

天气雷达图像中对流云区识别算法

闫 军^{1,2}, 何小海¹, 王海梅³, 吴学宏²

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610041;

2. 内蒙古自治区气象台, 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古自治区气象科学研究所, 呼和浩特 010051)

(nmyanjuan@yahoo.com.cn)

摘 要: 对流云和层状云是形成暴雨的重要因素, 准确地识别两者, 对降水精度估测有积极的作用。为此, 提出了一种小波分析区域识别算法(WLS)。该算法借鉴了小波分析的突变点检测原理, 对天气雷达原始反射率数据和顶高数据进行小波变换, 进而对检测出的模极大值点进行奇异性分析, 滤除噪声点的干扰, 最后用数学形态学方法检测边缘并填充对流云区域。实验中对来自呼和浩特雷达站的真实数据进行了算法识别分析, WLS 方法较准确地识别出特征云体的相应区域, 并将实验结果与采用 BL 和 SHY95 方法的识别结果进行了对比, 表明 WLS 方法不仅对特征云体进行较好的识别, 同时还有效地处理了杂波和边缘问题。

关键词: 雷达反射率; 对流云识别; 小波分析; Lipschitz 指数; 边缘检测; 数学形态学

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Convective cloud identification algorithm based on weather radar image

YAN Jun^{1,2}, HE Xiao-hai¹, WANG Hai-mei³, WU Xue-hong²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Meteorology Observatory, Hohhot Nei Mongol, 010051, China;

3. Inner Mongolia Autonomous Meteorology Science Institute, Hohhot Nei Mongol 010051, China)

Abstract: Both the convective and stratiform regions take an important role in the precipitation. Correct recognition of them facilitates precise prediction of the rainfall amount and duration. An automatic algorithm for the partitioning of radar reflectivity into convective and stratiform rain classifications named WLS was developed. Theory of abrupt-change detection based on wavelet analysis was adopted in this algorithm. First, wavelet transform was carried out on preprocessed raw reflectivity data and echo top data. Second, the singularity detection of modulus maximum value was done and noise points were filtered too. Finally, the edge was detected and convective region was filled by using mathematical morphology. Experiment uses the representative squall line on 2150 UTC 25 August 2008 and mixed precipitation 2222 UTC 8 August 2008 at Hohhot. Compared with WLS algorithm, BL algorithm and SHY95 algorithm, the experimental results show that WLS algorithm is more effective, and it can exactly partition the regions of convective clouds and restrain noise points.

Key words: radar reflectivity; convective cloud identification; wavelet analysis; Lipschitz exponent; edge detection; mathematical morphology

0 引言

区域性云雨分布的定量测量是国际大气与环境科学界长期追求的目标, 实现这一目标对强降水的监测预报特别是灾害性天气预警及防灾减灾工作具有十分重要的意义。层状云和对流云无论在雨滴谱的分布、产生发展的机理还是在大气环境热量变化的贡献程度上都有较明显的区别, 所以对二者进行有效识别可以更好地理解降水机制, 使其在灾害性天气预警、人工影响天气、航空安全和数值预报中发挥更大作用。

多年来国内外对这一课题已经进行了深入的研究, 并产生了一批切实可行的成果。文献[1]用雷达反射率资料把 BET 技术扩展到二维, 首先用雷达反射率因子阈值来确定对流核, 然后给对流核一个固定的影响半径以确定对流云的面积。文献[2]指出 Churchill 方法中固定一个影响半径是不充分的, 他们把影响半径改为反射率因子的函数, 此外把反射率因子阈值也改为局地平均的背景反射率因子的函数。这种方

法本质上还是 BET 技术, 但他们把它称为巅峰值(SHY95)方法。文献[3]从对流云与层状云的三维结构原理用雷达反射率因子来进行区别, 主要考虑排除零度层亮带的影响, 该方法被称为反照率因子(BL)方法, 目前被美国大部分研究使用。文献[4]选取了组合反射率等 6 个候选参数, 并统计这 6 个候选识别参数分布的概率密度特征, 利用模糊逻辑法进行层状云和对流云的识别。

本文以反射率因子和云顶高度的梯度作为切入点, 借鉴小波分析的突变点检测和杂波抑制原理, 把识别出梯度变化大的位置作为分割层状云和对流云区域的主要判据, 设计出 WLS(Wavelet Separation)方法, 并通过实验收到了较反照率因子(BL)方法、巅峰值(SHY95)方法更好的识别结果。

1 层状云和对流云的识别方法

1.1 二维小波变换

小波变换具有多分辨率分析的特点, 可以将原始信号分

收稿日期: 2009-06-08; 修回日期: 2009-08-21。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40765006)。

作者简介: 闫军(1976-), 男(满族), 内蒙古呼和浩特人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向: 天气雷达图像处理、模式识别; 何小海(1964-), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 通信、信息系统; 王海梅(1976-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向: 遥感; 吴学宏(1961-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 高级工程师, 主要研究方向: 大气科学。

解到不同子频段,因此很适合检测信号中夹带的瞬态突变现象并将该成分提取出来进行相应处理。通过对二维数据场数据的小波分解,可以将二维数据分为低频和 3 个高频部分,3 个高频部分分别代表水平(X)、垂直(Y)和对角线方向的高频部分,同时也代表 3 个方向上的突变信息。

1.2 突变点的奇异性

信号或函数的奇异性或非正则性结构往往包含它的本质信息,如图像的边缘信息。函数的奇异性是指函数在某处的有间断点或某阶倒数不连续,常用 Lipschitz 指数来量化描述函数的奇异性。Lipschitz 指数可以用来度量信号在某一区间内和某一时刻的一致正则性。因此,它可以有效检测信号突变点位置。

Lipschitz 指数定义: 设 n 是一非负的整数, $n < \alpha \leq n+1$, 如果存在两个常数 A 和 $h_0 (> 0)$, 及 n 次多项式, 使得对任意的 $h < h_0$, 均有:

$$|f(x_0 + h) - P_n(h)| \leq A |h|^\alpha \quad (1)$$

则称 $f(x)$ 在点 x_0 是 Lipschitz 的。由此可以看出, Lipschitz 指数刻画了函数 $f(x)$ 在点 x_0 的奇异性。

根据天气雷达数据的特点, 其数据分布可参照斜坡函数、阶跃函数和冲激函数。组合反射率和回波顶高梯度点对应回波区域的边缘, 但其中也存在噪声点的干扰, 上述理论可知由小波变换在细尺度下的局部模极大值随尺度变化的不同来分辨出边缘点位置, 边缘点的局部模极大值随尺度的加大其模值不变或增大, 而噪声的模值则随尺度的加大减小。

1.3 基于小波变换的多尺度边缘检测

$\theta(x, y)$ 表示高斯平滑函数, 令:

$$\theta_s(x, y) = \frac{1}{s^2} \theta\left[\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right] \quad (2)$$

平滑函数 $\theta(x, y)$ 分别对 x, y 求偏导, 则小波函数为:

$$\varphi_s^1(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{s^2} \varphi^1\left[\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right] \quad (3)$$

$$\varphi_s^2(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{s^2} \varphi^2\left[\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right] \quad (4)$$

设 $f(x, y) \in L^2(R^2)$, 对 $f(x, y)$ 进行卷积处理, 得到尺度 s 上的二维小波变换的两个分量:

$$W_s^1 f(x, y) = f \otimes \varphi_s^1(x, y) \quad (5)$$

$$W_s^2 f(x, y) = f \otimes \varphi_s^2(x, y) \quad (6)$$

在尺度 s 下, 梯度矢量的模为:

$$M_s f(x, y) = \sqrt{|W_s^1 f(x, y)|^2 + |W_s^2 f(x, y)|^2} \quad (7)$$

其幅角为:

$$A_s f(x, y) = \arctan\left[\frac{W_s^2 f(x, y)}{W_s^1 f(x, y)}\right] \quad (8)$$

梯度矢量方向就是梯度模局部极大值的方向, 因此沿着梯度矢量方向检测小波变换系数模的局部极大值点便可得到不同云区的边缘点。本文对小波系数采用局部模极大值来检测云区的边缘, 能有效地抑制在奇异点出现的振铃现象, 起到了保护边缘的作用。

1.4 基于数学形态学的边缘检测

数学形态学是用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状, 以达到对图像进行分析和识别的目的。采用数学形态学方法对图像进行边缘检测, 有效规避了微分运算对噪声敏感的问题, 提取的边缘比较光滑, 图像的骨架连续, 能够有效地反映图像的特征信息。数学形态学包括 4 种基本运算: 腐蚀(或侵蚀)、膨胀(或扩张)、开启和闭合。本文利

用膨胀运算的特点, 对数据进行边缘检测, 除去边缘其他不必要的内容, 并填充边缘点之间的空隙。

1.5 层状云和对流云识别算法

WLS 方法是基于小波变换与数学形态学的层状云和对流云的自动识别方法, 充分利用了小波变换在突变点检测和抑制噪声点方面的优势。其具体算法如下。

1) 选取小波变换的有效层。对经预处理后的组合反射率数据和回波定高数据进行多层小波变换, 相邻的尺度层 $j = m, m+1, \dots, m+n-1$, 称为特征尺度层。

2) 计算各层的模极大值。仅提取小波变换各层中沿水平(X)方向和垂直(Y)方向的小波系数, 由式(7)和式(8)计算相应位置的模值和幅角(梯度矢量的方向), 若 (x_0, y_0) 点有模极大值, 且严格不等式至少对于 (x_0, y_0) 的某一侧成立, 则挑出几个特征尺度层上的全部极值点。

3) 确定奇异点。若数值在某一点处发生突变, 则其小波变换后的模值在该点取极值。因此定义在最小特征尺度 $j = m$ 上的模极大值点就为二维数值场上的奇异点。

4) 建立极值链。对于每一个奇异点建立一条极值链。设坐标为 (x_m, y_m) 的点 P_m 为一个奇异点(即尺度 m 上的极值点), 在尺度 $j = m+1$ 上选取一个极值点 P_{m+1} , 使 $|P_m - P_{m+1}|$ 最小。如此选下去, 直到最后一个特征尺度层。这样就得到了一组极值点 $P_m, P_{m+1}, \dots, P_{m+n-1}$, 称为关于奇异点 P_m 的一条极值链。

5) 计算奇异指标。由第 1.2 节可知奇异点 P_m 处的正则性为 α , 则在 j 较小时可得 $\alpha \approx \lg |M_{j+1}(P_m)| - \lg |M_j(P_m)|$ 关于 P_m 的极值链为 $P_m, P_{m+1}, \dots, P_{m+n-1}$, 令 $\alpha_j = \lg |M_{j+1}(P_{j+1})| - \lg |M_j(P_j)|$ ($j = m, m+1, \dots, m+n-2$), 定义 P_m 处的奇异指标为:

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha_m + \alpha_{m+1} + \dots + \alpha_{m+n-2}}{n-1} \quad (9)$$

其中: α_j 为小波变换沿极值链的衰减速度, 它是二维数值场在 P_m 点处的正则性 α 的近似值, 所以有 $\gamma = 1 - \alpha$ 。

6) 检测出噪声点的位置。根据上述奇异指标的计算分辨出奇异点是噪声还是真正的边缘点, 保留云区边缘点, 抑制噪声点的干扰。

7) 提取梯度大的模极大值。通过设定适当的阈值提取梯度大的模极大值。

8) 提取出有对流云区域。用数学形态学的方法将提取出梯度大的模极大值连成对流云区域。

2 算法试验

2.1 资料的选取及预处理

1) 组合反射率因子。把极坐标下的体扫数据用临近和线性的混合插值方法内插到直角坐标系下的网格上, 格点的分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。在每个格点的垂直方向上选最大的强度值投影到底层格点上。

2) 回波顶高。用标准大气折射时的雷达测高公式计算点 (a, r, e) 所对应的高度 H_{ET} :

$$H_{ET} = h + r \sin e + \frac{r^2 \cos^2 e}{2R_e} \quad (10)$$

其中: e 为仰角, r 为斜距, h 为雷达站的海拔高度, R_e 为等效地球半径。

2.2 试验结果分析与对比

本文选取呼和浩特雷达站 2008 年 8 月 8 日 2222 UTC 及 8 月 25 日 2150 UTC 所测得的两次强降水过程, 对其梯度特

征明显的组合反射率因子和回波顶高数据的小波识别结果进行分析和对比。

2008 年 8 月 8 日的天气过程为混合云降水过程,如图 1(a)所示,存在大面积的层状云中夹杂有密实的对流云团块。从回波顶高图 3(a)中可以看出,层状云的顶高分布较为均匀,大部分为平均 4 km ~ 5 km,回波结构也较为均匀。从图 1(b)中反射率因子的小波识别结果来看,对云的区域总体与图 1(a)中的强度中心相对应,但也有小部分识别区域与图 1(a)中强度较大区域不相适应,如图 1(b)中 120 km、254°处,由于其梯度变化不大,所以小波变换的权重系数对此处不太敏感。对比由 BL(如图 1(c)所示)和 SHY95(如图 1(d)所示)算法的识别结果。可以看出,这两种方法没有解决好层状云的边缘问题,致使将层云的边缘误识别为对流云区。再由回波顶高识别结果(如图 3(b)所示)可以看出,其识别区域与顶高中的对流区域以及反射率因子中的对流区域对应较好,对层状云和对流云进行了有效的识别。另外小波分析在杂波抑制上也表现出良好的性能,如靠近雷达站中心处的杂波抑制效果明显。

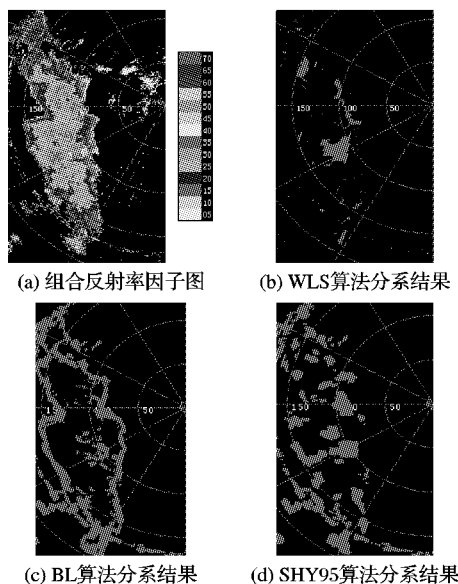


图 1 2008 年 8 月 8 日强度数据 WLS、BL、SHY95 算法对比分析

2008 年 8 月 25 日的天气过程为一次较为明显的飑线过程,从图 2(a)可以看出飑线中呈现的对流带边界清晰,其中的回波结构密实,回波强度较强。而从回波顶高图(如图 3(c))所示对流带的顶高较高,分布也不均匀,层状云区则表现出分布均匀平整的特征,平均顶高为 5 km ~ 6 km。由图 2(b)所示反射率因子的小波识别结果来看,所识别出的对流云区与图 2(a)中的对流带有较好的对应,由于在靠近雷达站附近的对流团块相邻较为紧密,故而在识别结果上表现的边界较为平直而不是自然的边界。再由回波顶高识别结果(如图 3(d)所示),其识别区域与顶高中的对流区域以及反射率因子中的对流区域对应较好,与上述两种算法相比同样较好的解决了边缘和杂波抑制问题。

3 结语

本文尝试将小波分析的边缘提取理论应用到特征云体的识别中,实验结果表明 WLS 方法能够识别出反射率因子和回波顶高的梯度变化的边界,从而提取出层状云和对流云中梯度变化的特性,相对于国外两种依赖平均梯度和阈值分割的算法有了较大的改善。算法中的一些参数的选取将对识别结

果有一定的影响,如小波分解层数、梯度模极大值的阈值和检测模板大小。同时小波的分解层数对算法的时间复杂度也有直接的影响。

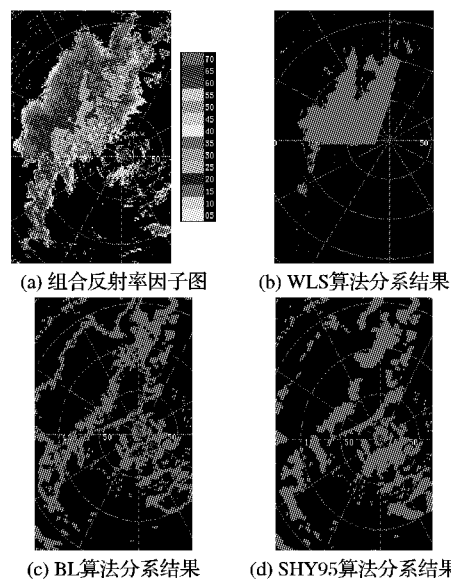


图 2 2008 年 8 月 25 日强度数据 WLS、BL、SHY95 算法对比分析

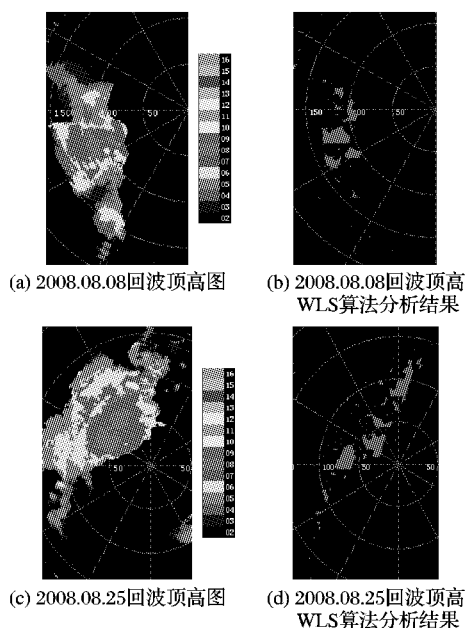


图 3 回波顶高数据 WLS 算法分析

参考文献:

- [1] CHURCHILL D D, HOUZE R A, Jr. Development and structure of winter monsoon cloud clusters on 10 December 1978[J]. Journal Atmospheric Sciences, 1984, 41(6): 933 - 960.
- [2] STEINER M, HOUZE R A, YUTER S E, Jr. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data[J]. Journal Applied Meteorology, 1995, 34(9): 1978 - 2007.
- [3] BIGGERSTAFF M I, LISTEMASS S A. An improved scheme for convective/stratiform echo classification using radar reflectivity [J]. Journal Applied Meteorology, 2000, 39(12): 2129 - 2150.
- [4] 肖艳娇, 刘黎平. 三维雷达反射率资料用于层状云和对流云的识别研究[J]. 大气科学, 2007, 31(4): 645 - 654.
- [5] 陶德元, 何小海, 李舒平, 等. 小波变换及其在图像处理中的应用[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 1994, 31(4): 481 - 488.
- [6] 刘春生, 张晓春. 实用小波分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.