

• 信号处理 •

DOI: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.05.009

提高天气雷达探测能力的互相关方法和中值滤波技术

雷亚会¹ 史朝^{1,2}

(1. 成都信息工程学院 电子工程学院, 成都 610225)

(2. 中国气象局 大气探测重点开放实验室, 成都 610225)

摘要: 应用双偏振天气雷达探测天气信号的方法备受国内外气象科技领域人员的关注。目前,双偏振天气雷达的双通道同时收发体制是由功分器将发射通道的能量等分为水平和垂直两路发射通道,其结果会使每个通道发射能量减半,又由于接收机产生的噪音能量是不变的,必然引起回波信噪比减弱,减弱值约为3 dB。为了避免3 dB损失带来的不利影响,需改进双偏振雷达的探测性能。将双偏振雷达回波信号中的双通道信号间的互相关信息、单通道信号自身的信相关信息及每个信号自身的能量信息求和,再将结果与预先设置好的阈值进行比较。如果结果大于这个阈值,就认为这个信号是有效信号,否则就认为它是噪声并被滤除。文中利用X波段双偏振天气雷达数据,对比了引入互相关算法前后的探测效果,证明利用双通道信号互相关、单通道自相关及信号能量自身求和判断信号是否存在的效果较好;介绍了中值滤波技术,并利用中值滤波技术去除了天气回波中的点杂波,提高了双偏振天气雷达的探测性能。

关键词: 双偏振天气雷达; 互相关方法; 中值滤波; 点杂波; 气象探测; 信号与信息处理

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2016)05-0033-04

Cross Correlation Method and Median Filtering Technology for Enhancing Detection Capability in Weather Radar

LEI Yahui¹, SHI Zhao^{1,2}

(1. School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

(2. Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225, China)

Abstract: The method using dual polarization weather radar to detect the signal has interested meteorological science and technology personnel at home and abroad. Dual channel transceiver system of dual polarization weather radar divides transmission channel into horizontal and vertical way by power divider. So energy of each channel will be cut in half and the echo signal energy will decrease about 3 dB. In order to avoid the negative influence of 3 dB loss, the dual polarization radar detection performance should be improved. The sum of the cross-correlation estimates as well as the power and autocorrelation from each of the dual-polarization returns should be gained. If the sum exceeds a predetermined threshold, the signal will be considered present. Otherwise, the data are considered to be noise and are censored. Based on the X-band dual polarization radar data, the detection effect with and without cross-correlation algorithm is constructed and the sum of three portion is proved to be the best method for deciding signal present. In addition, median filtering technology is used to censor point clutter and improve signal detection in dual polarization weather radars.

Key words: dual polarization weather radar; coherence method; median filtering technology; point clutter; meteorological detection; signal and information processing

0 引言

天气雷达是探测短临天气过程,进行气象防灾减灾的有力设备^[1]。通常在实际应用中天气雷达在生成显示产品之前要对回波进行一系列信号与信息处理,例如:非气象目标产生的回波识别与抑制、孤立点杂波抑制、以及对弱回波区参量估计的误差修正等,这些处理过程是必要的,可以帮助预测人员更好地做出预测并将天气特征自动识别错误率降到最低^[2]。

国外广泛使用的天气雷达WSR-88D,在投入运行起初20年间,采用单发单收机制,只发射与接收水平偏振波,对气象回波边缘的处理只考虑利用信噪比与一个预先设置的阈值进行比较,若小于这个阈值,则认为是噪声信号并去除^[3]。对于回波反射率因子产品,阈值设为2 dB。然而,近年来WSR-88D天气雷达的硬件系统正在升级,升级后的系统增加了双偏振探测能力。双偏振探测可使预测人员更好地识别回波散射体类型,更准确地预测降雨类型和提高降雨预报的准确率^[4]。WSR-88D雷达升级后不再采用单发单收机制,而是使用一个发射机、两个接收机实现同时发射

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41505031)

通信作者: 雷亚会 Email: 1003654958@qq.com

收稿日期: 2015-12-24

修订日期: 2016-02-25

和接收水平和垂直偏振波。与原来的收发机制相比,发射能量相同,但要能量平均分给两个发射通道,导致每个接收机的回波能量减半。而接收机产生的噪声是不变的,这就导致回波信噪比降低,在 WSR-88D 升级后的硬件网络中,信噪比降低 3 dB^[5]。这 3 dB 信噪比的降低会带来两个影响。第一,这将导致只考虑信噪比与 2 dB 阈值比较来判断信号是否有效已不适用,升级前一些高于阈值的有效信号将会变为噪声信号被去除。第二,对其他参量的估计错误率会增加。如 Scharfenberg^[6] 研究发现,如果 WSR-88D 升级后的系统仍然沿用只考虑信噪比信息估计阈值的方法来处理信号,将导致 5.5% 的天气特征探测不到,在晴空情况下,这一现象更为严重,会有 8.4% 的天气特征探测不到。这些探测不到的天气特征大多出现在反射率因子强度较弱的区域,如一个天气系统的顶部和边缘,即探测到的天气特征比实际的发生萎缩,给预测人员产生了严重影响。使用低噪声的接收机来增加信噪比,或者提高系统性能来补偿信噪比损失,都不能完全恢复系统升级导致的信噪比降低^[7]。因此,需要找到一种新的方法,来提高双偏振雷达的探测性能,保证天气雷达对气象回波边缘的弱回波的探测准确性。

对于天气雷达探测的孤立点杂波去除,因为天气信号是连续的,雷达探测信号形成的回波大都存在孤立的点,这些点回波并非是气象回波,而是一些孤立的非气象要素产生的回波,如:飞机、鸟类等。它们会影响预测人员对雷达回波的分析和对天气的预报,所以要对这些非气象要素的点杂波进行处理,滤除无效的点状回波^[8]。雷达探测产品都是以伪彩色的方式来显示的,这里去除雷达探测信号的点杂波可以理解为是对雷达回波图像上的椒盐噪声进行处理,而处理图像的滤波技术有多种,多数都属于线性滤波,但线性滤波是低通滤波,在除去椒盐噪声的同时也使图像的边缘信息变得模糊,丢失了原本有用的信息,而降噪技术中有一种中值滤波技术是非线性滤波,它可以很好地除去图像中的椒盐噪点,又能保护图像的边缘信息^[9]。

综合前文的分析,对双偏振天气雷达回波数据的处理,首先找到一种新的方法实现天气雷达的探测能力,保证对天气特征边缘的准确探测,这个方法就是下面将提到的将原来信噪比的值加上单通道时间序列信号的自相关信息和双通道信号之间的互相关信息,求和与设定阈值比较确定回波信号的有效性。进而,对得到的回波信号进行中值滤波处理,去除点杂波。从而,改善双偏振雷达对天气信号的探测能力。

1 技术原理描述

1.1 相关方法探测原理

双偏振雷达在两个通道中探测到的天气信号是高

度相关的。Sachidananda 和 Zrnica^[10] 在 1985 年研究指出,天气雷达测得的降雨回波信号在双通道之间的相关性高于 0.99。Doviak 和 Zrnica^[11] 在 1993 年的研究指出,冰雹和雪的相关性在 0.96~0.99 之间。对于高相关性的信号,当仅采用信噪比估计阈值的方法时,阈值估计的概率密度函数分散,又由于阈值的平均值是固定的,这就会导致大量的有效信号低于阈值,造成有效信号的探测率降低。然而,加入相关性信息改进算法后,可以使大部分原本有效却低于阈值的信号,再次高于阈值,恢复了双偏振升级带来的不利影响。这就补充了系统双偏振升级带来的不足,既利用了目标在不同偏振方向上存在的差异提取更多的目标信息,又减轻了高相关性信号概率密度函数分散所带来的不利影响^[7]。

相关方法是指两个不同的时间序列之间或一个相同的时间序列在两个任意不相同时刻的取值之间的相关性^[12]。本文的主要思路是利用单通道采样数据的自相关关系和双通道采样数据之间的互相关关系来提高探测能力。首先,我们有一个函数 $f[V_h(0, T_s), \dots, V_h(M-1, T_s), V_v(0, T_s), \dots, V_v(M-1, T_s)]$, 输入变量 $V_h(m, T_s)$ 和 $V_v(m, T_s)$ 分别为水平和垂直通道在距离库 T_s 处的采样信号。对于本文利用相关性的改进探测方法,函数 f 的组成有三部分:第一,由于水平和垂直通道有效信号和噪声的能量是线性叠加的,所以存在有效信号的位置会高出噪声平均水平很多,要考虑探测位置处的回波能量信息;第二,由于噪声与噪声之间的相关性为零,如果探测位置处存在有效信号,相关性不会为零,所以要考虑各自通道采样时间序列的自相关信息;第三,若探测位置处存在有效信号,那么水平和垂直通道对该位置处的两个回波值之间会高度相关,所以还要考虑双通道的互相关信息。将这三部分组合得到函数 f 后,与设定的阈值比较来决定位于距离库 T_s 处的回波是否为有效信号。上述各部分函数可由式(1)表示如下

$$\left\{ \begin{array}{l} P_h = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} |V_h(m)|^2 \\ P_v = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} |V_v(m)|^2 \\ R_h(T) = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} V_h^*(m) V_h(m+1) \\ R_v(T) = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} V_v^*(m) V_v(m+1) \\ R_{hv}(0) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} V_h^*(m) V_v(m) \\ f = \frac{P_h + P_v + |R_h(T)| + |R_v(T)| + |R_{hv}(0)|}{5} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: P_h 和 P_v 分别表示水平和垂直通道的零阶自相关; $R_h(T)$ 和 $R_v(T)$ 分别表示水平和垂直通道的一阶自相关; $R_{hv}(0)$ 表示双通道的零阶互相关。若函数 f

大于设定阈值则可判断为有效信号。

1.2 中值滤波技术原理

中值滤波常用于除去图像或者其他信号中存在的噪声。它的思想就是检测输入信号的采样信息, 进而判断它是否属于信号, 通常使用奇数个的采样信息组成检测窗实现这一思想^[13]。将检测窗口中的数据排序, 位于检测窗中的中值点数据作为输出。当某点与它周围的像素灰度值相差很大时, 将该点的值改为与周围像素值接近的值, 从而将孤立的噪声点除去。因此, 中值滤波技术对图像的斑点噪声和椒盐噪声的消除非常有效^[14]。中值滤波技术既去除了点噪声又能保护原来信号的边缘信息。所以, 该技术可以应用于对气象资料的处理, 适合本文的研究。

我们以上一节得到的检测信号为基础, 将信号的每一个径向数据作为一个行, 这样就会得到一个二维数组。这里采用 3×3 的窗口尺寸进行中值滤波。如图 1 所示, 以中间的灰色点为中心点, 检测其周围 8 个点的数据, 并将这 9 个点的数据排序, 排序后的中间值即作为该灰色点的数据值, 并依此移动灰色点, 对全部探测数据进行中值处理。处理后有些较大的值会变得低于一定的阈值, 那么就可以合理地认为该点的数据为噪声数据, 即该点为非气象的点目标或噪声信号。

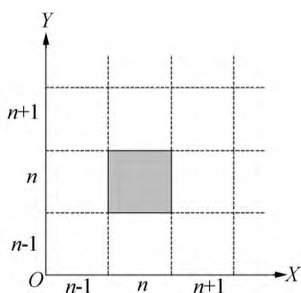


图 1 中值滤波处理表示图

2 实例对比分析

2.1 资料来源

本文采用的雷达资料来自成都信息工程大学 X 波段双偏振天气雷达, 观测地点为成都信息工程大学, 时间 2011 年 8 月 22 日 16 点 12 分。该雷达数据方位精度是 0.5° , 起始方位角 48° , 仰角 1.8° , sweep 数 14 640, 距离库数 2 400, 库长 125 m。后面的图形每个距离圈表示 25 km。

2.2 数据处理前后分析

首先, 我们要知道在原来单偏振系统中雷达对有效信号的探测情况, 并作为参考, 来对比分析应用上述改进的算法探测天气回波的结果, 这里考虑用水平垂直两个通道的回波功率和来模拟单通道的回波功率。图 2 表示单偏振系统仅考虑信噪比估计阈值的方法探测到的回波信号反射率强度。图 3 表示双通道系

统 3 dB 损失后的回波反射率强度。对比图 2 和图 3, 可以发现图 3 中的反射率强度明显降低, 尤其在回波的边缘位置发生萎缩, 造成一些弱回波信息丢失。图 4 为根据前文中的式 (1) 算法探测双偏振雷达得到的信号反射率强度。由图 4 可看出, 引入互相关算法后, 升级双通道所带来的回波边缘损失得到了很大程度上的恢复。对比图 3 和图 4, 我们看到使用互相关算法后, 回波强度明显增强, 当方位角为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时, 距离在 30 km ~ 50 km 区域的一块强回波单体, 该单体周围的弱回波区在引入互相关算法前, 其值为 $-64 \text{ dBm} \sim -59 \text{ dBm}$, 引入互相关算法后, 相同位置的反射率值为 $-54 \text{ dBm} \sim -49 \text{ dBm}$, 明显对能量的损失有了恢复。同时也将萎缩变小了的回波部分恢复回来, 起到了恢复雷达信噪比损失的作用。图 5 是双通道互相关算法探测到回波后, 应用中值滤波技术处理后的雷达探测信号图。我们可以看出回波中去除了大量的噪点, 即滤掉了非气象回波的孤立点回波, 方便了对数据的分析, 提高了天气雷达对天气信号的探测能力。

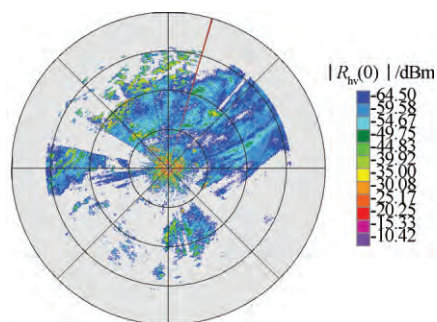


图 2 单极化信噪比估计阈值方法雷达探测信号图

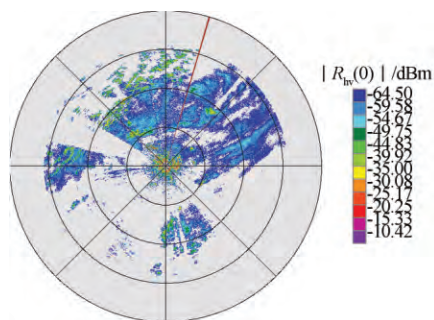


图 3 双极化信噪比估计阈值方法雷达探测信号图

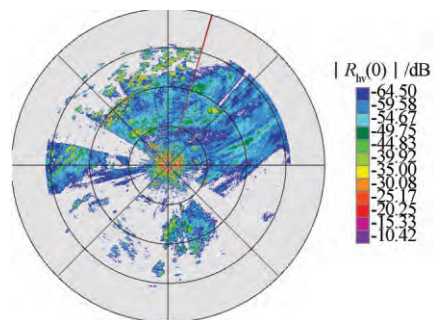


图 4 双通道互相关方法雷达探测信号图

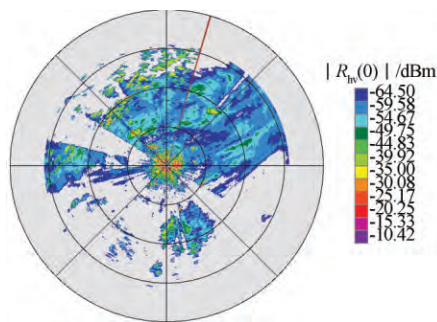


图5 中值滤波处理后的雷达探测信号图

2.3 两种技术处理前后数据沿径向变化的定量分析

图6为互相关算法处理前后回波数据沿一个径向(方位角 348°)的变化对比,其中,回波反射率值较弱的一条曲线为处理前回波数据,回波反射率值较强的一条曲线为处理后的回波数据。从图6可以看出互相关算法处理后回波数据能量的损失得到了明显的恢复。图7显示了数据恢复的程度,从图中可看到数据的恢复量基本在 $4\text{ dB} \sim 5\text{ dB}$ 。这个值基本满足了雷达双通道升级后,回波能量损失的恢复要求。

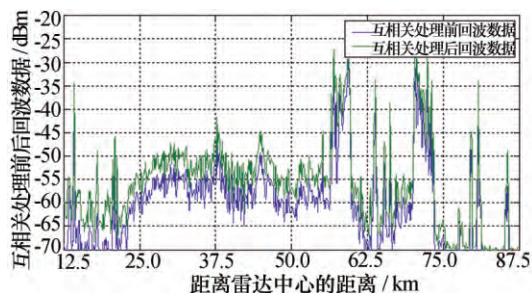
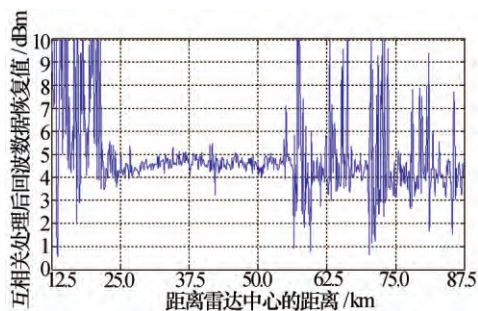
图6 算法处理前后回波数据沿一个径向的比较(方位角为 34.8°)

图7 互相关算法对回波能量的恢复值

我们再来对比中值滤波技术对数据的降噪效果。为了能够便于我们看图分析,这里只选取该径向上 $100 \sim 700$ 的数据库的数据来分析。图8是中值滤波处理前后回波数据的值,回波反射率值变化较大的一条曲线表示了中值滤波处理前的数据,回波反射率值变化较平缓的一条曲线为处理后的数据。我们可明显看到处理后数据沿径向的变化变得平缓,处理前的数据变化大多为 $2\text{ dB} \sim 3\text{ dB}$,数据变化快,不稳定。处理后数据变化基本在 0.5 dB 左右,没有出现突变性很大

的点,整条径向数据变化平稳。这说明本文所使用的中值滤波技术起到了较好的降噪效果。

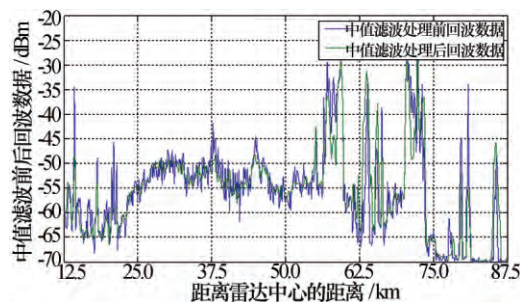


图8 中值滤波处理前后径向回波数据

3 结束语

本文首先引入了WSR-88D雷达双偏振升级的优势,但系统升级带来 3 dB 能量损失。为了恢复这一损失带来的不利影响,进一步讲述了双偏振天气雷达探测信号的新方法,提出提高双偏振天气雷达信号探测能力的方法,即引入双通道互相关信息补偿雷达信号信噪比的降低,同时利用二维中值滤波技术去除非气象回波的点杂波。以上述内容为基础,对互相关技术和二维中值滤波技术进行软件设计和研究;利用互相关改善天气雷达信号探测能力,使天气雷达对天气信号的探测更加精确;利用二维中值滤波技术降低噪点,去除天气雷达探测到的虚假天气信号。

参考文献

- [1] 何建新,姚振东,李飞,等.现代天气雷达[M].成都:电子科技大学出版社,2004.
HE Jianxin, YAO Zhendong, LI Fei, et al. The modern weather radar [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004.
- [2] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2000.
ZHANG Peichang, DU Bingyu, DAI Tiepi. Radar meteorology [M]. Beijing: Meteorological Press, 2000.
- [3] MELNIKOV V M, SCHLATTER P T. Enhancing sensitivity on the polarimetric WSR-88D [M]. Orlando: Academic Press, 2011.
- [4] SCHARFENBERG K A, ELMORE K L, FORREN E, et al. Estimating the impact of a 3 dB sensitivity loss on WSR-88D data [C]// 32nd Conference on Radar Meteorology. [S. l.]: IEEE Press, 2005.
- [5] ICE R L, SAXION D S, BOYDSTUN O E, et al. Sensitivity of operational weather radars [C]// 27th Conference on Interactive Information Processing Systems. [S. l.]: IEEE Press, 2011.

(下转第57页)

3 结束语

本文将模糊控制理论应用于数字雷达的阵列幅相补偿控制系统,提出了新型数字阵列自适应幅相补偿控制系统构架,该系统能够智能、动态、实时地根据阵面状态对各通道幅相进行调整,无需人工干预,最终实现阵面性能的优化。此控制系统构架在未来智能化、软件化数字雷达领域具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 文生平,赵国平,蔡康雄. 一种变论域模糊控制自适应算法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(3): 265-268.
WEN Shengping, ZHAO Guoping, CAI Kangxiong. A fuzzy-control adaptive algorithm with variable domain[J]. Control Theory and Application, 2009, 26(3): 265-268.
- [2] GAO T, WANG J Y. Large active phased array antenna calibration using MCM[J]. IEEE Transactions Antennas and Propagation, 2001, 607-609.
- [3] 钟剑锋,张国民. 有源相控阵雷达 T/R 组件的结构设计

[J]. 电子机械工程, 2000, 16(2): 15-17.

ZHONG Jianfeng, ZHANG Guomin. The structural design of T/R module for active phased array radar[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2000, 16(2): 15-17.

- [4] CHEN C S. Adaptive fuzzy control systems with dynamic structure[J]. International Journal of Systems Science, 2008, 39(2): 163-172.
- [5] 汪义旺,沈锦飞. 基于可变论域模糊控制矢量控制系统的研究[J]. 电气传动, 2007, 37(9): 40-46.
WANG Yiwang, SHEN Jinfei. Study of vector control system based on variable universe fuzzy control[J]. Electric Drive, 2007, 37(9): 40-46.

陈 原 男, 1986 年生, 博士, 工程师。研究方向为数字阵列控制、高速数据传输。

张晓明 男, 1976 年生, 高级工程师。研究方向为雷达显示与系统控制设计。

胥志毅 男, 1977 年生, 高级工程师。研究方向为雷达波控系统控制设计。

(上接第 36 页)

- [6] IVIC I R, MELNIKOV V M. Enhancing signal detection in dual-polarization weather radars by combining the coherency based detection and 2D despeckling[C]// Conference on Radar Meteorology. [S.l.]: IEEE Press, 2011.
- [7] IVIC I R, ZRNIC D S, YU T Y. The use of coherency to improve signal detection in dual-polarization weather radars[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2009, 26(11): 3146-3154.
- [8] 张 音,于文震. GLC-42 型 X 波段全相参双线偏振脉冲多普勒天气雷达技术[J]. 现代雷达, 2001, 23(2): 14-17.
ZHANG Yin, YU Wenzhen. The GLC-42 type X-band fully coherent pulsed Doppler weather radar technology with dual-linear polarization capability[J]. Modern Radar, 2001, 23(2): 14-17.
- [9] 侯宏花,陈树月,郭保全. 医学 B 超图像降噪处理的三种方法比较[J]. 测试技术学报, 2003, 17(3): 262-264.
HOU Honghua, CHEN Shuyue, GUO Baoquan. Comparison of three methods in decreasing noise of medical B model ultrasonic images[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2003, 17(3): 262-264.
- [10] SACHIDANANDA M, ZRNIC D S. Z sub DR measurement consideration for a fast scan capability radar[J]. Radio Science, 1985, 20(4): 907-922.
- [11] DOVIK R J, ZRNIC D S. Doppler radar and weather ob-

servations[M]. Orlando: Academic Press, 1993.

- [12] 王岩松,阮秋琦. 一种基于互相关的图像定位匹配算法研究及应用[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(2): 20-24.
WANG Yansong, RUAN Qiuqi. Application of image orientation and matching algorithm based on correlative matching method[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2002, 26(2): 20-24.
- [13] 刘克龙,姜 雷,程 伟. 数字图像处理系统的构成及常用方法[J]. 信息技术, 2000(4): 32-33.
LIU Kelong, JIANG Lei, CHENG Wei. The composition of digital image processing system and the commonly used method[J]. Information Technology, 2000(4): 32-33.
- [14] 朱维仲,董彩平. 中值滤波技术在图像处理中的应用[J]. 天津职业技术示范学报, 2002(8): 15-1.
ZHU Weizhong, DONG Caiping. Median filtering and its application on image processing[J]. Journal of Tianjin Vocational and Technical Demonstration, 2002, 12(3): 42-44.

雷亚会 男, 1990 年生, 硕士研究生。研究方向为气象雷达信号处理与分析。

史 朝 男, 1981 年生, 博士研究生, 副教授。研究方向为气象雷达信号处理。