

李振军 郭卫东 蒋炳征 路俊方

(空军气象中心,北京 100843)

提 要

简要介绍利用 GMS-5 云图资料研制的《卫星云图综合分析业务系统》,系统在静止卫星资料定量应用方面做了一些有益的工作。

关键词: 卫星云图 业务系统 综合分析

引 言

近年来,静止气象卫星资料在天气分析、天气预报等领域发挥着越来越大的作用,是制作天气预报必不可少的重要工具。空军气象部门常年担负着艰巨、复杂的军事气象保障任务,但其气象卫星资料的应用大多停留在定性处理阶段,远远没有发挥出气象卫星资料应有的潜力,其应用手段与所担负任务的要求相差甚远。鉴于这种状况,我们研制的《卫星云图综合分析业务系统》,包括云图显示、实况显示、航线天气、动画演示和图像输出等 10 个主要功能模块,试图从定量上对卫星资料加以利用,使其在空军气象保障工作中更好地发挥作用。

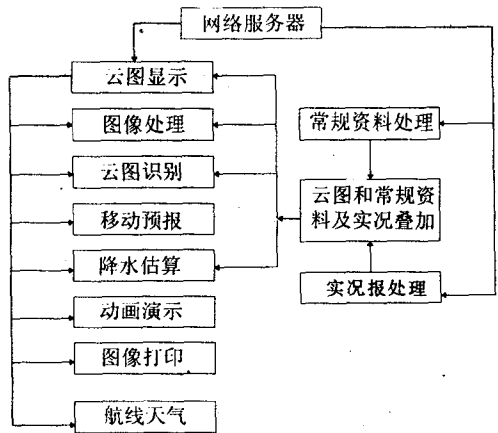


图 1 卫星云图综合分析业务系统流程图

1 系统流程和软件结构

1.1 系统流程

系统由云图显示、图像处理、云图识别、降水估算、移动预报、天气图叠加、实况显示、航线天气、动画演示和图像输出等 10 个主要功能模块组成。系统流程如图 1 所示。

1.2 软件结构

应用软件用 Visual C++ 语言编写,界面为标准的 Windows 多文档(MDI)图形用户界面(GDI)。系统可在 Microsoft Windows 3. x 或 Microsoft Windows 95 系统中运行,操作简便,其软件结构如图 2 所示。

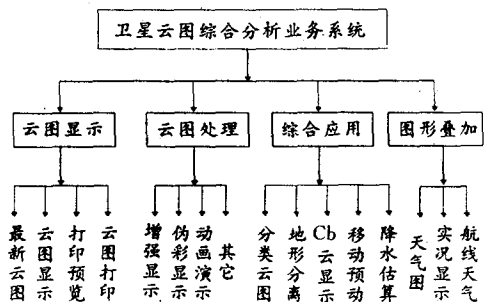


图 2 卫星云图综合分析业务系统软件结构

2 云图识别

卫星云图的识别,主要是根据卫星云图上的信息分布,进行信息的加工和分类,从而确定不同的目标物类。不同的目的可以有不同的分类方法。我们根据空军气象保障的实际需要,利用同一时刻的红外和可见光云图,采用 Bayes 准则,将目标物从云图上用计算机自动区分出来,其中包括低云、中云、对流云、高云、中低云、地表和水表等。分类的 Bayes 准则为:

任一象素点 $x = (V, I)$, 要将它划分为 m 个类中的某一类 w_i 类时,有如下不等式成立:

$$P(x|w_i)P(w_i) \geq P(x|w_j)P(w_j),$$

$$j = 1, 2, \dots, G \quad (1)$$

我们称 $P(x|w_i)P(w_i)$ 为判别函数。

假设样本资料为正态分布,则判别函数可以表达为:

$$G_i(x) = P(x|w_i)P(w_i) =$$

$$P(w_i)(2\pi)^{-1} \left| \sum_i \right|^{-\frac{1}{2}}$$

$$\exp\left[-\frac{1}{2}(x-M_i)^T \sum_i^{-1}(x-M_i)\right] \quad (2)$$

其中, M_i 为 w_i 类的均值向量, \sum_i 为 w_i 类的协方差矩阵。上式两边取对数,并去掉常数项后有如下等式成立:

$$g_i(x) = \ln P(w_i) - \frac{1}{2} \ln \left| \sum_i \right| -$$

$$\frac{1}{2} (x - M_i)^T \sum_i^{-1} (x - M_i) \quad (3)$$

因为 $G_i(x)$, $g_i(x)$ 均为单调递减函数,因此 Bayes 准则可以描述为:若 $g_i(x)$ ($i=1, 2, \dots, m$) 为最大值,则 x 可以归并为 w_i 类。

分类的初值通过训练样本,动态聚类来获得。每次分类后,重新计算每一类的分布函数和先验概率作为下一时次分类的依据,这样就达到了在分类过程中不断学习的效果,使得分类结果不受季节、地理位置及天气系统的影响。从试验情况看,系统能准确地将7类目标物分离出来,对航空气象保障起到了较好的指导作用。图3为1997年5月27日10时32分的分类云图。

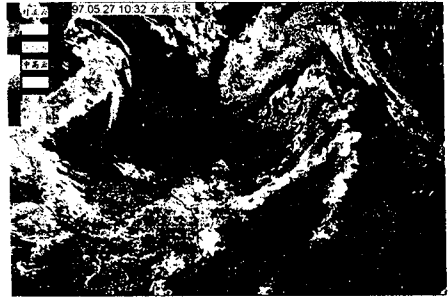


图3 1997年5月27日10时32分分类云图

3 降水估计

我们可以从不同的渠道得到有关降水的资料。长期以来,广大台站的雨量计资料是有关降水信息的主要资料来源。但是雨量计的分布不足,对于中小尺度系统的观测能力也很有限。雷达可以提供高分辨率的降水分布,但其覆盖面非常有限,远远满足不了实际需要。由卫星资料估算得到的降水分布,尽管其估算精度要比雷达粗糙一些,但其独有的时空分辨率高,覆盖面广,大大地弥补了常规雨量计的不足及雷达覆盖的局限性。在中纬度地区,层状云和对流云是产生降水的主要云系。特别是在大片的层状云中,不断产生和发展的对流云往往造成暴雨。因此,利用卫星资料估计出的降水分布,对于水情监视分析和天气分析等均具有很高的使用价值。

1988年,Adler 等提出了利用红外静止气象卫星云图,从中尺度云系中分离出层状云和对流云,然后进行降水估算的算法(简称 CST 算法)。我们将利用改进的 CST 算法,在前面云分类的基础上,根据红外温度(TB)和云模式计算降水率和降水区域。

4 云图的0~3小时短时预报

制作云图移动预报,就是利用红外和可见光静止卫星云图资料,由快速傅立叶变换计算交叉相关系数进行位移矢量分析,然后采用半拉格朗日轨迹预报的方法,制作出时间间隔为1小时、预报时效为3小时的云图预

报。

4.1 位移矢量的计算

4.1.1 计算交叉相关系数

取两个时次、时间间隔为1小时的GMS静止卫星云图,在第一个时次的云图上定义一个象素子集。在此象素子集内,确定1小时内云图最大移动距离,根据这个距离定义一个扫描半径。在第二个时次的云图上,定义一个与第一个时次云图上同样大小的象素子集,其中心点位于第一个时次云图上定义的扫描半径之内。之后计算这两时次云图上象素点间的交叉相关系数。对较大范围的区域而言,计算交叉相关系数时,计算量非常大,一般采用快速傅立叶变换。

4.1.2 云图识别

因为求交叉相关系数时,所求的相关为云和云的相关,这就要求必须排除地形的影响。为此我们首先用前述的 Bayes 判别法识别出云和地形,使得交叉相关系数和移动预报与地形无关。

4.1.3 用快速傅立叶变换(FFT)计算交叉相关系数

为简单起见,用一维的情况来说明快速傅立叶变换计算交叉相关系数的方法。给定两个时间序列 $f(t)$ 和 $g(t)$,则协方差函数可以表示为:

$$c(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t)g(t+\tau)dt \right) \quad (4)$$

假定 $f(t) \Leftrightarrow F(\omega)$, $g(t)$ 和 $c(\tau)$ 可以实施由时间域到频率域上的傅立叶变换,即:

$$\begin{aligned} f(t) &\Leftrightarrow F(\omega) \\ g(t) &\Leftrightarrow G(\omega) \\ c(t) &\Leftrightarrow C(\omega) \end{aligned} \quad (5)$$

则有:

$$F(\omega) = \sum_{t=0}^N f(t) \exp(-2\pi i t \omega / N) \quad (6)$$

$$G(\omega) = \sum_{t=0}^N g(t) \exp(-2\pi i t \omega / N) \quad (7)$$

$$C(\omega) = F^*(\omega)G(\omega) \quad (8)$$

$F^*(\omega)$ 为 $F(\omega)$ 的复数共轭。对 $C(\omega)$ 进行傅立叶变换可以求得:

$$c(\tau) = \sum_{\omega=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} C(\omega) \exp(2\pi i t \omega / N) \quad (9)$$

由上式就可以求得交叉相关系数为:

$$R(\tau) = c(\tau) / (\sigma_f \sigma_g) \quad (10)$$

对二维的情况,计算方法和一维的情况相类似,计算步骤为:

① 计算 $G_{i_0}(i, j)$ 和 $G_{i_1}(i, j)$ 的傅立叶变换,得到 $G_{i_0}(\mu, \nu)$ 和 $G_{i_1}(\mu, \nu)$ 。

② 计算 $C(\mu, \nu) = G_{i_0}^*(\mu, \nu)G_{i_1}(\mu, \nu)$ 。

③ 对 $C(\mu, \nu)$ 进行逆变换后,就可以得到 $Cov(p, q)$ 。因 $\sigma_{i_1}, \sigma_{i_2}$ 为常数,求得 $Cov(p, q)$ 后,即可求出 $R(p, q)$ 。

④ 设 $R(p', q') = \max[R(p, q)]$, 则可求出云的移速和移向分别为:

$$\begin{aligned} |C| &= [(p' \Delta x)^2 + (q' \Delta y)^2]^{0.5/\Delta t} \\ \theta &= \arctan[(p' \Delta x) / (q' \Delta y)] \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\Delta x, \Delta y$ 分别为 i, j 方向,在 Δt 间隔内云的移动距离。

4.2 质量控制

采用滞后交叉相关系数求出的位移矢量还不能直接用于制作云移动的预报,有三个问题需要用质量控制的方法加以解决。第一,当用于交叉相关分析的区域较小时,可能会导致非常大的、非真实的位移矢量。第二,可能存在多层云,而用一层云导出的位移矢量制作云移动的预报,会造成较大的误差。第三,若所选区域内有晴空存在,既使空中有强风存在,也可能会出现零位移矢量的情况。

这样,我们在方案设计时,尽可能地选择适宜的相关分析区域,然后用局地一致性检查进行质量控制,再加上后面的客观分析,上述3个问题就能得到很好的解决。

4.3 客观分析

在求得位移矢量和进行局地一致性检查后,接下来就是要求得整个分析区域上每个象素点的位移矢量,使之在整个区域上形成一个连续的流场。这部分工作由客观分析完成。客观分析方案采用改进的 Cressman 逐步订正法。

4.4 半拉格朗日轨迹预报

利用求得的位移矢量和最近时刻的红外

卫星云图,就可以制作出云图的预报。但在制作预报图之前,应采用半拉格朗日方案对位

移矢量作订正。使用订正后的位移矢量,将明显改进预报效果。

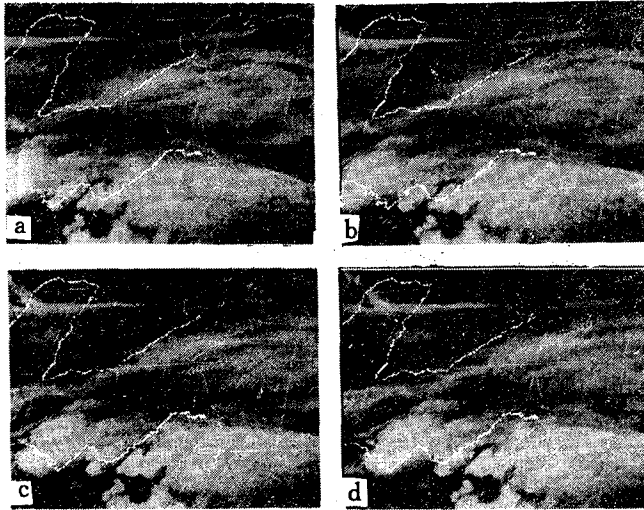


图4 1996年4月18日15时32分所作的3小时云图移动预报
a. 15时32分 b. 16时32分 c. 17时32分 d. 18时32分

4.5 预报结果检验

我们还对移动预报进行了定量检验。检验区域为左上角和右下角的经纬度分别为(40.4°N, 111.2°E)和(29.3°N, 121.6°E)的矩形区域。检验时间为1996年7月、10月和1997年1月、4月,共计4个月,分别代表四季。检验方法为用实况检验预报区域的均方根误差。具体检验方法为:4个月中,每天制作一次移动预报,用后3小时的云图资料进行误差检验,误差检验结果如附表所示。从表中可以看到,预报误差随预报时效的增加而增大。另外,预报误差随季节的变化有明显的差异,夏季预报误差最大,冬季误差最小,而春、秋季介于中间。这是由于在制作移动预报时,没有考虑非线性作用,而夏季对流活动频繁,故预报误差最大,而冬季天气系统稳定,因此预报误差最小。图4为1996年4月18日15时32分所作的3小时云图移动预报。

5 天气图叠加

卫星云图和天气图的叠加,可以更加直观地反映出天气形势场和天气系统之间的相互关联。天气图资料来源为每日两个时次的

(08和20时)地面和高空报,到报后,我们将原始资料进行预处理,包括原始资料的传输、资料格式转换、质量控制和客观分析,形成天气要素库,供天气图叠加时调用。

附表 移动预报误差检验(单位:灰阶)

预报时效	时 间	均方根误差
1小时	1996年7月(夏季)	16.3
	1996年10月(秋季)	13.1
	1997年1月(冬季)	12.4
	1997年4月(春季)	12.9
2小时	1996年7月(夏季)	23.4
	1996年10月(秋季)	17.2
	1997年1月(冬季)	16.3
	1997年4月(春季)	17.1
3小时	1996年7月(夏季)	25.9
	1996年10月(秋季)	20.3
	1997年1月(冬季)	17.5
	1997年4月(春季)	19.8

5.1 原始资料网络传输、资料格式转换

原始资料来源于网络服务器,资料包括每日两个时次(08、20时)的高空、地面报。根据需要,对海平面气压场、925~100hPa 位势高度、温度、露点、风向和风速进行资料格式转

换,形成原始气象资料要素库,供客观分析使用。

5.2 观测资料的质量控制

我们将采用极值检查、垂直内插一致性检查和水平一致性检查等方法进行质量控制。

5.3 最优插值方案

为了保障客观分析的质量,我们采用最优插值方案进行客观分析。但由于多元最优插值计算量大,有时还会出现病态方程组,甚至产生计算不稳定。鉴此,我们采用曲面拟合方法计算预备场,再结合逐步订正法思想,用最优插值方法进行多次内插。采用曲面拟合的分析场作为最优插值的预备场,不仅减少了最优插值的迭代次数,同时计算精度也大为提高。

6 实况显示

根据空军气象保障和资料的特点,我们设计了独特的实况显示功能。即根据用户用鼠标在云图上选择的站点,系统将弹出一个对话框,实时显示所选站点最近3小时天气实况,这样用户可以从上下两个角度对云进行对比分析,丰富了云的内容。之前,将实时收到的各机场天气实况报解密后,分解为各天气要素,形成气象要素库,供实况叠加时调用。

7 航线天气分析

为了使用户便于了解飞机所飞航线上的天气状况,我们设计了航线天气分析,用户可以通过对话框选择航线,也可以通过修改配置文件,增加或减少航线数量和航线周围实况站点。具体操作流程为:

① 用户由航线分析对话框选择所需航线;

② 从配置文件中读取航线资料,包括所选航线、航线导航点经纬度坐标和航线周围实况站点的站号;

③ 根据前述的 Bayes 分类方法,对云图进行分类,主要包括晴空区、层状云区域和对流云区域,为了区分对流云的强弱,对流云进行了分层显示;

④ 根据导航点的经纬度坐标,将其转换为屏幕坐标,并将整个航线联结起来;

⑤ 根据航线周围实况点站号,将其最近时刻的天气实况显示出来,这样,用户可以一目了然地了解整条航线及其周围的天气状况和航线附近站点最新天气实况,避免危险天气,保障飞行安全。

8 结论

本系统紧密结合空军的实际业务工作,充分利用了现有的业务自动化条件,采用了国内外多种先进的思想和技术,形成了包含云图显示、云图处理、云图识别、降水估算、移动预报、天气图叠加、实况显示、航线天气、动画演示和图像输出等功能为一体的自动化业务流程,系统完善,时效性强,性能稳定、业务化、自动化程度高,系统的使用,将对航空气象保障起到较好的指导作用。

系统在显示的可视化方面以及系统量化应用中的一些技术模型,在今后的工作中还需要进一步发展和完善。

The Operational System of Composite Analysis of Satellite Cloud Imagery

Li Zhenjun Guo Weidong Jiang Bingzheng Lu Junfang

(Meteorological Center of Air Force, 100843 Beijing)

Abstract

An operational system was described, which is designed mainly for quantitative analysis and application of GMS-5 satellite data. The system includes ten parts: the satellite data mapper, the satellite data processor, identification of satellite imagery, estimation of rainfall, cloud motion estimation, weather chart superposition, view of weather observations, analysis of route weather, demonstration of cartoon and satellite imagery print.

Key Words: satellite imagery operational system composite analysis