 是灰度矩阵 G' 的子矩阵， $S'_{9,9}$ 为窗口的像素中心， $S'_{9,9} = G'_{M,N}$ 。

取搜索范围为 64×64 像素，从图中可以看到匹配模块满足， $M \in [I-24, I+24]$ ， $N \in [J-24, J+24]$ 。

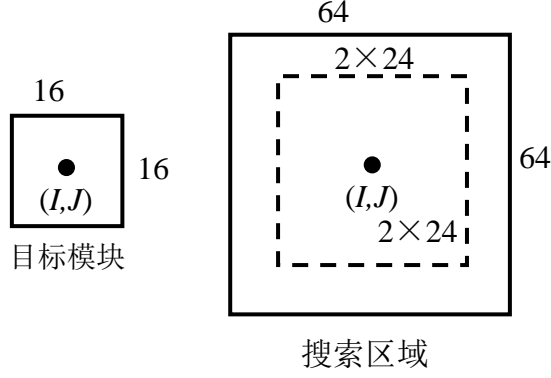


图 10 相关法中搜索区域的确定

本文这里选用交叉原点矩相关系数 OC (Cross-Correlation Coefficient of Original Moments) 进行目标模块匹配。定义如下：

$$OC(I, J, M, N) = \frac{\sum \sum G_{I,J}(i, j) G'_{M,N}(i, j)}{\sqrt{\sum \sum [G_{I,J}(i, j)]^2 \sum \sum [G'_{M,N}(i, j)]^2}} \quad (17)$$

其中， $G_{I,J}(i, j)$ 和 $G'_{M,N}(i, j)$ 分别表示间隔时刻获得的卫星云图上目标模块和匹配模块内的像素灰度矩阵 $S_{i,j}$ 、 $S'_{i,j}$ ； $OC(I, J, M, N)$ 为匹配位置在 (I, J) 处的模块 $S_{i,j}$ 与在 (M, N) 的模块 $S'_{i,j}$ 的交叉原点矩相关系数。

另外也可用中心矩相关系数 CC (Cross-Correlation Coefficient of Central Moments) 进行目标模块的匹配。定义如下：

$$CC(I, J, M, N) = \frac{\sum \sum [G_{I,J}(i, j) - \overline{G_{I,J}}] [G'_{M,N}(i, j) - \overline{G'_{M,N}}]}{\sqrt{\sum \sum [G_{I,J}(i, j) - \overline{G_{I,J}}]^2 \sum \sum [G'_{M,N}(i, j) - \overline{G'_{M,N}}]^2}} \quad (18)$$

其中， $\overline{G_{I,J}}$ 和 $\overline{G'_{M,N}}$ 为模块内像素的平均灰度，但 $CC(I, J, M, N)$ 仅反映模块内图像强度分布的表面起伏特征的相似程度，并不反映平均强度的变化。

$OC(I, J, M, N)$ 的大小，既含有图像强度表面起伏幅度及其时间变化的信息，又与平均强度的变化有关。需要指出的是， $OC(I, J, M, N)$ 和 $CC(I, J, M, N)$ 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。

但是由于 OC 和 CC 的计算中涉及到除法，在实际计算中会出现分母为零的情况。例如，采用中心矩相关系数法进行相关计算，若匹配模块的十六个灰度是完全相同，则分母为零。而交叉原点矩相关系数法同样存在这个问题，只要模块的灰度全部为 0，则也出现分母为零的情况。但是在实际测试中，出现灰度为零的概率很小，出现一个模块中十六个灰度相同的情况是有可能的。因此，本文选择交

叉原点矩相关系数 OC 进行目标模块匹配。

关于风速的计算采用普遍的近似算法,用目标模块和匹配模块间的像素数目乘以像素分辨率除以云图间隔时间计算得到。方向以卫星云图上的正北方向进行标定。而由之前的分析部分提高,根据国家气象中心的标准,风速小于 4m/s 或者等压面大于 950HPa 时,认为是地物,取风矢为零。在本题中可以近似认为像素分辨率为星下点的分辨率 5 公里/像素 。事实上卫星云图主要用来测量横向风矢,所以云图中靠中央部分的风矢误差较小,所以星下点的分辨率在经纬度变化较小的范围内是可以接收的。

5.2.2 网络流联合相关法

文中上述的相关法是采用点对点的匹配方式来进行风矢计算,但是有的时候计算结果中会存在较大的误差。如下图中所示,显然中间点的风向与周围的点的风向存在明显的差别。由于风的变化一般都是连续的,中间点的风向显然是不合理的,为凌乱风矢。事实上,这主要是由于传统相关法只是局部的点与点匹配,对于缺乏特征的云块,很容易在搜索范围内找到大量的具有相同特征的高匹配度云块,从而大大影响获得的风矢的正确性。而该方法没办法利用点周围的相关信息,使得相邻点之间的匹配没有相互影响。因此没有办法利用周围的点对这种相似度匹配的误差进行修正,通过这种点与点的相关度的匹配,必然会出现匹配错误。

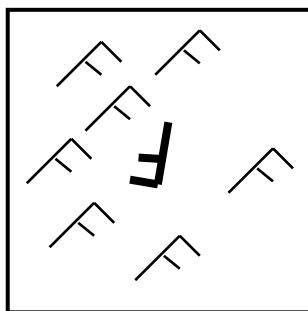


图 11 乱流风矢示意图

目前对于上述相关法出现的缺陷,各国气象部门常采用后两幅卫星云图得到的风矢对前两幅得到的风矢进行质量控制,即利用客观规律或主观判断来调整或删除认为不合理的风矢,最终生成高质量的云迹风风场产品。这样可以在一定程度上进行修正,但是实际上还是没有有效地利用到三幅图,且还是没有利用到周围点的特征,质量控制只是将相邻时刻的风矢进行对比从而估计每个点所得风矢的可信度,并不能对错误风矢进行正确的排除或修正。因此,提出如何有效利用三幅云图信息,并且能有效利用周围点相互关系对传统相关法缺陷进行修正的算法是具有现实意义和利用价值的。

考虑到寻常的风矢测量中会通过重复多次测量结果取平均值,以此为测量到的风矢量,减小测量误差。在此处,为了减少测量误差,我们同样采取多次取样测量的方式,而由于到云块的变化以及风矢的连续性,可以在采样点周围选取若干个辅助的采样点,通过对辅助采样点的匹配信息和风矢对所选采样点的风矢进行修正。本文针对这种缺陷提出了网络流联合相关法,下面对具体模型和实现方法进行阐述。

对于采样点 (I,J) ，选取与 (I,J) 相邻的八个采样点 $(I-1,J-1)$ ， $(I-1,J)$ ， $(I-1,J+1)$ ， $(I,J-1)$ ， (I,J) ， $(I,J+1)$ ， $(I+1,J-1)$ ， $(I+1,J)$ ， $(I+1,J+1)$ 作为辅助采样点。分布如下图所示。

$G_{I-1,J-1}$	$G_{I-1,J}$	$G_{I-1,J+1}$
$G_{I,J-1}$	$G_{I,J}$	$G_{I,J+1}$
$G_{I+1,J-1}$	$G_{I+1,J}$	$G_{I+1,J+1}$

图 12 中心采样点与周围辅助采样点的分布示意图

八个辅助采样点分别以这几个采样点为中心，按与之前相同的规则选取目标窗口，大小均为 16×16 。对应的灰度矩阵记为 $S_{p,q}$ ，其中

$$p \in \{I-1, I+1, I\}, q \in \{J-1, J+1, J\}$$

在相邻一时刻的相邻云图 G' ， G' 中匹配中心位置为 (M_p, N_q) ，相应的窗口矩阵为 $S'_{p,q}$ ，其中 $M_p \in [p-24, p+24]$ ， $N_q \in [q-24, q+24]$ 。

设上述的九个采样点中任意两个采样点 (p,q) 和 (p',q') 在下一时刻对应的中心位置不能重合，即 $(M_p, N_q) \neq (M_{p'}, N_{q'})$ 。

根据文章前面内容可知，原点矩相关系数的计算公式为

$$OC(p,q,M_p,N_q) = \frac{\sum \sum G_{p,q}(i,j) G'_{M_p,N_q}(i,j)}{\sqrt{\sum \sum [G_{p,q}(i,j)]^2 \sum \sum [G'_{M_p,N_q}(i,j)]^2}}$$

为了充分利用云图信息和周围辅助点的信息，文章不采用单个采样点的相关系数法，而是采用九个辅助采样点的原点矩相关度总和来判断。定义总原点矩为

TOC ，定义如下

$$TOC(I,J) = \sum_{\substack{p \in \{I-1, I, I+1\} \\ q \in \{J-1, J, J+1\}}} OC(p,q,M_p,N_q) \quad (19)$$

$$\text{且 } (M_p, N_q) \neq (M_{p'}, N_{q'})$$

TOC 即为九个采样点获得的原点矩相关系数的总和。 TOC 越大，表明目标

采样点与周围辅助采样点在下一时刻云图上的相对位置越接近，所获得的风矢越相近。取 TOC 最大的情况下所获得的九个风矢的平均矢量为采样点的风矢。下图为本方法中如何利用八个辅助采样点进行修正的示意图。

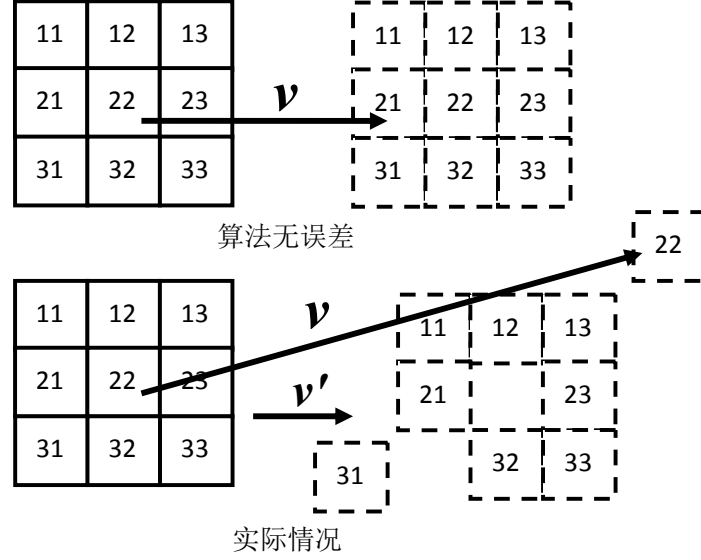


图 13 相关系数法计算风矢可能出现的情况

如果匹配算法中不会出现凌乱风矢，则文章利用九个采样点得到的风矢与传统的采用一个采样点得到的风矢结果相同。但是如果出现图中的实际情况，如果采用传统的算法，得到的错误风矢为 \vec{v} 。但是如果采用本文的网络流联合相关

法，最终风矢为利用八个辅助采样点修正后的风矢 \vec{v}' ，显然该最终的风矢与真实的更为接近。因此，采用本文的方法可以得到更为精确的实际风矢，结果明显优于传统的算法。

求这 9 个采样点的风矢显然是一个最优多点匹配问题，而处理该方法的典型思路即把它转换为最小费用最大流模型。在有 3 幅不同时间的卫星云图（记为图 A，B，C）的情况下，由于风矢几乎不会在短时间内发生突然反向的变化，所以可以同时参考多幅云图构建如下图论模型：

考虑一个边上带权的有向图 $G = \{V_{AB}, V_c, E\}$ ， V_{AB} ， V_c 分别对应网络流中抽象的点，其中 V_a 表示卫星灰度矩阵 B 中所选取的九个采样点与下面搜索范围内所有点配成的点对， $V_{AB} = \{V(M_p, N_q, p, q)\}$ 。 $V_c = \{V(M'_p, N'_q)\}$ 表示 C 图上选取的与 B 图中选取的匹配点 (M'_p, N'_q) 。

$$E_{ABC} = \{V(M_p, N_q, p, q), V(M'_p, N'_q), W_{BC}(p, q, M'_p, N'_q)\},$$

其中 $W_{BC}(p, q, M'_p, N'_q) = OC(p, q, M'_p, N'_q)$ ，为 BC 云图中 (p, q) 与 (M'_p, N'_q) 点

对应的窗口的相关系数就是这条边的权重，且要求 $[(p,q)-(M_p,N_q)] \times [(M'_p,N'_q)-(p,q)] \geq 0$ （即要求风矢不反向）。考虑到 B 图中一个点满足一条匹配，可以增加一层节点 $V_b = \{V(p,q)\}$ 代表 B 图中所选取的采样点及八个辅助采样点，则对于点集 $V_{AB} = \{V(M_p,N_q,p,q)\}$ 中的所有顶点，存在边 $E_{AB} = \{V(M_p,N_q,p,q), V(p,q), W_{AB}(p,q,M_p,N_q)\}$ 。

其中 $W_{AB}(p,q,M_p,N_q) = OC(p,q,M_p,N_q)$ ，为 AB 云图中 (p,q) 与 (M_p,N_q) 点对应的窗口的相关系数就是这条边的权重。再为此图加上源点 S 和汇点 T 以及源点到 V_b 上任一点的 0 权边 E_{SB} ，及 V_c 至汇点的 0 权边 E_{CT} ，令图中所有的边容量为 1，则可构建一个最大费用流模型

$$G_f = \{V\{V_{AB}, V_b, V_c, S, T\}, E\{E_{ABC}, E_B, E_{SB}, E_{CT}\}\}$$

其费用为匹配度，而流量则为匹配到的区域数量。下图仅表示一维情况的示意图。

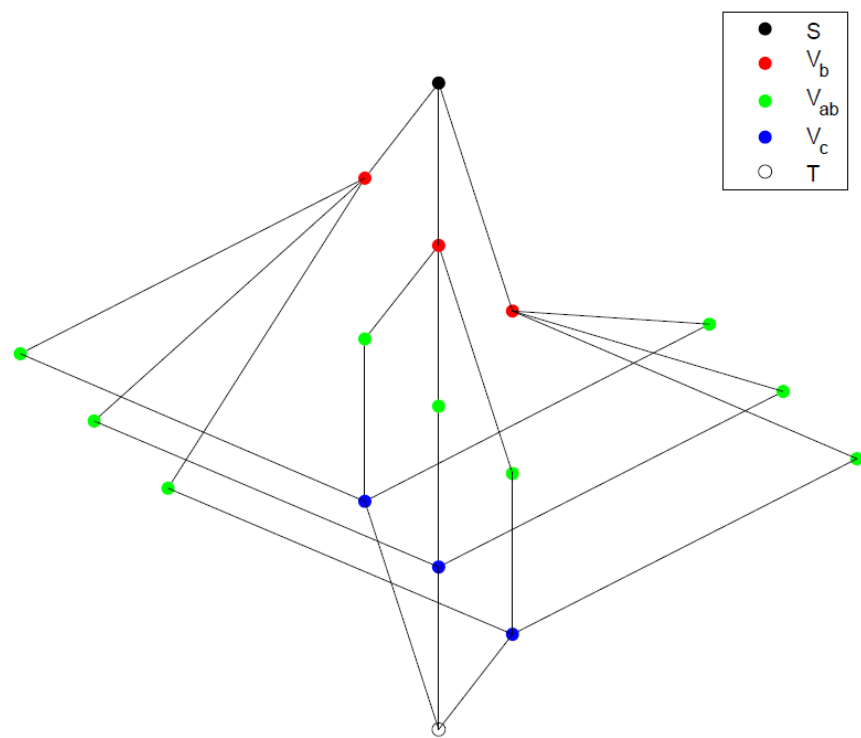


图 14 网络示意图

此图中同时将 3 副云图作为参考量，限制了风向反向解的出现，且能在小区域内同时对多个点进行匹配，方便了后续的求平均值提供了方便。使用连续增广路法（SSP），时间复杂度为 $O(k \times m \times \log n)$ ，其中 k 为求解区域的数量（B 图中参考区域数量）， n 为有向图节点数，在窗口为 64，约为 64^4 ，边数约为 64^5 ，

能在约一秒时间内计算完毕。

5.3 自适应云导风

5.3.1 窗口大小与搜索范围的进一步分析

之前的分析部分已经对搜索窗口大小与搜索范围作了简单的定性分析，本文这里利用传统相关法，通过计算进行进一步的实例分析。为了减少计算量，这里采用每隔一个整数经纬度的方式选取采样点，取 8:00 和 8:30 的图进行计算。

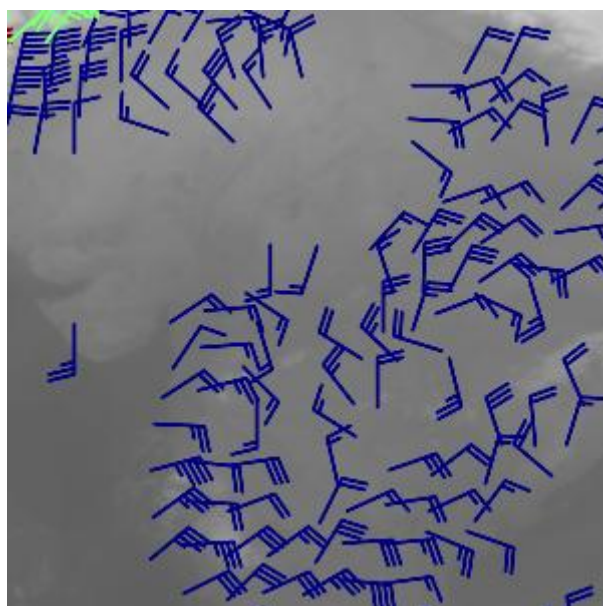


图 15 窗口大小为 24X24 的风矢图局部

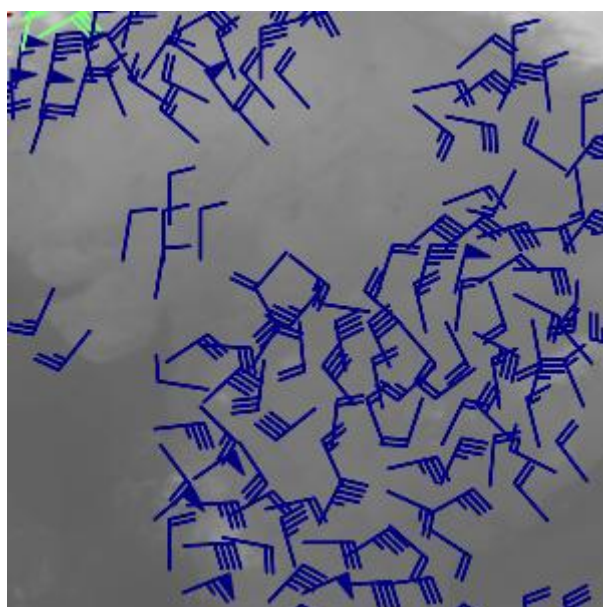


图 16 窗口大小为 8X8 的风矢图局部

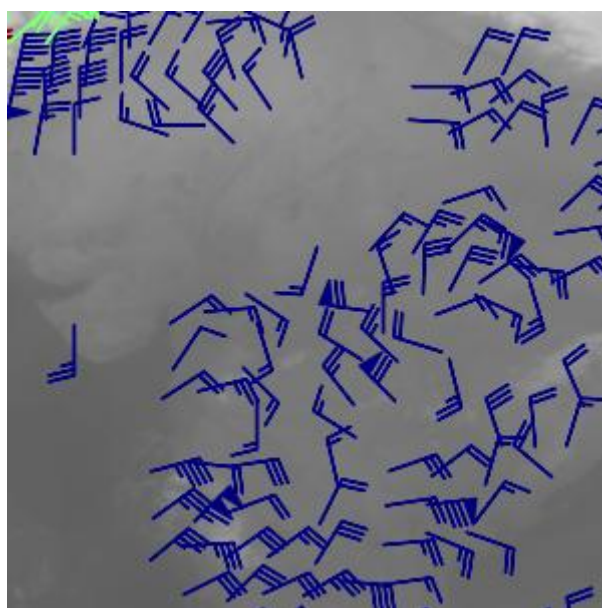


图 17 窗口大小为 16X16 的风矢图局部

表格 2 不同搜索范围与窗口大小下匹配一次所需要的时间

	窗口大小 8×8	窗口大小 16×16	窗口大小 32×32
搜索范围窗口大小 32×32	44ms	220ms	992ms
搜索范围窗口大小 64×64	212ms	982ms	4412ms
搜索范围窗口大小 128×128	1221ms	5232ms	29957ms

从上图可以看到当窗口选取扩大时，零风矢的数目明显变多，这可能是由于模块灰度特征过于复杂，在下一时刻的云图上难以匹配或者特征已经消失或变化，如下图中选取为原来四倍大小的窗口模块，若四个模块在下一刻具有完全不同的风矢，在下一时刻的云图上就无法匹配到原来的模块，因此将很有可能会计算得到该模块的风矢为零。另外，从计算角度来看，匹配窗口越大，需要进行的比较也越多，运算量越大。窗口边长大小的平方与计算时间成正比。

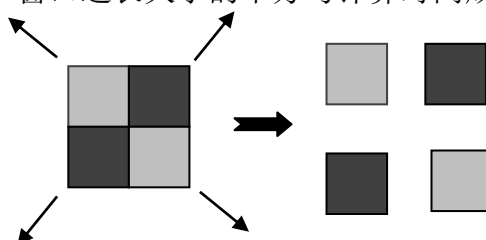


图 18 窗口过大可能产生的情况

而将窗口大小减半，计算速度明显加快。但可以看到得到的云导图中风矢杂乱无章，云导图的质量较差，可靠性不高。这是由于窗口的减小会导致模块的灰度特征减小，在搜索范围内可能会搜索到大量相同特征的模块。如下图中目标模块为 A，在下一时刻的搜索范围内存在 B、C 两个和 A 相同的匹配模块，其中正确的风矢为 \overrightarrow{AB} ，但是很有可能模型会得到风矢为 \overrightarrow{AC} 。

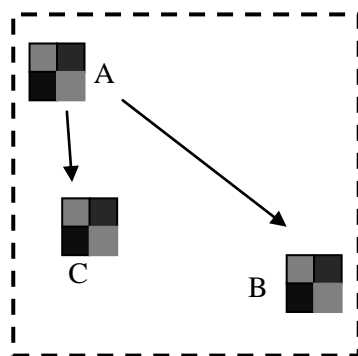


图 19 窗口过小可能产生的情况

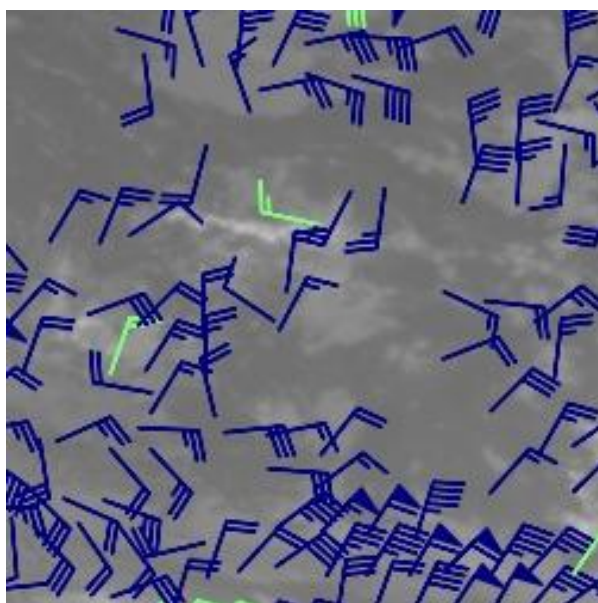


图 20 搜索范围为 32×32 得到的风矢图局部

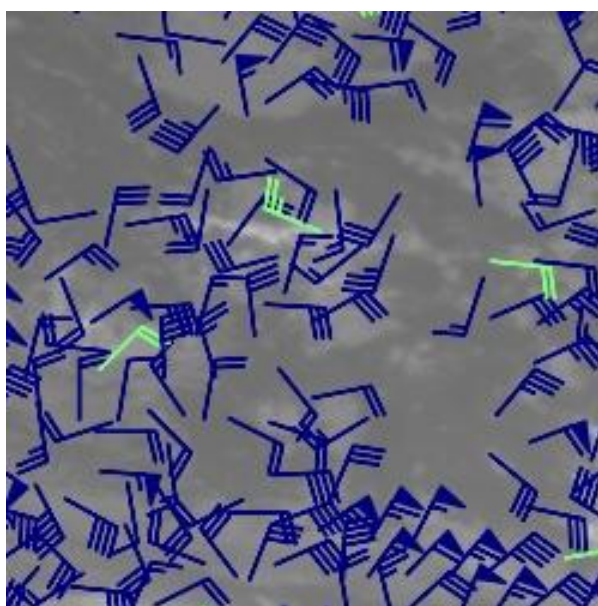


图 21 搜索范围为 64×64 得到的风矢图局部

从图上可以看到如果搜索范围降低一倍,风矢的方向基本变化不大,但很多采样点上的风速都有所减少。这是由于搜索范围限制了风速的大小,导致很多目标模块的实际位置已经超出了搜索范围,也可能导致零风矢的增加。但此时计算速度明显提高。

而搜索范围增加,大大降低了计算的速度,同时出现了部分杂乱的风矢,可能是由于搜索到多个相同特征的匹配模块所导致的,原理同缩小窗口大小类似。

5.3.2 自适应匹配算法描述

本文在假设中设定测试地区的风速不超过 120 km/h,但在实际情况中 13 级以上的风速就超过了 120 km/s,超强台风的风速可达到 184 km/h 以上。由于这种级别的风发生的概率较小,没有必要将搜索范围全部扩大。但是在这种较大风速下,现有模型的计算可能存在误差,因此可以加入自适应调节机制,使得模型可以在不同位置针对不同的示踪云进行搜索范围的自适应调整。可以使得运算速度更快,得到风矢更为精确的云迹风。

由上面的分析可以知道,直观来看,匹配所用的窗口大小决定了其信息含量,对于同一区域,窗口越大则信息量越多,匹配精度越高,但由于测量误差、时间、光照、背景噪声等影响因素,也更难寻找到理想的匹配位置,特别是在大气运动较为剧烈的区域,窗口内信息量较大,很难找到大面积相似的区域,从而有可能找到错误的匹配位置。因此同样可以加入自适应的机制,通过某种方式来表述一定大小的云块灰度特征,根据不同采样点的灰度分布来控制窗口大小来保证示踪云块的有合适的特征。

自适应窗口及搜索范围选择

由于对于同一个位置,选取的范围大窗口总是包含小的窗口,所以大窗口可以匹配的位置小窗口必定可以匹配;反过来却不一样,小窗口可以匹配的位置大窗口不一定可以匹配。当包含信息量合理时能拥有较高的匹配精度;而当在窗口中找不到合适的匹配位置时(如信息量过量导致在搜索范围内的匹配度都达不到阈值要求),此时可以缩小窗口。

考虑到匹配精确度,一个合理的方式是,设定一个运算压力可以承受的较大的初始搜索窗口,如下图所示有 8×8 的窗口,包含了足够多的特征信息,并且设定一个匹配度的阈值。当相关系数低于这个阈值时,可以认为是不匹配的,可以认为此时选取的窗口对于当前选定云块太大,特征信息过多。此时将窗口大小减半,为 4×4 ,减少了云块的特征信息,再进行匹配。重复进行此步骤,直到匹配值达到阈值,则选定该云块进行后面的风矢计算。同时要对窗口减小的次数进行限制,如这里控制减小的次数为两次,当进行两次减小后云块的匹配度还是没有达到该阈值时,认为此云块不稳定,为零风矢。

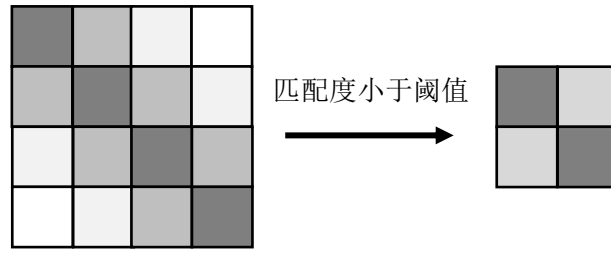


图 22 自适应窗口匹配原理图

当窗口边长每次缩小一半时，最坏情况下计算时间不会超过直接计算所用的时间的 1.4 倍。

自适应搜索范围

在此图样数据中，若搜索范围为 64×64 ，若匹配在边缘区域，风速度可高达 320 km/h，这显然是极罕见的，即搜索范围过大；更合理的范围约为 32×32 ，则可测得最大风速约为 160 km/h。由于搜索范围边长的平方与计算时间成正比，缩小搜索范围可以明显提高运算速度。

但罕见的情况并非不可能出现。因此可以使用多次匹配的算法，当匹配位置在搜索范围边缘时，可以此匹配点为中心，在一个比之前小一些的范围进行二次搜索。若二次搜索范围的边长为第一次搜索边长的一半，则在最坏情况下计算时间不会超过直接计算时间所用的 1.25 倍。

下面对搜索匹配模块的具体操作步骤进行说明，可参考下图。

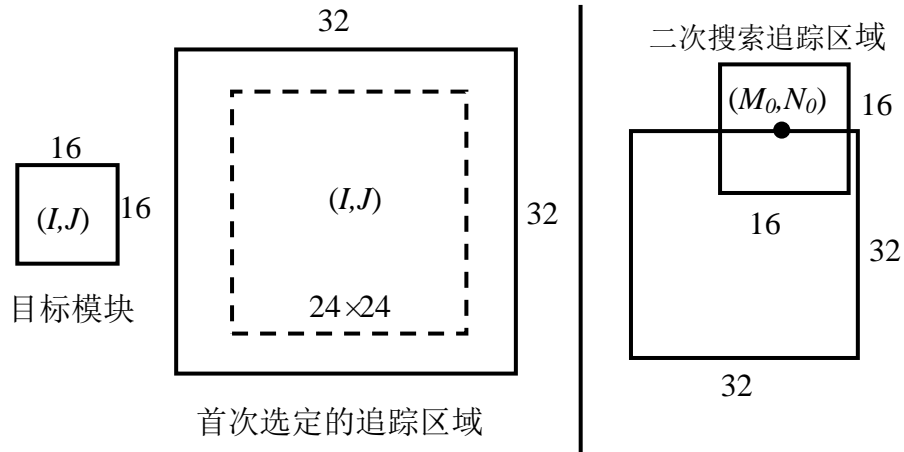


图 23 自适应搜索范围的原理图

(1) 最初确定的追踪区域中搜索匹配模块

对于单个模式识别因子 (OC)，要计算 24×24 次目标模块与追踪区域中的各追踪模块的相关系数，得到一个大小为 24×24 的相关系数矩阵。找出此矩阵中相关系数的峰值 $pMax_0$ 。

若 $pMax_0$ 所对应的追踪模块的中心位置 (M_0, N_0) 不在搜索区域的边沿上，则此追踪模块就被确定为匹配模块，并可计算风矢。否则进入下一步骤。

(2) 在重新确定的追踪区域中搜索匹配模块

若由于搜索区域的大小限制,当最佳匹配 $pMax_0$ 所对应的追踪模块的中心位置 (M_0, N_0) 在搜索范围边缘时,可以以此匹配点为中心,在一个为之前一半 16×16 的范围内进行二次搜索。计算最佳匹配 $pMax_0$ 所对应的追踪模块的中心位置当 (M_0, N_0) 与新搜索范围内各模块的相关系数矩阵,得到新的最佳匹配 $pMax_1$ 。观察 $pMax_1$ 所对应的追踪模块的参考位置 (M', N') , 若 (M', N') 远离新搜索范围边缘,则此追踪模块就被确定为匹配模块,并开始计算风矢,若 (M', N') 依然在搜索范围的边界上,则重复此操作,直到得到的最佳匹配位置不在新的搜索范围边缘上为止。

如果连续进行此操作达到 3 次后,还没有找到相应的匹配模块时不再进行范围的变换。因为,此时计算得到的风矢速度对于半小时卫星云图来说已经达到了 320 km/h , 不可能再进行扩大。此时根据原目标位置与最后的匹配模块位置计算得到风矢为该模块的最终风矢。

综上,两种方法可以结合起来,即可实现对窗口及搜索范围的自适应处理,最坏情况下计算时间不会超过原时间的 1.75 倍,由于自适应窗口能减少无法匹配的情况,可以保证匹配方案等于甚至优于原方法。

其综合流程图如下:

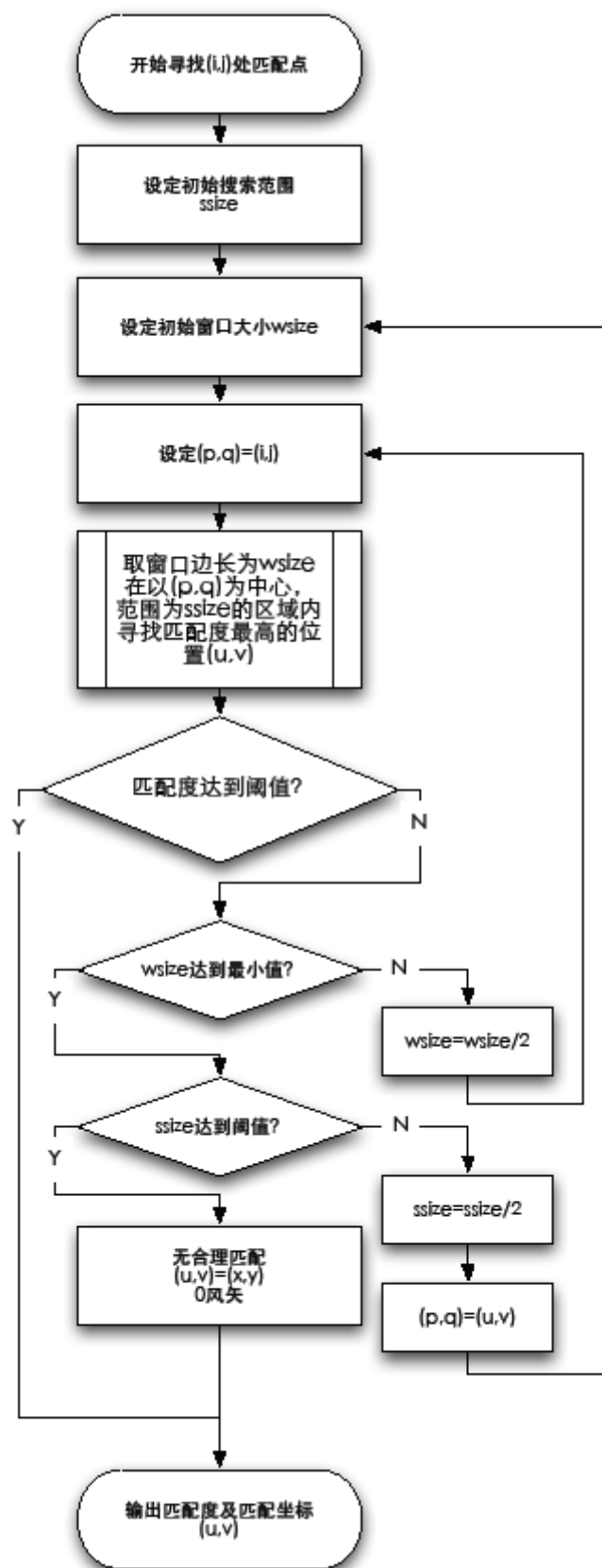


图 24 窗口自适应与搜索范围自适应模块设计流程图

5.4 风矢等压面的估计

前面已经求出了在各个（整数）经纬度出的二维风矢，包括风矢的起始点经纬度、风矢的方向和大小。但是一个完整的风矢还要表示出它所在的等压面的压强。

为确定经纬度处非零风矢的等压面，首先要知道该处非零风矢的温度。而计算温度首先需要将卫星探测的灰度矩阵 $G = \{G_{ij}\}$ 中的数据转换成温度值。通过题中已经给出了每一个灰度数据所对应的温度值，可以建立灰度矩阵 G 到温度矩阵 $T = \{T_{ij}\}$ 的映射 g :

$$g: G_{ij} \rightarrow T_{ij}$$

由分析部分可知，在计算云高时不需要考虑气压低于 200 HPa 或者高于 950 HPa 的情况，此时温度与等压面满足对数关系，因此下式可用于估计示踪云等压面。

$$T = A + B \ln P$$

其中， P 为等压面。题中已经给出了在确定经纬度和等压面上的温度值，记为 $T(\theta, \varphi, P)$ 。根据已给的温度与压强值，可以通过做对数的最小二乘拟合确定在经纬度 (θ, φ) 处上温度与等压面的关系式中的系数 $A_{\theta, \varphi}$ 与 $B_{\theta, \varphi}$ 。

$$B_{\theta, \varphi} = \frac{19 \sum_{k=18}^{36} T(\theta, \varphi, P_k) \ln P_k - \sum_{k=18}^{36} T(\theta, \varphi, P_k) \sum_{k=18}^{36} \ln P_k}{19 \sum_{k=18}^{36} (\ln P_k)^2 - (\sum_{k=18}^{36} \ln P_k)^2}$$

$$A_{\theta, \varphi} = \frac{\sum_{k=18}^{36} T(\theta, \varphi, P_k)}{19} - \frac{B_{\theta, \varphi} \sum_{k=18}^{36} \ln P_k}{19}$$

其中 P_k 为第 k 层对应的等压面的压强值。由于数据中等压面的前 17 个数据的压强小于 150 HPa，根据之前的分析可知，这些数据不满足对数关系，因此在拟合中排除这些数据。

得到拟合方程后只需将温度代入该经纬度下的拟合方程，即可得到示踪云的气压高。

$$P_{\theta, \varphi}(T) = \exp\left(\frac{T_{ij} - A_{\theta, \varphi}}{B_{\theta, \varphi}}\right)$$

因此计算风矢的等压面，只需将要求的经纬度上的灰度值映射到对应的温度，

然后根据拟合出该经纬度处的温度与气压高度的关系式,就可求出压强值 $P_{\theta,\varphi}(T)$ 。

六、 结果分析

这里将传统的相关系数法与本文提出的网络流联合相关法以及自适应匹配法应用于实际云图导风试验,比较其风场的计算结果。

6.1 网络流联合相关法与相关系数法

采用风云2号卫星获得的20:30, 21:00, 21:30时刻红外探测仪探测到的地球上空的温度数据对应的灰度矩阵,观测范围为南纬40度至北纬40度,东经46度至126度,云图分辨率为5050m/pix。利用两种云导风方法,对三幅云图进行导风计算,其中对相关系数法进行了质量控制后,所得到的结果如下图,其中红色为高云、绿色为中云,蓝色为低云,划分方法采用国家卫星中心标准,以700和400为界限:

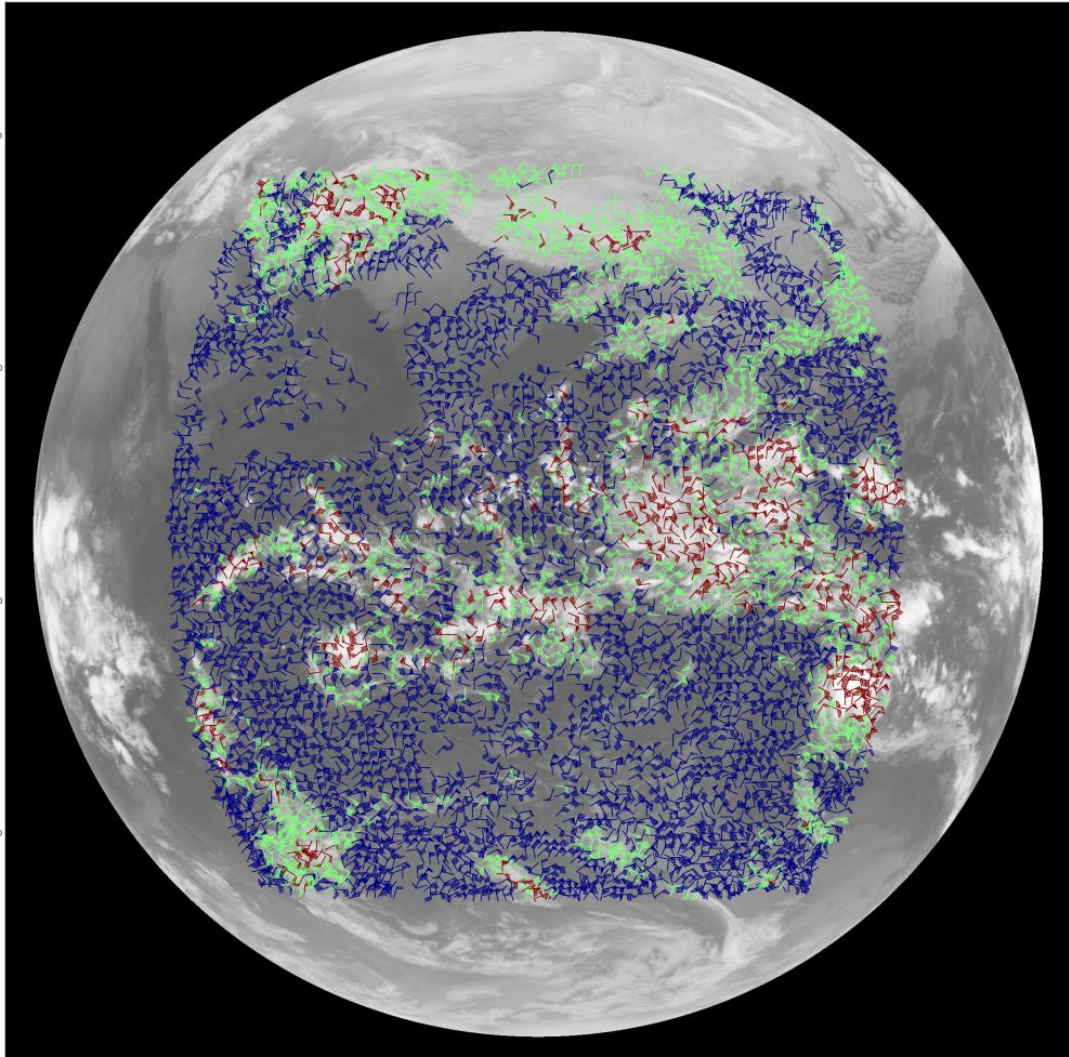


图 25 相关系数法得到的云迹风矢图

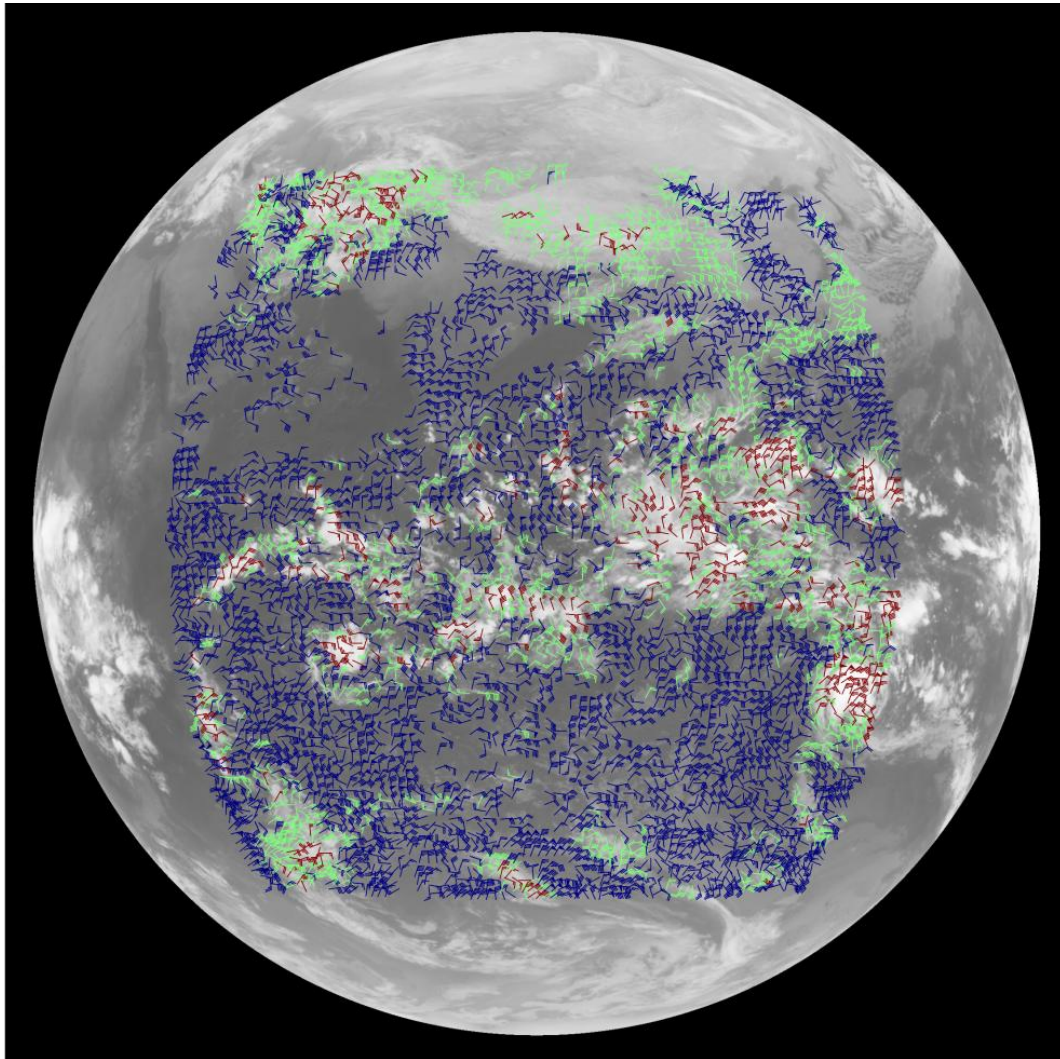


图 26 网络流联合相关法得到的云迹风矢图

首先对云导风结果的正确性进行检验，通常的方法将其和探空资料进行对比。由于缺乏其他相关的气象数据，本题导风结果的检验在客观上存在困难。但是可以看见图中锋面云带北边界的西南风，云带后面的低空西北风，气旋中心附近的涡旋风场，它们都代表了中纬度涡旋云系的典型风场特征，故导风结果基本合理。

由图中可以看到两种方法，低层风场结构基本一致，但传统相关系数法得到的风矢图中依然存在较多的凌乱风矢，风场连续性与一致性不如网络流联合相关法。

表格 3 相关法得到的风矢的相关数据

经纬度坐标	(52,26)	(53,26)	(54,26)	(57,26)	(58,26)	非零风矢数
风速 (km/h)	18.33	24.19	25.37	22.88	20.14	5376
风向(北顺)	84.21	172.43	233.46	230.16	164.13	
等压面 (HPa)	720.22	718.65	668.64	713.68	848.58	

表格 4 网络流联合相关法得到的风矢的相关数据表

经纬度坐标	(52,26)	(53,26)	(54,26)	(57,26)	(58,26)	非零风矢数
风速 (km/h)	16.67	25.34	25.84	23.20	20.76	4491
风向(北顺)	87.39	171.68	233.70	231.62	164.78	
等压面 (HPa)	720.22	718.65	668.64	713.68	848.58	

而从上表中可以看到，两种方法对于选取的几个经纬度的风矢的风向与风速还是较为接近的，而网络流联合相关法的非零风矢的数目要少于相关系数法，这很有可能是由于网络流联合相关法中辅助采样点修正了云块不稳定处的风速，将不稳定的风速通过矢量合成修正为零风矢。

6.2 自适应匹配法与相关系数法

采用风云 2 号卫星获得的 20:30, 21:00 时刻的温度数据，观测范围与云图分辨率保持不变。利用传统相关系数法与本文提出的自适应匹配法进行导风计算，所得结果如下图：

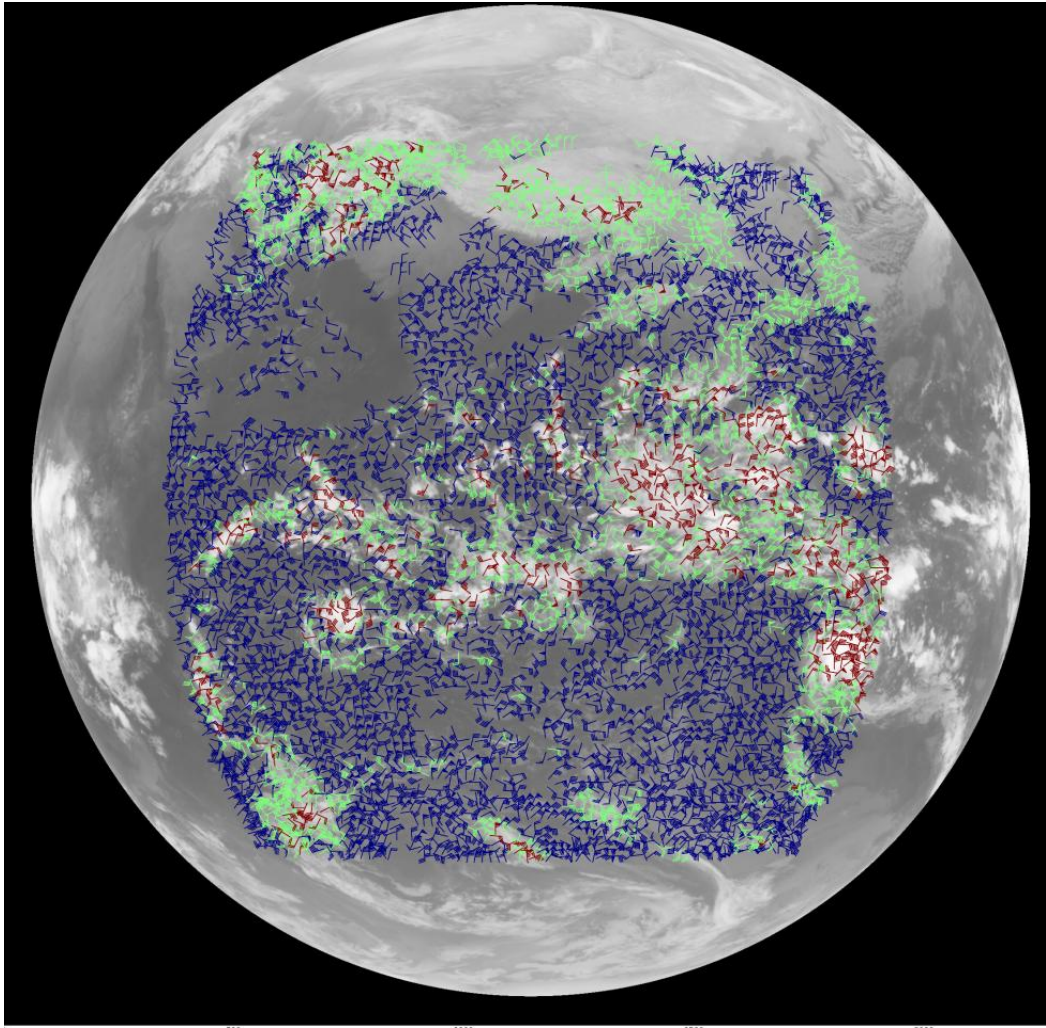


图 27 相关系数法得到的云迹风矢图

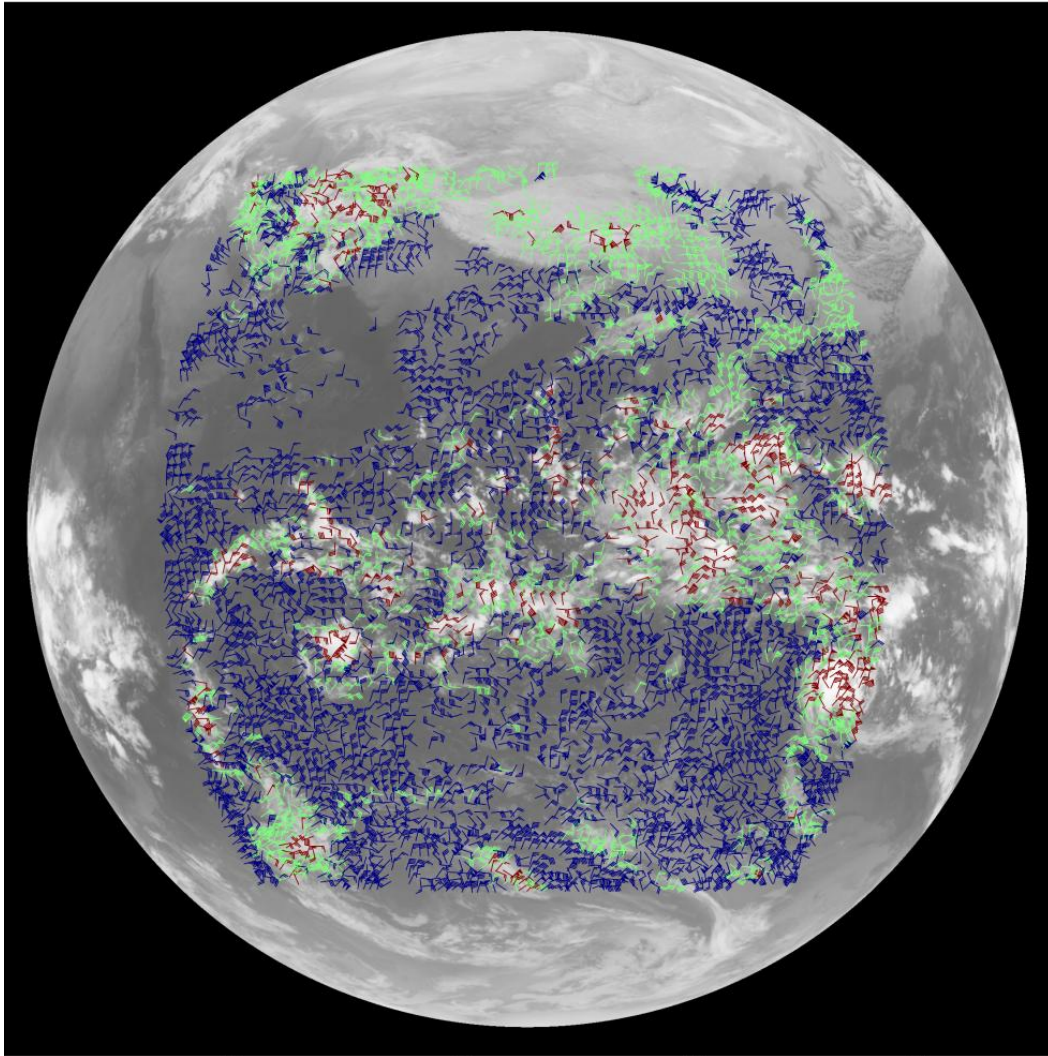


图 28 自适应匹配法得到的云导风矢图

表格 5 自适应匹配法计算得到的风矢相关数据

经纬度坐标	(52,26)	(53,26)	(54,26)	(57,26)	(58,26)	非零风矢数
风速 (km/h)	15.78	23.91	24.32	21.76	20.14	4532
风向(北顺)	87.23	170.44	233.35	231.46	163.77	
等压面 (HPa)	720.22	718.65	668.64	713.68	848.58	

表格 6 自适应匹配法中不同窗口大小及匹配次数

窗口大小	16×16	8×8	4×4
所占比例	63%	35%	2%
匹配次数	1 次	2 次	3 次
所占比例	34%	47%	19%

上表的数据表明，自适应匹配法中，超过 60%的窗口大小都是选用 16×16 ，因此在问题 2 中的 16×16 窗口大小设定是较为合理的，基本能有效的反映云块的灰度特征，而且不会产生由于特征复杂所导致的匹配失败。而搜索范围的统计数据表明，有 84%的匹配过程的匹配次数都小于 3 次，也就是对应的搜索范围小于 48×48 ，因此对于时间间隔等于或者小于三十分钟的卫星云图序列， 64×64 的搜索范围相对偏大。事实上， 64×64 的搜索范围对应到 $5\text{km}/\text{pix}$ 像素分辨率上的间隔 30 分钟的云图序列相当于限制风速为每小时 240km ，远远高于台风等一般常见天气，因此搜索范围设定为 64×64 是没有必要的。

七、 模型的评价

- (1) 本文在进行视场坐标换算的时候，将灰度矩阵中的像素行列号映射为纬度坐标，在绘制海岸线的时，本文将海岸线的纬度坐标与所有灰度矩阵中的像素进行比对，可得到精确度较高的图形，但是此方法需要进行搜索，较为繁琐。
- (2) 文章采用经典云导风方法计算云导风矢并与本文提出的算法进行比较，分析与对比较为全面，可信度较高。
- (3) 本文提出的网络流联合相关法有效地利用了所给出的三幅卫星云图进行计算，而不是常见的利用两幅云图计算得到风矢再对第三幅云图进行进行质量检验的方法。而且充分地使用了周围点的风矢对采样点风矢进行了修正，有效避免了传统相关法可能会产生的凌乱风矢，精度有所提高。
- (4) 提出的网络流联合相关法相较于传统的匹配法，但是该方法由于计算采样点的增加，相对耗时多、计算复杂。而且当三幅图跨度较长时，可能会导致部分风矢特征丢失。
- (5) 提出了可以自适应确定调整窗口大小和搜索范围的方法，提高了计算的精度，但是也增加了一定的计算量。而且当遇到急剧变化的风矢时，得到的风矢可能存在较大误差。

八、 模型的拓展

8.1 模式识别

由于大部分典型天气变化的卫星云图以及风矢都有存在显著特征。如下图为台风的云导风图像资料，从图中可以看出台风的风矢存在明显的螺旋式和放射式风向特征[8]，且示踪云的形状、分布等存在明显特征。因此可以将这种气候的特征与模式加入到模型中，对根据得到的风矢或者云块形状推断天气状况，如台

风、雨雪等进行自动识别，减少人工判读的误差，，为天气预测提供更丰富的信息。

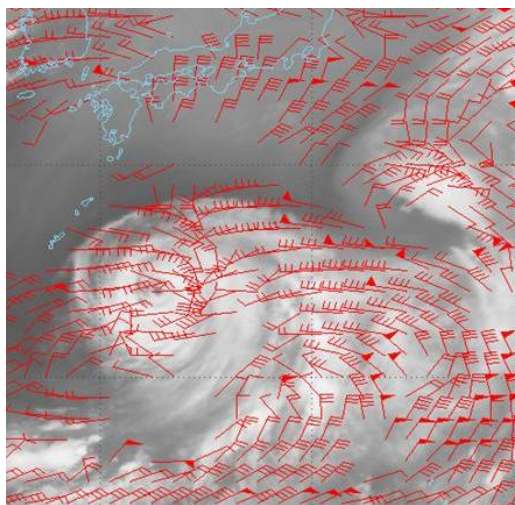


图 29 台风云导风图

8.2 旋转匹配

文章中风矢的计算依赖于多幅卫星云图中示踪云的模块矩阵的直接匹配，因此只能得到云块平移的信息。但是由于大部分云块都同时存在平移和旋转两种运动。因此如果在正常匹配的基础上把示踪云的灰度像素矩阵进行一定角度的旋转，然后再进行匹配，可能会得出更加精确详细的计算结果。但是由于矩阵的旋转数学处理还不完善，并且会使得优化后的模型计算量明显增加，本文不进行详细的讨论。

8.3 背景灰度修正

在文章开头的假设中忽略了地球表面的热源对云层温度的影响，将一定时间范围内地球表面的背景的温度保持不变。但由于卫星云图是通过云层对红外线的吸收实现拍摄的，因此现实中人类活动会产生背景红外辐射，以及陆地和海洋存在的明显红外辐射差异必然会对云层温度造成影响。也就是说背景温度高辐射高的地区上空云块温度会高于其他地区的云块，这显然会对云导风造成误差。

下图为利用灰度矩阵画出的地球卫星云图，图中颜色越深温度越高，颜色越浅温度越低。从图中可以明显看到海洋与陆地存在明显的色差，即使是同一块大陆上，也存在细微的灰度区别。图中用红色方框圈起来的地方可以明显辨认出为阿拉伯半岛、红海以及印度洋，显然海洋和陆地两者灰度有明显的区别。

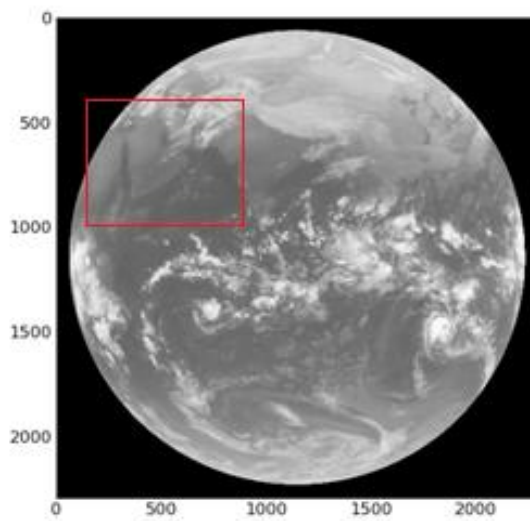


图 30 利用灰度矩阵画出的卫星云图

而这些背景红外辐射都可以看做是灰度图中的背景噪声。如果可以通过其它途径知道具体的地球表面背景温度，得到背景灰度矩阵 J ，并加入到模型中去，可对卫星得到的灰度矩阵进行背景修正，取修正的灰度矩阵 $G' = G - J$ 进行云导风计算就会得到更高的精度的风迹云。此外，还可采用类似傅立叶相位分析法的思想，利用信号处理的方法，对连续云图序列进行高通滤波，将背景的低频信号滤除。

8.4 辅助数据的应用

随着科技的不断进步，气象卫星的测试手段不断增加，大大提高了气象预测的准确度。文章中仅使用了红外探测手段拍摄灰度图像，在实际操作中还可以辅助其它测试方法，如拍摄可见光图像，利用两种图像确定各种气象参数。

九、 参考文献

- [1] 风云二号C星业务产品与卫星数据格式释用手册，国家卫星气象中心，2005年11月，内部资料。
- [2] 朱平, TCFM技术及其在云导风中的应用研究, 2007.
- [3] Purdom J F W. Detailed Cloud Motions from Satellite Imagery Taken at Thirty Second, One and Three Minute Intervals, Prec. to the 3rd International Wind Workshop in Aecona, Switzerland. 10-12 June, 1996.
- [4] Wang Z H, Browning K A, KeHy G A, Verification of the Tracking Technique

- Used in an Experimental Cloud Motion Wind Inferring System. Joint Center for Mesoseale Meteorology, University of Reading, JCMM Report, 78: 1-2, 1997.
- [5] 朱平, 王振会, 许建明, TCMF导风技术介绍及其初步试验研究, 遥感学报, 11:538-544,2007。
- [6] Wang Z H, Zhou J. A Preliminary Study of Fourier Series Analysi for Cloud Tracking with GOES High Temporal Resolution Images, Acta Meteor Sinica, 14(1): 82-94, 2000.
- [7] 大气垂直分层, <http://wenku.baidu.com/view/a1cadd476a20029bd642d57.html>, 2012.9.23.
- [8] 王萍, 宋振龙, 孔秀梅, 卢汉清, 基于云导风场的形成期台风定位, 模式识别与人工智能, 18(6): 752-757, 2005.