

## 用数字化卫星资料作客观、定量降水 短时预报的自动子系统

邓 勇

(武汉中心气象台)

### 提 要

应用红外数字化卫星资料及常规气象报告, 建立了一个可作0—4小时区域和站点客观降水预报的工作系统。系统可在IBM-PC微机及兼容机上运行, 能满足实时短时预报的要求。经过一年的实际运行检验, 预报效果良好。

60年代以来, 国内外不少气象工作者致力于研究用卫星、雷达获得的气象信息制作短时降水预报; 80年代美国的PROFS计划、英国的FRONTIERS计划等表明了这方面工作的可行性和有效性<sup>[1]</sup>。1987年我们研制了武汉WSR-81S数字化雷达资料作强对流天气路径临近预报的自动子系统<sup>[2]</sup>; 近两年我们对武汉数字化卫星资料作0—3h或0—6h降水预报进行了探索, 建立了降水预报自动子系统。本文将介绍这一子系统的基本设计和1989年6月15日—8月15日逐时的试验结果。

### 一、子系统设计

为克服武汉WSR-81S雷达受230km有效控制半径限制和非气象回波等因素的影响, 把预报试验区扩展到230km半径以外, 除了利用武汉周围多部雷达拼图之外, 一种有效的方法是用气象卫星资料制作试验区的降水预报<sup>[3]</sup>。

图1是用武汉数字化卫星资料作客观、定量降水短时预报的自动子系统结构框图。由图可见, 这一子系统主要由三部分组成: 资料处理、降水量计算、预报产品输出。其工作流程是: GMS的图象信息在长城C-H微机上作数字化处理后, 送到IBM-AT微机上, 常规天气报告经长城C-H微机收报整理后, 将57, 58天气区的报告送到IBM-AT微机。AT微机对卫星资料作快速的数字图象处理, 对天气报告经读报解报处理, 分离出要素场, 投影到割线为 $30^{\circ}\text{N}$ 、 $30^{\circ}\text{S}$ 的割圆柱卫星图象底图上。根据匹配的卫星资料和地面雨量场估计预报区域中是否有降水和降水强度, 用卫星资料和探空资料估算降水云团的移动路径, 作降水强度的路径积分计算预报区域内0—3h或0—6h的非均匀场降水量和用概念模式求出随体变化降水量。计算机以彩色方式显示, M-1724打印机以分层方式打印输出预报区域累计面降水预报图象和预报区中某些试验点的累计降水量预报图。

系统设计以图象和管理功能较强的BASIC语言和运行速度快的宏汇编语言组合实

现, 从资料输入到预报图象输出, 系统运行大约 8—10min, 充分保证实时预报的要求。

1. 资料处理

(1)二次量化 长城 C-H微机传送的卫星信息是128个等级的数字数据, 若按128个灰度值(彩色值)在AT机上处理, 一方面受到AT机16个彩色值的限制, 另一方面灰度等级太细, 对于将计算的灰度与降水强度的关系可能出现不稳定、不规则的情形。因此, 为了方便、快速处理数据, 并照顾到各种降水对应的灰度等级, 采用均匀量化法将128个灰度级化为15个等级。与此同时, 剔除某些奇异信息点。

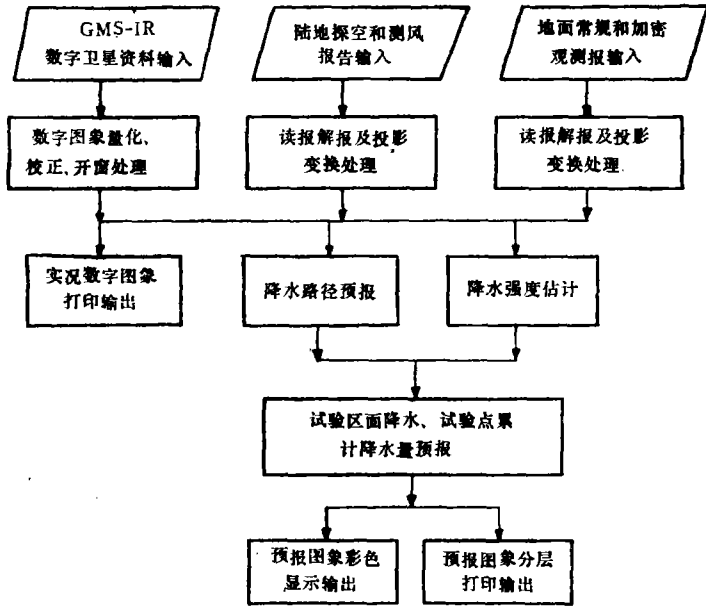


图1 子系统结构框图

(2)位置校正 图象位置校正主要是斜校正处理。由于卫星信息在作A/D转换和采样过程中, 每一行的初始相位未能精确确定, 导致生成的卫星图象系统性地向左或向右倾斜以及由此引起的投影变换过程中图象的旋转, 图2描述了这种畸变现象。图中IOJ为

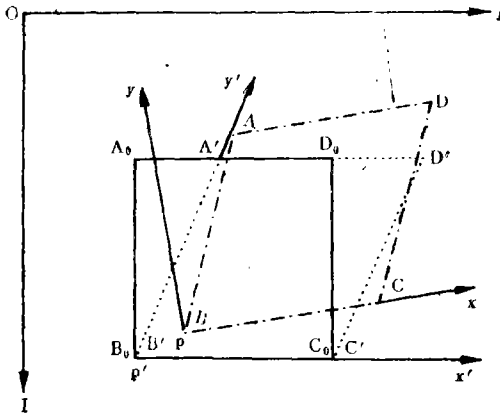


图2 畸变校正示意图

屏幕直角坐标系, 假定在 IOJ系下有正方形  $A_0B_0C_0D_0$ , 畸变后就可能为仿射形  $ABCD$ 。斜校正的目的就是使变形图象恢复原始图象特征, 由以下几步实现。

①参考点的确定 由图2可见, 屏幕坐标系 (IOJ) 为无畸变坐标系, 参考点为计算机能自动确定的  $A(110^\circ E, 35^\circ N)$ 、 $B(110^\circ E, 30^\circ N)$ 、 $C(115^\circ E, 30^\circ N)$ 、 $D(115^\circ E, 35^\circ N)$  四点。计算机根据  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  点的灰度特征, 在 IOJ 系下计算分段的列向和行向灰度测度  $d_v$  和  $d_h$  自动确定这四个参考点。

设第  $i$  行的行向测度为  $d_{hi}$ , 则

$$d_{hi} = \sum_j \left| \Delta_i f(i, j) \right| + \sum_j \left| \Delta_i f(i-1, j) \right| \quad (1)$$

同理, 第  $j$  列的列向测度为  $d_{vj}$ ,

$$d_{v,i} = \sum_i \left| \Delta_i f(i, j) \right| + \sum_i \left| \Delta_i f(i, j-1) \right| \quad (2)$$

其中,  $f(i, j)$  为 IOJ 系下  $(i, j)$  点的灰度值,  $\Delta_i f(i, j) = f(i+1, j) - f(i, j)$ ;  $\Delta_j f(i, j) = f(i, j+1) - f(i, j)$ 。

又由(1)式的  $j$  和(2)式的  $i$  的分段定义域求和, 分别得到 A、B、C、D 点对应的  $\{d_{ii}\}_A$ 、 $\{d_{vj}\}_A$  等八个测度子集。设 A 点所在行  $i_A$ 、列  $j_A$  的测度为  $d_{iA}$  和  $d_{vA}$ , 则有

$$d_{iA} = \text{MAX}\{d_{ii}\} = d_{iA} \quad (3)$$

$$d_{vA} = \text{MAX}\{d_{vj}\} = d_{vA} \quad (4)$$

由(3)、(4)式确定 A 点在 IOJ 系下坐标值  $(i_A, j_A)$ 。同理可由(1)、(2)式确定 B、C、D 点的坐标值。

②坐标变换 根据图象产生畸变的原因, 作埃尔米特和仿射坐标变换。

埃尔米特变换为解决图象旋转问题, 可看作是将四边形 ABCD 转变成  $A'B'C'D'$  的变换。根据 A、B、C、D 四个已知参考点, 建立畸变坐标系  $xpy$  (见图 2), 则有变换公式

$$i = a_1 x + a_2 y + a_3 \quad (5)$$

$$j = a_2 x + a_1 y + a_4 \quad (6)$$

由 B、C 两点在  $xpy$  系下和  $B_0$ 、 $C_0$  两点在 IOJ 系下的坐标值代入(5)、(6)式, 求出系数  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ , 得到定系数的变换公式。

仿射变换将倾斜畸变图象(四边形  $A'B'C'D'$ )校正到原有状态(正方形  $A_0 B_0 C_0 D_0$ )。设畸变仿射坐标系  $x'p'y'$ , 则变换公式为

$$i = b_1 x' + b_2 y' + b_3 \quad (7)$$

$$j = b_4 x' + b_5 y' + b_6 \quad (8)$$

由  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 、 $D'$  中任意三点在  $x'p'y'$  系下和  $A_0$ 、 $B_0$ 、 $C_0$ 、 $D_0$  中对应三点在 IOJ 系下的坐标值, 求(7)、(8)式中系数。

考虑两种变换的共同作用, 求出 A、B、C、D 点与  $A_0$ 、 $B_0$ 、 $C_0$ 、 $D_0$  点的行、列差值  $\Delta I$ 、 $\Delta J$ , 根据四对行、列差值, 对整幅图面作畸变校正处理。

(3)窗口处理 为减少不必要的计算, 子系统采用了二次开窗方法。首先确定预报区  $\{(110-115^\circ E), (29-32^\circ N)\}$  对应的计算机内存区和屏幕显示区为预报窗口  $S_1$ 。考虑预报时段内降水云团可能从预报区外移入预报区, 根据预报时效  $T$  和云团最大可能移速  $v$  以及计算机速度  $w$  等因素, 确定套在  $S_1$  之外的边界窗口  $S_2$ , 即

$$S_2 = g(T, v, w) \quad (9)$$

由上式确定的  $S_2$  为  $\{(105-120^\circ E), (25-35^\circ N)\}$  对应的内存区和显示区。

两窗口中的图象资料包含有经纬网和地理标志等非气象信息。为计算机能自动计算降水, 需要在非气象信息的经纬线等处恢复原来的气象信息。子系统采用牛顿前插公式分别沿经线和纬线方向作插值处理。沿经线方向公式为

$$f(i, j)_1 = f(i-1, j) + \frac{1}{2} [f(i+1, j) - f(i-1, j)] - \frac{1}{8} [f(i+3, j) - 2f(i+1, j) + f(i-1, j)] \quad (10)$$

沿纬线方向为

$$f(i, j)_2 = f(i, j-1) + \frac{1}{2} [f(i, j+1) - f(i, j-1)] - \frac{1}{8} [f(i, j+3) - 2f(i, j+1) + f(i, j-1)] \quad (11)$$

其中  $f(i, j)$  为 IOJ 系下坐标点  $(i, j)$  对应的灰度值。由 (10)、(11) 式计算出的小于零的值规定为零，大于 15 的值为 16 进制的 F。

$S_1$  和  $S_2$  窗口中测站的地面天气报告和探空报告，由读报解报程序快速分离出地面降水量场和高空风场，并将这两个场与卫星灰度场在割圆柱底图上在位置上配准。

## 2. 降水量估计

在预报时段  $T_0 - (T_0 + T)$  内，预报区  $S_1$  中各点的降水量可用降水强度对时间的积分得到。若设  $S_1$  中  $p$  点的降水量为  $R_p$ ，则其估算公式为

$$R_p = R_{pc} + \int_{T_0}^{T_0+T} \frac{\partial r_p(t)}{\partial t} dt$$

其中， $R_{pc}$  为定常降水量， $r_p(t)$  为预报时段中  $\Delta t$  时段  $p$  点的降水量。设

$$R_{pc} = r_p(T_0) \cdot \Delta T$$

$$R_{p1} = \int_{T_0}^{T_0+T} -\vec{V} \cdot \text{grad } r_p(t) \cdot dt$$

$$R_{p2} = \int_{T_0}^{T_0+T} \frac{dr_p(t)}{dt} \cdot dt$$

其中， $\vec{V}$  为降水云团移动速度。则有

$$R_p = R_{pc} + R_{p1} + R_{p2} \quad (12)$$

由 (12) 式可知， $R_{pc}$  一定时，降水量由非均匀变化和随体变化所决定，在预报过程中反映为降水量  $r_p(t)$  和移速  $\vec{V}$  的预报。

图 3 中 A、B 曲线是我国青藏高原以东中纬地区云图灰度级次  $s(t)$  与降水量  $r(t)$  关系的统计曲线<sup>[4]</sup>。由 A、B 曲线可见，随着灰度级次的增大，无论是对流性降水还是稳定性降水，单位时间降水量呈指数增加的趋势非常明显。子系统在认可这种统计趋势的前提下，根据某一时次配准的卫星灰度场与地面降水场求得某一时段灰度与降水的特定关系（如图中的 C、D 曲线），由这一特定关系计算这一时段的降水量。

设在  $\Delta t$  时段降水量  $r(t)$  与灰度级  $s(t)$  的关系为

$$r(t) = g_1(t) \cdot \exp[s(t)] + g_2(t) \quad (13)$$

式中系数 $g_1(t)$ 、 $g_2(t)$ 确定图中 $r(t)$ 、 $s(t)$ 组成的笛卡尔系下关系曲线的曲率和位置。随着时次不同， $g_1(t)$ 、 $g_2(t)$ 可能变化， $g_1(t)$ 、 $g_2(t)$ 的变化反映为关系曲线的变化。为在计算机上用宏汇编语言实现(13)式计算，将式中指数部分按收敛幂级数展开

$$r(t) = g(t) + g_1(t) \left[ s(t) + \frac{1}{2!} s^2(t) + \dots + \frac{1}{n!} s^n(t) \right] \quad (14)$$

其中 $g(t) = g_1(t) + g_2(t)$ 。

根据窗口 $S_1$ 、 $S_2$ 中各象点的灰度级次，由(14)式可求出某一时刻的面降水分布 $r(t)$ 。又由预报时段 $\Delta T$ ，得到窗口中任一点的 $R_{pc}$ 。

雨团或降水云团移动的预报方法较多<sup>[5]</sup>。由于子系统所用的是时间间隔为3 h 的红外卫星资料，在这一时间间隔里，通常降水云团的数字图象特征变化极为显著，在实时的要求下，用图象识别和相关等方法计算机自动求预报矢比较困难。因此，这一子系统采用引导气流法求 $\vec{V}$ 。再则，在参考文献[2]中已对引导气流法与某些方法作过比较，就整个降水过程而言，差异并不显著。

统计 $S_1$ 区中降水云团移动与700hPa、500hPa等层次的高空风场关系发现，500hPa高空风作为引导气流最合适，经F检验接受的回归方程为

$$d_r = 1.04 d_{500} - 1.02 \quad (15)$$

$$f_r = \begin{cases} 0 & f_{500} < 3 \\ -\frac{1}{25} f_{500}^2 + \frac{13}{5} f_{500} - 6 & 3 \leq f_{500} < 30 \\ 36 & 30 \leq f_{500} \end{cases} \quad (16)$$

其中， $d_r$ 、 $f_r$ 为云团移向、移速； $d_{500}$ 、 $f_{500}$ 为500hPa层风向、风速。 $f_r$ 单位为km/h， $f_{500}$ 为m/s。

基于某一降水过程某一较短的降水时段灰度等级与降水关系基本稳定的假定，由(14)、(15)、(16)式可求出这一时段 $\Delta T$ 内非均匀场引起的窗口中任一点的降水变化量 $R_{p1}$ 。而降水的随体变化部分着重引入降水加强减弱的概念模式，如降水的日变化、 $S_1$ 中地形的作用，天气要素场的影响等对 $R_{p2}$ 的贡献，将这些影响进行量化处理，得到某一时段的 $R_{p2}$ 。再由求得的 $R_{pc}$ 、 $R_{p1}$ 、 $R_{p2}$ 求出P点的降水量 $R_p$ 。对 $S_1$ 区中逐点作上述估算，得到这一预报时段的面降水量分布。

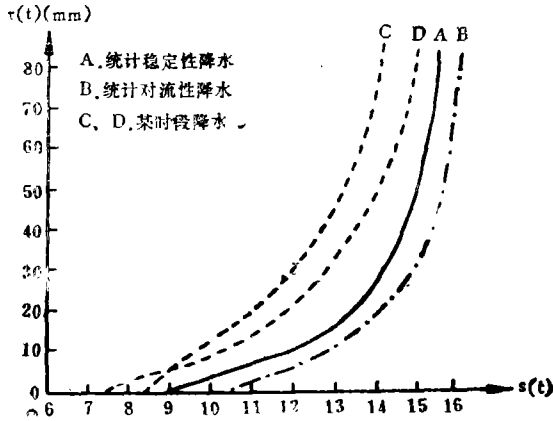


图3 灰度级次与降水关系图

### 3. 结果输出

根据台、站实际业务工作需要,子系统输出两种产品:实况数字化卫星灰度等级图象和降水量预报图象。实况图象以16进制数打印输出,为了不损失气象信息,采用了气象信息覆盖经纬线、省界标志线的覆盖技术。预报图象通过彩色显示器和打印机输出,累计雨量图象以四种彩色值(四个等级)分别对应0—4.9mm、5—14.9mm、15—24.9mm和25mm以上四种降水量。单站累计降水量由降水量-时间坐标系中的降水曲线表示,子系统中计算了 $S_1$ 中9个试验站的降水。

## 二、试验结果

1989年6月15日08时到8月15日20时,系统进行了三峡峡口到江汉平原东界梅雨和盛夏降水预报试验,系统运行正常。在卫星、地面和探空资料基本齐全的情况下,对 $S_1$ 中有可能发生降水的时段作0—3h或0—6h区域面降水量及单站累计降水量预报,以临界成功指数CSI作为评分标准, $CSI = [X/(X+Y+Z)] \times 100\%$ ,其中,X为报准次数,Y为漏报次数,Z为空报次数。

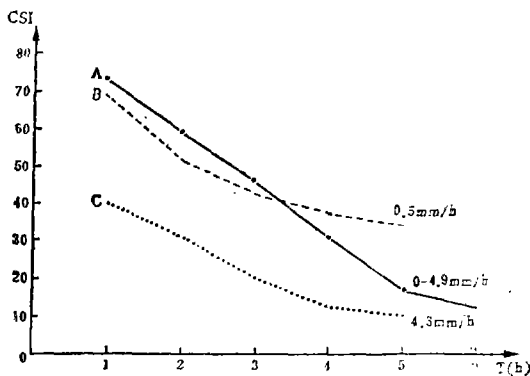


图4 试验结果CSI-T图

图4是小一中雨的试验结果。图中纵坐标为CSI,横坐标为预报时段T,单位为h。曲线A为这一子系统预报的499站次0—4.9mm/h降水的CSI变化曲线,检验面积为170km<sup>2</sup>。B、C曲线是Bellon等研究系统预报0.5mm/h和4.3mm/h降水CSI随时间变化曲线,检验面积为180km<sup>2</sup> [6]。由图可见,在试验个例足够多的情况下,子系统的预报结果与Bellon等的结果基本一致。随着预报时段增长,准确率明显下降,有效预报时段不超过4—5h。

这一子系统在设计过程中侧重考虑了3小时40mm或6小时50mm以上的大暴雨,但在整个试验期间5.0mm/h—14.9mm/h或更大的降水个例较少,只出现十几次或几次。在资料齐全的情况下,系统发布大暴雨预报5次,空报3次,报对2次;漏报2次,CSI为28.5%。若将检验面积从170km<sup>2</sup>扩大到6400km<sup>2</sup>,则CSI为43%。由此可见,随距离误差的增大,CSI显著提高。

经过试验可以看出两个主要问题:第一,由于试验次数的限制,对小一中雨作CSI计算时,降水量取了一定的范围,这个范围已包含了增大CSI的因素。对大暴雨的预报检验次数报为有限,因此,这一子系统的预报能力还有待于更进一步试验的检验。第二,大暴雨的三次空报中,有两次是降水过后云团卷云砧强烈发展造成的,因此,进一步利用计算机自动识别中尺度云团的变化,对改进系统的预报能力可能是一条重要途径。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 布朗宁, K. A. 编, 阎凤仙、马洪骅、李泽椿译, 实时预报, 气象出版社, 18—64, 1986.
- [ 2 ] 邓 勇、张培昌, 利用数字雷达柱体最强回波区象作强对流天气路径临近预报, 南京气象学院学报, 12卷, 4期, 405—414, 1989.
- [ 3 ] Austin, G. L. and Bellon, A., Very short-range forecasting of precipitation by the object extrapolation of radar and satellite data. nowcasting, edited by Browning, K. A., 177—190, 1981.
- [ 4 ] 郑国光, 红外分层增强云图的温度标定及使用方法的讨论, 南京气象学院学报, 1984, 2, 234—243.
- [ 5 ] Leese, J. A., Novak, C. S. and Clark, B. B., An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. J. Appl. Met., 10, 110—112, 1971.
- [ 6 ] Bellon, A. and Austin, G. L., The real time test and evaluation SHARP, A short-term precipitation forecasting procedure. Preprints, 18th Conf. On Radar Met., Amer. Met. Soc., 478—482, 1978.

## AN AUTOMATIC SUBSYSTEM FOR VERY SHORT-RANGE PRECIPITATION FORECASTING USING DIGITAL SATELLITE DATA

Deng Yong\*

### ABSTRACT

An operational system, which can be used to predict objectively the regional and point precipitation in four hours, has been established by using digital infrared satellite data and daily meteorological messages. The system can work on the IBM-PC computer, satisfying the requirement for real time forecasting. It is proved from the operational tests last year that the system is quite effective in forecasting.

\* Affiliated with the Wuhan Central Meteorological Observatory