

# 天气雷达回波外推技术应用研究

朱 平<sup>1</sup> 李生辰<sup>1</sup> 肖建设<sup>2</sup> 徐 亮<sup>1</sup> 靳世强<sup>1</sup>

(1. 青海省气象台, 西宁 810001; 2. 青海省气象科研所)

**提 要:** 利用天气雷达体扫基数据, 对其强度数据做了回波外推运算。在成熟的COTREC(Continuity of Tracking Radar Echo by Correlation vectors)和质心跟踪技术的基础上, 运用傅立叶相位分析技术计算“亚像元”速度, 得到外推后的回波数据和图像, 根据Z-R关系得到外推回波的雨强分布。通过将计算与不计算“亚像元”速度的外推回波与实况回波、外推所得雨强分布与PUP的1小时降水量(OHP)产品和自动雨量站记录分别做比较分析, 结果表明, 通常计算“亚像元”速度的外推要比不计算的准确度更高, 并且外推所得1小时降水量比OHP的可信度更大。在各种降水类型的天气过程中, 对该技术进行了多次检验, 结果证明是适用的, 能对TREC技术起到一定改进作用, 且其外推所得雨强分布在短时临近降水预报中具有一定的参考价值。

**关键词:** COTREC 傅立叶相位分析 质心跟踪

## Study on Extrapolation Technique of Weather Radar Echo and Its Application to Nowcasting

Zhu Ping<sup>1</sup> Li Shengchen<sup>1</sup> Xiao Jianshe<sup>2</sup> Xu Liang<sup>1</sup> Jin Shiqiang<sup>1</sup>

(1. Qinghai Province Meteorological Observatory, Xining 810001;

2. Qinghai Province Meteorological Institute)

**Abstract:** The basal data of volume scanning of Doppler radar is extrapolated. Based on the ripe COTREC (Continuity of Tracking Radar Echo by Correlation vectors) and centroid tracking technique, the “sub-pixel” velocity is computed by Fourier phase analysis technique, so the echo data and its image are obtained through extrapolation. Furthermore, the distribution of precipitation intensity is worked out based on the Z-R formula. The extrapolated results with and without use of sub-pixel velocity are compared with actual intensity data of volume scanning, the distribution of precipitation and one hour precipitation (OHP) product of PUP in WSR-88D are compared with the data of automatic precipitation station records. The analysis results indicated that the accuracy

of using sub-pixel velocity in extrapolation is higher than that of non-use, and the reliability of one hour precipitation through extrapolation is greater than the OHP of PUP. The extrapolation technique is tested in different kinds of weather process. The findings show that this technique is applicable, can improve the technique of TREC, and has some referenced value in nowcasting.

**Key Words:** COTREC Fourier phase analysis centroid tracking technique

## 引 言

对雷达回波进行外推,即对回波的运动进行跟踪。早期的回波运动跟踪都是基于雷达回波反射率因子图像,使用常用的 TREC<sup>[1-9]</sup>技术,它既适合于对流云也适合于层状云的跟踪,但不能给出变化趋势。

Hilst 等(1960)<sup>[1-4]</sup>先后将交叉相关技术应用用于跟踪风暴簇的整体移动。Rinehart 等(1978)<sup>[5]</sup>首先发展了用相关法跟踪回波运动的 TREC(Tracking Radar Echo by Correlation)技术,该技术可以较好地反演风暴内部运动。Rinehart(1981)<sup>[6]</sup>又提出建议在应用 TREC 技术时,时间间隔最好小于 5 分钟,否则由于回波型的变化将导致无序矢量的产生。Smythe 等(1983)<sup>[7]</sup>和 Tuttle 等(1990)<sup>[8]</sup>沿用同一概念反演出边界层内的气流。Li 等(1995)<sup>[9]</sup>在 TREC 技术的基础上发展了一种 TREC 矢量的连贯性技术,即 COTREC(Continuity of TREC vectors)技术,使所得矢量场较为连续。之后, TREC 技术在估计回波运动场中得到广泛应用<sup>[10-12]</sup>。乔春贵等(2006)<sup>[13]</sup>使用质心法对整幅雷达回波图进行线性外推,所得结果对稳定性的层状云回波有较好的外推能力,而对其它类型的云的回波外推能力较弱。张亚萍等(2006)<sup>[14]</sup>在常用的 TREC 技术基础上,发展了 DITREC(Difference Image-based Tracking Radar Echo by Correlations)技术, DITREC 矢量场的时间连续性和空间连续性好于 TREC 矢量场,但在外推中没有考虑回波生消的变化,

需要三张间隔 5 分钟左右的反射率因子图像序列才能生成一个 DITREC 矢量场,并且 DITREC 矢量数少于 TREC 矢量数。

Wang Z H 等(1977)<sup>[15]</sup>提出相关技术追踪云块的位移时存在“亚像素位移”问题,用傅立叶相位分析技术能避免该问题,且能够计算出处于发展或消散阶段的云块的运动矢量。王振会等(2005)<sup>[16]</sup>提出 TCFM(Tracking cloud with combined Fourier phase analysis and Maximum correlation)技术,该技术能在最大相关法整数倍像素位移的基础上进行亚像素尺度修正,进一步提高目标云块的追踪精度。

当地 C 波段雷达每次体扫用时约 7 分钟, TREC 外推中必然有无序矢量的产生,本文在 COTREC 和质心跟踪技术的基础上,再使用傅立叶相位分析技术,它能计算出 1 分钟间隔云块的移动速度,处理处于生消阶段的回波的一定程度的变化,使无序矢量的产生得到更多地抑制,并且通过计算“亚像元”速度以提高追踪精度。将外推回波强度及 1 小时降水量图像应用到预报实践中,为当地短时临近降水预报提供参考。

## 1 前提条件、方法说明

回波图像块在 5 分钟之内不能发生很大变形或翻转,其变化必须满足平稳随机过程,这是任何使用相关技术、质心跟踪以及傅立叶相位分析技术处理雷达回波的前提。

为提高计算速度和减小一维傅立叶相位分析的误差,采用二维快速傅立叶相位分析

法<sup>[17]</sup>(简称 FFT2D)。外推回波的时间步长为 7 分钟。首先根据相邻两个时次( $t_0, t_1$ )的雷达强度回波数据,在  $M \times M$  像素的回波图像内,以  $N \times N$  像素为外推计算单位,将  $t_1$  时次作为目标图像块的所在回波图像,用 COTREC 法与 FFT2D 得到回波块从  $t_0$  运动到  $t_1$  的移动速度,再用质心法得到对应回波块的质心位置,并由强度数据得到质心强度,从而得到质心强度变化率,作为对应外推回波块的强度变化率,在  $t_1$  时次回波图像数据的基础上,根据各回波块的移动速度和强度变化率得到外推的  $t_2$  时次的各回波块的位置和强度数据。计算过程见图 1 的说明。

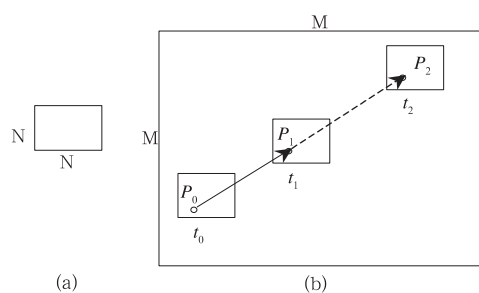


图 1 外推计算单位(a)和  
外推回波强度变化计算(b)示意图

图 1 中, $M \times M$  表示强度回波图像的尺寸( $500 \times 500$ ), $N \times N$  表示回波的外推计算单位( $10 \times 10$  像素的回波块), $P_0, P_1$  分别表示  $t_0, t_1$  时次的对应匹配回波图像块的质心, $P_2$  所在回波块是由  $P_0$  和  $P_1$  所在回波块外推所得的  $t_2$  时次回波块, $Z_{P_0}, Z_{P_1}, Z_{P_2}$  分别表示质心处的强度, $u, v$  分别表示回波块从  $t_0$  时刻运动到  $t_1$  时刻的  $x, y$ 、方向的速度,令  $(i_{t_2}, j_{t_2})$  表示外推的  $t_2$  时刻回波块的像素坐标,  $(i_{t_1}, j_{t_1})$  表示  $t_1$  时刻回波块的像素坐标, 则

$$\begin{cases} i_{t_2} = i_{t_1} + u \times (t_2 - t_1) \\ j_{t_2} = j_{t_1} + v \times (t_2 - t_1) \end{cases}$$

令  $r_{at}$  表示回波块从  $t_0$  到  $t_1$  时刻的质心强度

变化率,则

$$r_{at} = \frac{Z_{P_1} - Z_{P_0}}{t_1 - t_0}$$

作为  $P_2$  所在回波块的强度变化率,则在  $t_1$  时刻回波块的基础上,外推的  $t_2$  时次回波图像上任意像元的回波强度为:

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N Z_{k(i,j)t_2} = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N Z_{k(i,j)t_1} + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N r_{at k(i,j)} \times (t_2 - t_1)$$

其中, $k=1, 2, 3, \dots, n$  表示  $10 \times 10$  回波图像块的顺序号, $n$  表示回波图像内共有  $50 \times 50$  个回波块, $(i, j)$  表示第  $k$  个回波图像块内的像元坐标。

最后计算外推  $t_2$  时次与实况  $t_2$  时次回波的强度相关系数( $K$ ),若  $K$  大于域值 0.6, 则认为此次外推有效,可以显示出外推的  $t_2$  时次回波图像。同理,在  $t_1$  的基础上外推  $t_3, t_4 \dots$  时次的回波。将有效外推回波结合当地早期统计所得的本地化  $Z-R$  关系参数,得到雨强分布图像,并与 WSR\_88D 的 PUP 产品(1 小时降水量;OHP),以及自动雨量站的记录实况做比较分析。

## 2 数据来源

本文所采用的数据是西宁 C 波段天气雷达体扫基数据,通过读取基数据并对每 4 个连续的库取平均回波功率得到反射率因子(强度)数据,对 9 个仰角上的极坐标数据进行双线性插值,得到  $1 \sim 18\text{km}$  高度上的 CAPPI 数据(并且本文垂直剖面数据由此得到)。另外,以  $1\text{km} \times 1\text{km}$  为底面积、从地面到云顶的柱体中找到回波强度最大值的资料点,从而得到组合反射率数据,以  $0.1^\circ$  为插值单位对每个高度层上的 360 个方位进行资料填补等,将极坐标系下的回波数据转换为直角坐标系下的回波数据,回波图像的像素

分辨率是 1km/pixel, 在  $500 \times 500$  像素的回波图像区域内用上述方法进行外推。本文使用的 CAPPI 高度缺省是 3km, 显示范围缺省是 250km。以 2007 年 8 月 25 日以对流为主的混合性降水、2007 年 10 月 31 日的层云降水过程为例。

### 3 结果比较与分析

#### 3.1 回波图像的对比分析

图 2(见彩页)是 2007 年 8 月 25 日的外推回波和实况。从 15:19 开始, 对流在西宁的西面和北面产生并发展(如图 2a 所示), 到 15:40 时还处于发展阶段(图 2b); 20:08 开始成熟(图 2c), 可见在西宁周围的回波形成了强中心带, 20:33 成熟的对流从乐都伸展到民和(图 2d), 大通站附近的回波局地顶高达 9km, 强中心高度为 1km, 位置偏下(图 2dt), 20:52 回波形状、强度分布无明显变化(图 2e), 回波顶高维持不变, 强中心高度上升(图略), 20:58 强中心高度上升到 2km(图 2gt), 此时回波发展到最成熟, 之后回波强中心带的强度和顶高及强中心高度开始下降; 从 23:50 开始回波正式处于衰亡阶段(图 2f)。

外推的回波图像与实况基本一致。15:40 发展阶段的外推回波图像如图 2bx 所示, 是由 15:19(图 2a)和相邻前一时次的体扫回波数据外推而得, 外推时效是 21 分钟, 即 3 个外推时间步长。可见回波形状与图 2a 相似, 回波位置与实况图 2b 基本一致。20:33 成熟阶段的外推回波图像如图 2dx 所示, 是由 20:08(图 2c)和相邻前一时次的体扫回波数据外推而得, 可见除了民和站所在的线状回波(图 2dx)不具备外, 其余大部分地区的回波形状和强度分布均与实况图 2d 几乎一致; 20:52 图 2ex 所示回波是由 20:33(图 2d)和相邻前一时次的体扫回波数据外

推而得, 回波形状和强度分布与实况图 2e 基本一致。23:50 衰亡阶段的外推回波图像如图 2fx 所示, 可见与实况图 2f 也是接近一致的。对于对流降水回波外推视其回波演变情况而定, 通常情况下, 最大外推时效为 5 个时间步长, 发展阶段的外推时效为 2 个外推时间步长, 成熟阶段的外推时效为 4 个时间步长, 衰亡阶段的外推时效为 4 个时间步长。

图 3(见彩页)是 2007 年 10 月 31 日的外推回波和实况。20:51 开始层云在大通、门源、互助三县产生并发展(图 3a), 21:24 此三县层云已向西宁方向移动(图 3b), 22:30 此三县层云回波的强度增强, 尺度扩大, 且湟源、湟中境内有新生回波, 此时层云开始成熟, 23:04 达到最佳成熟状态, 之后回波逐渐减弱直到消亡。发展阶段的外推回波如图 21:24(图 3bx)所示, 由于回波形状、强度分布及移动速度的变化较大, 外推所得图 3bx 与实况图 3b 有较小差异存在, 例如图 3bx 在门源境内还有回波而实况已经加速移动到了大通县内。23:04 的外推回波(图 3dx)与实况(图 3d)位置基本一致, 但强度分布有差别。这些差别的存在是由于 TREC 不能给出回波变化趋势的特性决定的。此次过程中的外推最大时效是 4 个外推时间步长, 最小为 2 个步长。对于层状云降水回波的外推仍然视其回波演变程度而定, 通常情况下, 对较稳定的层云回波的外推时效最大能达到 8 个外推时间步长, 即约 60 分钟。

#### 3.2 平均绝对差异分析

图 4(见彩页)和图 5(见彩页)分别是 2007 年 8 月 25 日和 10 月 31 日由 COTREC 外推所得回波的图像, 在此只需分别列出一张图像来说明 COTREC 外推的结果, 可见图 4 和图 2(dx)、图 5 和图 3(dx)都是有区别的。为了得到具体差别程度, 以及说明计算

“亚像元”速度的必要性,下面计算外推回波和实况的各质心位置和强度,将计算“亚像元”速度( $S$ )和不计算“亚像元”速度( $\bar{S}$ )的外推结果,与实况( $S_0$ )进行比较,分别得到质心位置及强度的平均绝对差。

如表 1 所示,质心的比较是用外推回波与实况相同位置的回波块的质心位置及强度的比较。表 1 中的序号 I、II、III 分别代表发展、成熟、衰亡阶段, i、ii、iii 同理。 $\Delta\bar{X}$  表示外推回波与实况的质心位置在水平方向的平均绝对差, $\Delta\bar{Y}$  表示垂直方向位置的绝对差, $\Delta\bar{Z}$  表示外推回波与实况回波对应质心处的强度平均绝对差,单位是 dBz。从表 1 中可以看出, I、II 和 i、iii 中用  $\bar{S}$  法外推所得  $\Delta\bar{X}$ 、 $\Delta\bar{Y}$ 、 $\Delta\bar{Z}$  的值均大于用  $S$  法的值, III 中  $\bar{S}$  法所得  $\Delta\bar{Y}$ 、 $\Delta\bar{Z}$  的值分别大于  $S$  法的值, ii 中  $\bar{S}$  的  $\Delta\bar{Z}$  大于  $S$  的值 6 dBz。可见其一般规律是,外推时计算“亚像元”速度要比不计算“亚像元”速度的结果更接近实况,回波演变越快,外推回波与实况的差异越大,并且不计算“亚像元”速度的  $\Delta\bar{Z}$  比计算“亚像元”速度的值越大。

表 1 外推回波与实况的质心位置和强度差异对照表

	8月25日						10月30日					
	I		II		III		i		ii		iii	
时次	15:40	20:33	23:50	21:24	23:04	23:40						
方法	$S$	$\bar{S}$	$S$	$\bar{S}$	$S$	$\bar{S}$	$S$	$\bar{S}$	$S$	$\bar{S}$	$S$	$\bar{S}$
$\Delta\bar{X}$	3	4	2	3	2	3	3	4	3	3	3	4
$\Delta\bar{Y}$	2	3	2	3	2	3	4	5	4	4	3	4
$\Delta\bar{Z}$	2	5	3	5	3	5	2	4	3	9	3	5

### 3.3 改善效果分析

令  $S_x$ 、 $\bar{S}_x$ 、 $S_{0x}$  分别表示  $S$ 、 $\bar{S}$ 、 $S_0$  所得质心在水平方向的位置,  $IMD$  表示计算“亚像元”速度的外推比不计算的改善程度

$$IMD = \frac{(\bar{S}_x - S_{0x}) - (S_x - S_{0x})}{S_x - S_{0x}}$$

若  $IMD > 0$ , 则表示  $S$  更准确; 若  $IMD < 0$ , 则  $\bar{S}$  更准确; 若  $IMD = 0$ , 则两种方法同效。

在垂直方向的质心位置及质心处的强度的改善程度可同理计算。

表 1 中 II 时次的  $X$  方向的  $\bar{S}_x - S_{0x} = 3$ 、 $S_x - S_{0x} = 2$ , 所以,  $IMD > 0$ , 用  $S$  更准确。I 到 III 及 i 到 iii 的  $IMD$  均不小于 0, 可见用  $S$  比用  $\bar{S}$  的准确概率更大。由表 1 可得, 从发展到衰亡的回波变化过程的平均  $IMD$ , 2007 年 8 月 25 日外推位置改善  $x$  方向约 20%、 $y$  方向约 30%、相同位置处的强度改善约 43%, 2007 年 10 月 31 日分别为 17%、15%、50%。因此, 改善程度同样视回波演变速度而定, 一般情况下, 外推位置改善至少 15%、强度改善至少 40%。这对于气象业务中要求更准确地预报降水落区甚至落点、降水强度、影响范围等将起到一定作用。另外, 在计算时间方面, 此方法比 COTREC 用时约多 1500ms, 但这并不影响降水的预报。

## 4 外推雨强分布及对比分析

下面将 WSR\_88D 的 PUP 所做的 1 小时降水量产品(OHP)、由本文外推数据所得雨强分布(OHP)、自动雨量站的记录相互比较。例如, 2007 年 8 月 25 日 20:52 的地面雨量站记录是 21:00—22:00, 西宁城西 6.4mm、湟中 5.0mm、其余地区无降水; 22:00—23:00 西宁城西 7.6mm、湟中 10.3mm、其余地区无降水。但实际在大通站到西宁北部之间有强降水出现, 而自动雨量站无记录。PUP 的 OHP 产品的估计结果如图 6(见彩页)(a0 和 b0)所示, 20:52—21:52 无降水; 21:17—22:17 湟中和大通有最大降水量 91.4mm、其余地区空报。由 20:33 的 CAPPI 外推所得 OHP 如图 6(a1)和图 6(b1—b3)所示, 20:52 西宁城西和湟中北部的降水在 6.35mm 附近, 与实况接近, 但其余地区空报(图 a1); 21:17 在 1km 高度层上西宁城西、湟中的降水平均在 6.35~12.70mm 之间, 大通到西

宁之间的降水强度则更大(图 6b1),与实况更接近而 PUP 则差距太大,特别是湟中北部 PUP 估计值比实况大约平均 30mm(图 6b0)。在 2km 高度层上主要降水带仍然在西宁城西、湟中和大通,但雨强略有减弱(图 6b2),在 3km 高度层上该三地依然是主要降水带,且雨强比 2km 高度稍微减弱(图 6b3);从 20:33 到 20:58 回波强中心带的位置仍然分布在西宁城西、湟中和大通、最大回波强度稍微减弱但变化不明显图 7(见彩页)和图 8(见彩页)所示,并且,由前几个时次的 CAPPI 图像(图 2)、以图 2(dt)和图 2(gt)为代表的前几时次的垂直剖面等,可以得到最大回波强度约 50dBz,回波顶高约 8km,强中心高度偏下,回波已经触地,强度和高度变化不明显,回波无明显外型特征等 PUP 指标,据此指标,本文所用系统的自动预报结果是:未来 2 小时内西宁城西、湟中和大通的降水仍然维持,且降水量可达到中雨量级。此结果与雨量自动站出现的实况降水位置一致且降水量级别相同。可见,本文外推的雨强与实况更加接近,但与 PUP 一样易空报,而 PUP 更易漏报。外推 OHP 与 PUP 的 OHP 同样能做到约每 7 分钟更新一次,而且外推 OHP 可直接将回波做最大时效的外推,使预报时间更长。

## 5 小结与讨论

(1) 外推技术对于对流云、混合云、层状云降水均适用,并且,将计算“亚像元”速度应用到外推算法中,能够将某些处于生消阶段的对流纳入计算,对于以往的 TREC 算法能起到一定改进作用,从而提高外推运算的准确率。

(2) 外推的时效,对处于发展或消亡阶段的对流云视其变化速度而定,一般在 30 分钟以内;对相对稳定的降水回波通常约 35 分

钟有时甚至 1 小时。

(3) 在短时临近降水预报中,用本文算法做最大时效的外推,经初步检验,不会存在漏报现象,可以做到较准确地预报降水发生的落区甚至落点,但空报现象与 PUP 产品同样存在,并且外推降水量的准确度受 Z-R 关系的影响。

(4) 当地天气雷达每做一次体扫所用时间约 7 分钟,回波在此时间段内极易发生形状和强度分布的剧烈变化,而不满足本文算法的前提条件;对于生命史不到 7 分钟的对流,不能做外推运算。雷达体扫所用时间和云块的生命史是限制本文外推算法的客观因素。

经当地多次短时临近预报检验,结果表明本文的外推技术是适用的,能够在一定程度上提高预报准确率和相应地提高当地气象部门短时临近预报评分。对于该算法存在的主客观问题的解决,将在今后的工作中进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] Hilst G R, Russo J A Jr. An objective extrapolation technique for semi-conservative fields with an application to radar patterns[R]. Tech Memo No 3, Travelers Weather Research Center, Hartford, CT, 1960:34.
- [2] Kessler E, Russo J A. Statistical properties of weather echoes[R]. Preprints 10th Weather Radar Conf, Washington, D C, Amer Meteor Soc, 1963:25-33.
- [3] Crane R k. Automatic cell detection and tracking[J]. IEEE Trans. Geosci Electron, 1979, GE-17: 250-262.
- [4] Bjerkaas C L, Forsyth DE. Operational test of a three-dimensional echo tracking program[R]. Preprints 19th Conf Radar Meteorology, Miami Beach, Amer Meteor Soc, 1980:244-247.
- [5] Rinehart R E, Garvey E T. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar[J]. Nature, 1978, 273:287-289.

- [6] Rinehart R E. A pattern recognition technique for use with conventional weather radar to determine internal storm motions[J]. Atmos Tech, 1981, 13: 119-134.
- [7] Smythe G R, Zrni C D S. Correlation analysis of Doppler radar data and retrieval of the horizontal wind[J]. J Climate Appl Meteor, 1983, 22: 297-311.
- [8] Tuttle J D, Foot G B. Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar[J]. J Atmos Ocean Tech, 1990, 7: 218-232.
- [9] Li L, Schmid W, Joss J. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography[J]. J Appl Meteor, 1995, 34: 1286-1300.
- [10] Berenguer M, Davila J, Corral C, et al. Hydrological evaluation of a nowcasting technique applied to flood forecasting[R]. Preprints, 31th Conf on Radar Meteorology, Seattle, Washington, Amer Meteor Soc, 2003: 708-709.
- [11] Li P W, Wong W K, Chan K Y, et al. SWIRLS-an evolving nowcasting system[R]. Technical Note, 100, Hong Kong Observatory, 2000: 28.
- [12] Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR Auto-Nowcast System[J]. Wea foreca, 2003, 18(4): 545-561.
- [13] 乔春贵, 郑世林, 杨立志, 等. 质心法雷达回波外推的原理及应用[J], 河南气象, 2006, (3): 29-30.
- [14] 张亚萍, 程明虎, 夏文梅, 等. 天气雷达回波运动场估测及在降水临近预报中的应用[J]. 气象学报, 2006, 64(5): 632-634.
- [15] Wang Z H, Zhou J. A Preliminary Study of Fourier Series Analysis for Cloud Tracking with GOES High Temporal Resolution Images[J]. Acta Meteor Sinica, 2000, 14(1): 82-94.
- [16] 朱平, 王振会, 许建明. TCFM 导风技术介绍及其初步试验研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 547-550.
- [17] 孙林, 王振会, 许建明. 卫星导风的二维傅立叶相位分析技术初步研究[J]. 南京气象学院报, 2004, 27(2): 211-216.

朱平等：天气雷达回波外推技术应用研究

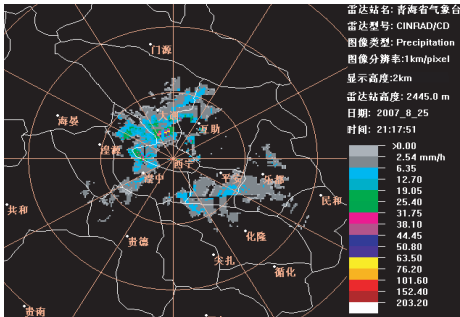


图 6 (b2) 2007年8月25日21:17外推OHP (2km)

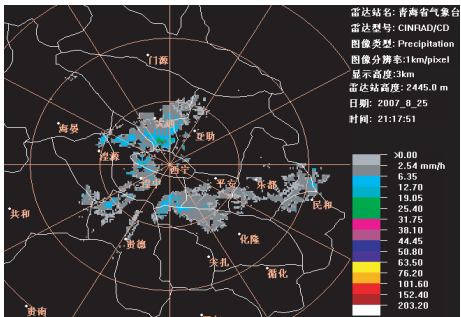


图 6 (b3) 2007年8月25日21:17外推OHP (3km)

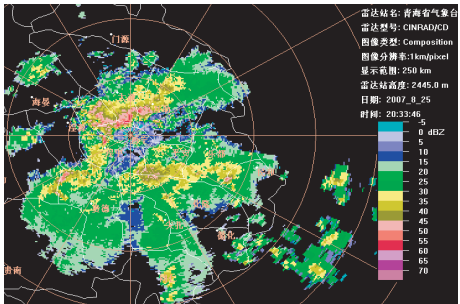


图 7 2007年8月25日20:33组合反射率回波图像

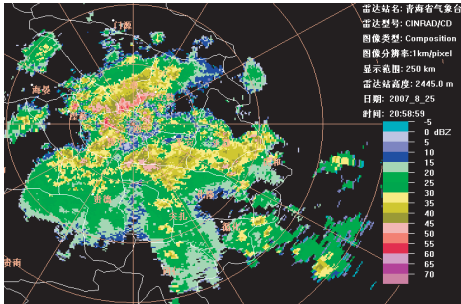


图 8 2007年8月25日20:58组合反射率回波图像



朱平等：天气雷达回波外推技术应用研究

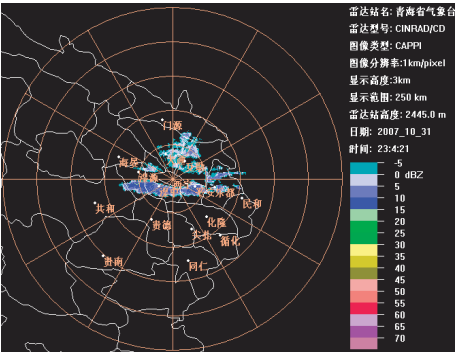


图 3(d) 2007年10月31日23:04CAPPI实况

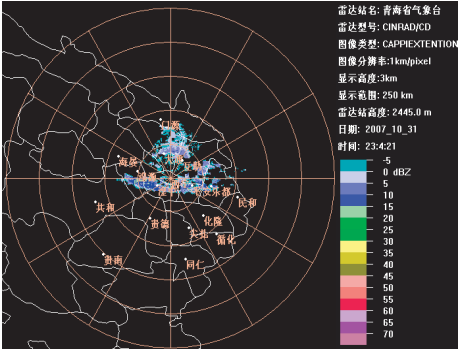


图 3(dx) 2007年10月31日23:04CAPPI外推

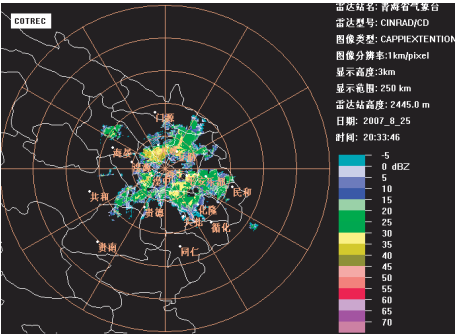


图 4 2007年8月25日20:33COTREC外推CAPPI

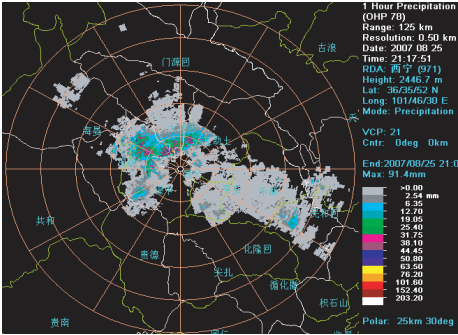


图 5 2007年10月31日23:04COTREC外推CAPPI

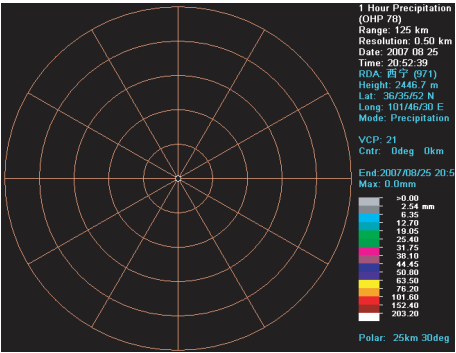


图 6(a) 2007年8月25日20:52PUP OHP

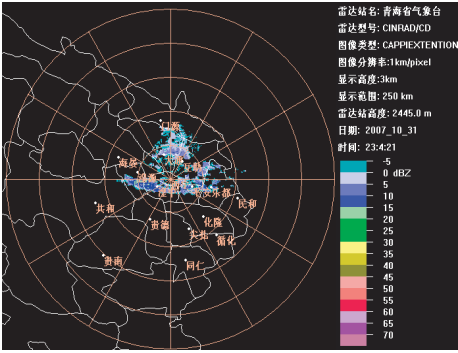


图 6(b) 2007年8月25日21:17PUP OHP

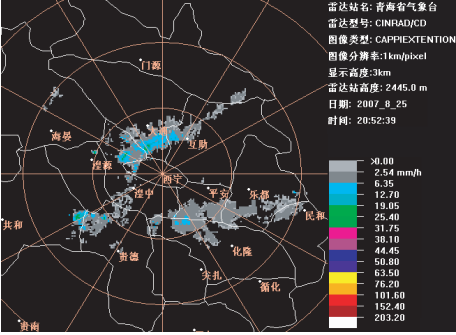


图 6(a1) 2007年8月25日20:52外推OHP

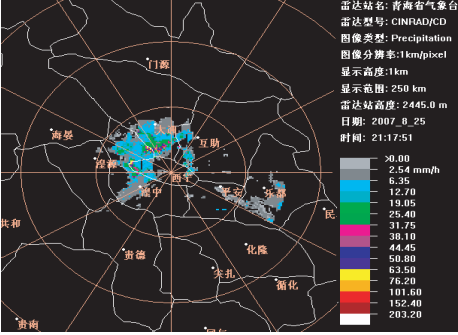


图 6(b1) 2007年8月25日21:17外推OHP (1km)

# 朱平等：天气雷达回波外推技术应用研究

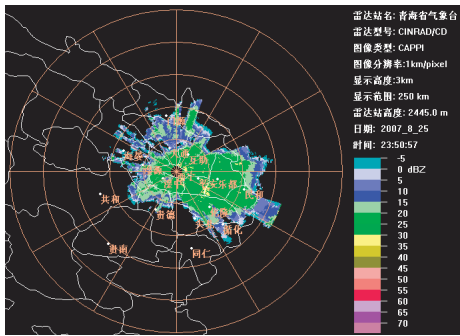


图 2(f) 2007年8月25日23:50CAPPI实况

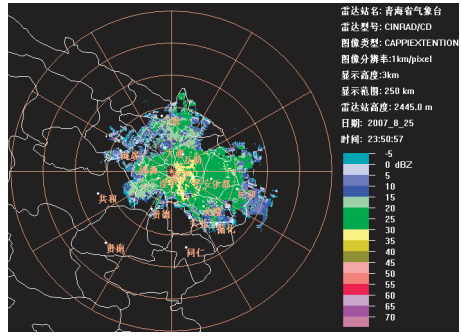


图 2(fx) 2007年8月25日23:50CAPPI外推

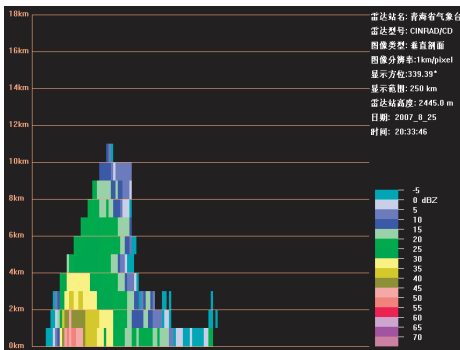


图 2(dt) 2007年8月25日20:33垂直剖面(339°)

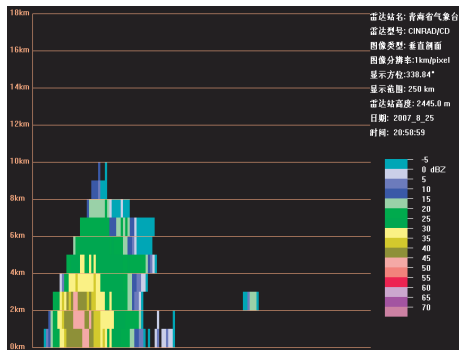


图 2(gt) 2007年8月25日20:58垂直剖面(339°)

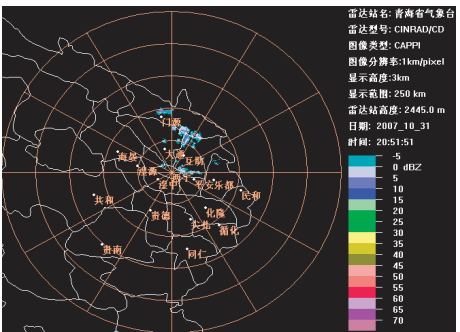


图 3(a) 2007年10月31日20:51CAPPI实况

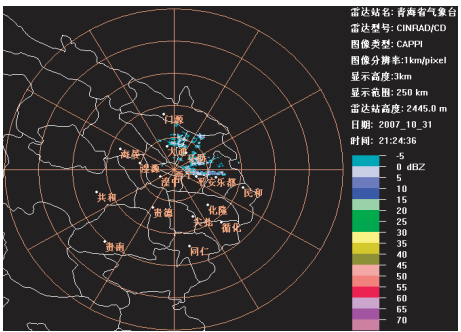


图 3(b) 2007年10月31日21:24CAPPI实况

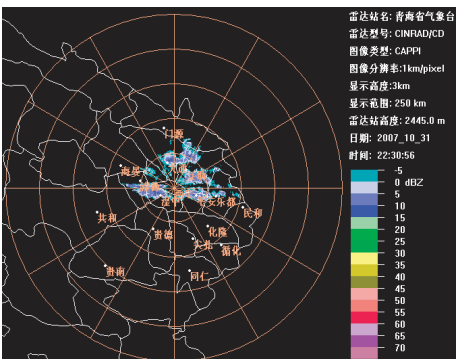


图 3(c) 2007年10月31日22:30CAPPI实况

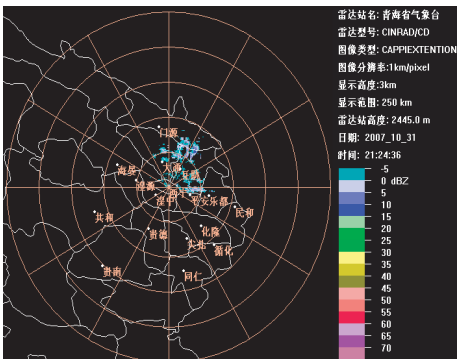


图 3(bx) 2007年10月31日21:24CAPPI外推

朱平等：天气雷达回波外推技术应用研究

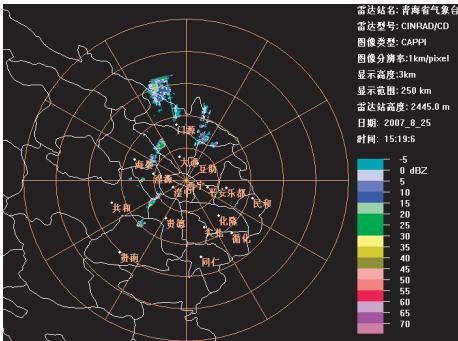


图 2(a) 2007年8月25日15:19CAPPI实况

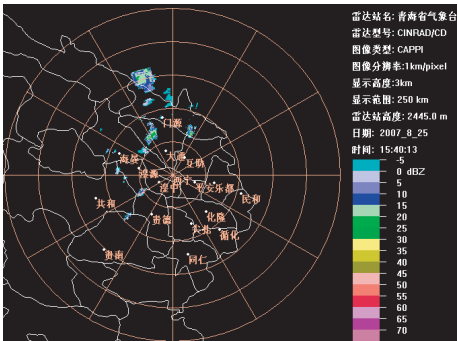


图 2(b) 2007年8月25日15:40CAPPI实况

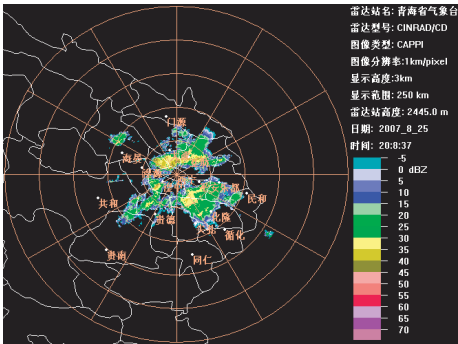


图 2(c) 2007年8月25日20:08CAPPI实况

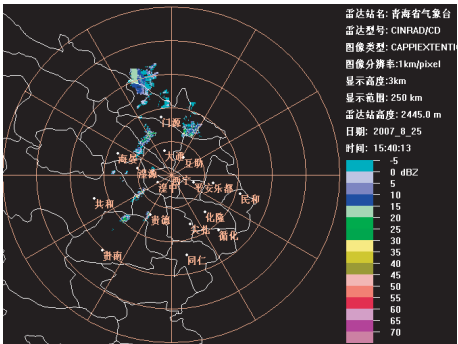


图 2(bx) 2007年8月25日15:40CAPPI外推

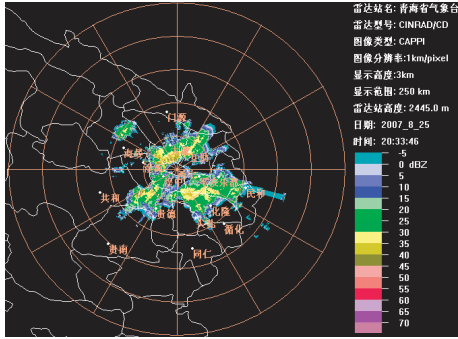


图 2(d) 2007年8月25日20:33CAPPI实况

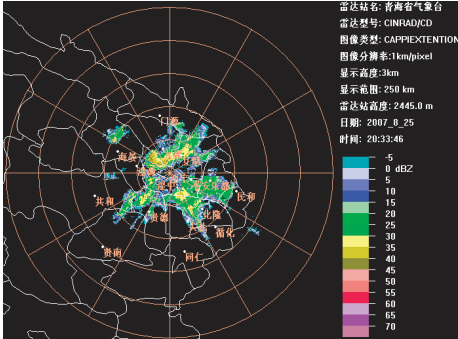


图 2(dx) 2007年8月25日20:33CAPPI外推

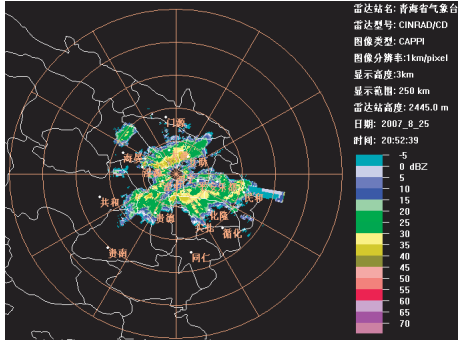


图 2(e) 2007年8月25日20:52CAPPI实况

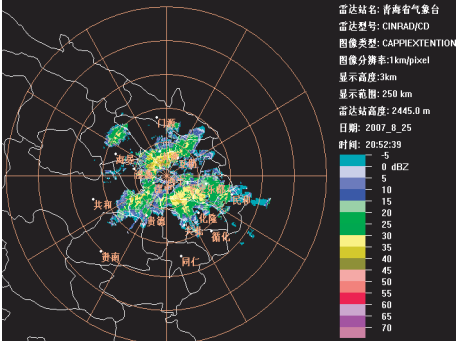


图 2(ex) 2007年8月25日20:52CAPPI外推