

黄克慧, 朱景, 黄以平, 等. 2013. 基于多普勒天气雷达的火情自动识别系统. 气象, 39(2): 241-248.

基于多普勒天气雷达的火情自动识别系统^{*}

黄克慧¹ 朱 景² 黄以平³ 周必高² 钟建峰¹

1 浙江省温州气象雷达站, 温州 325027

2 浙江省温州市气象台, 温州 325027

3 浙江省温州市林业局, 温州 325027

提 要: 新一代多普勒天气雷达(CINRAD-SA)具有探测森林火灾的能力, 由于火灾雷达回波的空间尺度仅为降水回波的几分之一甚至小几个量级, 且混合在杂波中, 因此难以被及早发现。为了使雷达自动识别火情(火灾)成为可能, 文章提出并详细讨论了自动识别火灾回波的“火灾杂波过滤法”, 以及利用非零速度距离库数和反射率距离库数来过滤降水回波的“降水回波过滤法”, 并在此基础上研制了基于多普勒天气雷达的火情自动识别系统。在长达一年半时间的试运行中, 系统监测到温州辖区内近百起火情, 它对火情预警的命中率(POD)、误警率(FAR)和临界成功指数(CSI)分别为 79%、4% 和 76%。在有效监测范围(距离雷达站半径约 110 km)内, 该系统能对森林(草原)火情进行自动识别、定位和报警, 并提供每 6 min 一次的连续跟踪监测。这种新的火情自动识别和监测方法可为森林消防指挥部门提供更为及时、准确的火情动态信息, 也为多普勒天气雷达拓展了新的应用领域。

关键词: 多普勒天气雷达, 森林火灾, 火情监测, 自动监测, 识别系统

中图分类号: P412

文献标识码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 02. 014

Fire Automatic Detection System Based on Doppler Weather Radar

HUANG Kehui¹ ZHU Jing² HUANG Yiping³ ZHOU Bigao² ZHONG Jianfeng¹

1 Wenzhou Weather Radar Station of Zhejiang, Wenzhou 325027

2 Wenzhou Meteorological Observatory of Zhejiang, Wenzhou 325027

3 Wenzhou Forestry Office of Zhejiang, Wenzhou 325027

Abstract: The CINRAD-SA Doppler weather radar has the ability of detecting forest fires, however, the spatial scales of fire echoes are far less than rainfall's, therefore it is hard to distinguish fire echoes from others manually. In order to make the fire detection and recognition possible by radar, a new method of fire clutter filtering was proposed and discussed in detail which reserves the fire echoes while removes the clutter echoes efficiently. Meanwhile, another new method of precipitation echo filtering was developed, which used the numbers of non-zero velocity gates and reflectivity gates. Based on that, an automatic fire detection system was developed, which can recognize and identify fire echoes out of clutter and precipitation echoes automatically. During one and a half year's real-time test, the system detected nearly 100 of fire events in region of Wenzhou City, most of them confirmed by forest fire management departments. The accuracy of fire detection in terms of the probability of detection (POD), the false alarm ratio (FAR) and the critical success index (CSI) statistics is 79%, 4% and 76% respectively. Within the valid radius approximately 110 km away from radar station, the system can detect, position and alarm forest (wildland) fires automatically, as well as providing fire monitoring every 6 min continuously. It could be a brand new approach of forest fire detection, which can provide timely and accurate fire information to decision makers of forest fire management.

* 温州市科技局社会发展项目(S20080012)资助

2011 年 10 月 10 日收稿; 2012 年 7 月 25 日收修定稿

第一作者: 黄克慧, 主要从事短临预报和研究. Email: khhuang@163.com

Key words: Doppler weather radar, forest fires, fire detection, automatic detection, recognition and identification system

引言

在晴空状况下雷达也会出现一些回波,早期由于找不出这些回波的形成原因,便将之取名为“神仙波”、“安琪儿回波”或“奇异回波”(张培昌等,2000),一般认为这些离散或点状的回波是由鸟群、昆虫群或者森林火灾形成的(Merrill,2007)。有关雷达探测火灾的事实已有较多的报道。如,一起发生在加拿大蒙特利尔郊区的油漆厂火灾,从烟气开始出现到火灾最后熄灭的全过程被 McGill 大学的 S 波段雷达(波长 10 cm)、X-波段雷达(波长 3 cm)和 UHF 风廓线仪(波长 33 cm)三部雷达监测到(Rogers et al,1997);上海 WSR-88D 多普勒天气雷达在降水模式下监测到了一起发生在闵行区的重大的火灾的发生、升腾、扩展和扑灭的全过程(陈永林等,2010);WSR-88D 雷达和 MODIS、GOES 卫星相结合,可以显示草原火灾位置、烟气的上升高度等信息(Jones et al,2010);温州新一代多普勒天气雷达(CINRAD-SA)投入使用后也探测到了多起森林火灾(黄克慧等,2007),其探测森林火灾的有效半径一般为 110 km,最远的可达 132 km,显示出新一代多普勒天气雷达有很强的火灾监测能力。应用方面的报道包括,有专门用来探测森林小火的激光雷达(Andrei et al,2003),在无遮挡、天气状况良好的情况下可探测距离 10~23 km 范围内的森林火灾,且能在起火 40 s 后探测到火灾。由于这种激光雷达属微波雷达,其监测范围要比厘米波天气雷达小很多;激光雷达还存在激光对人眼的损害问题,且价格昂贵。另外,有利用实时雷达和卫星产品为应急指挥中心气象专家和管理人员提供准确的火灾位置、强度和发展等现场服务的报道(Gary et al,1998),但这种应用仅在掌握火灾发生的事实后进行。目前,业务运行的中国新一代多普勒天气雷达每 6 min 完成一个完整的体扫,且 24 h 不间断运行,理论上可以借助雷达发现森林火灾并进行实时跟踪监测。

及早发现火情是实现森林火灾“打早、打小、打了”的第一步(林业部森林防火办公室,1996),如果能在第一时间对雷达探测到的火情进行自动识别和报警,将有助于森林消防部门及早掌握火情、扑灭火灾,其潜在的社会、经济效益不可估量。然而,由于火灾产生的回波在水平尺度上要比降水回波小好

几倍到几个量级,且混杂在地物等杂波中,即使经验丰富的雷达分析员也很难在第一时间通过雷达显示工作站 PUP(Principal User Processor)辨别出火灾回波。因此,多普勒天气雷达探测森林火灾的能力无法直接应用到及早发现森林火灾上。

要发挥多普勒天气雷达在火灾监测和预警中的作用,首先应有相应的基于多普勒天气雷达火灾回波识别算法与之配套。从现有的研究成果看,风暴自动识别、追踪方面有很多理论和方法可以借鉴参考(韩雷等,2007)。然而,到目前为止还未见到可供参考的森林火灾回波自动识别算法。因此,研究开发森林火灾回波自动识别的算法成为能否发挥雷达及早识别发现森林火灾的关键。本文在介绍火灾回波、降水回波和地物杂波等不同回波特征的基础上,阐述研制多普勒雷达自动识别火情系统(Doppler Radar Auto Recognizing Fires System,DRARFS)的主要步骤和方法,并对系统识别火情能力作简要分析。

需要补充的是,雷达探测火灾与探测降水粒子的原理类似,即雷达发射的电磁波遇到被火灾燃烧热力抬升的后向散射物后产生回波。根据雷达方程,10 cm 测雨雷达(CINRAD-SA)对直径小于 10 μm 的烟尘颗粒不敏感,而对于大碎片则较敏感(Jones et al,2009),因此火灾产生的烟尘颗粒并不足以使 CINRAD-SA 雷达产生 30~50 dBz 甚至 58 dBz(黄克慧等,2007)的强回波。事实上,在火场下风方数十千米外可以找到燃烧后的面条状灰烬甚至形状完整的叶片,这与雷达圆形退极化率(Circular Depolarization Ratio)值为负无穷大而表明探测到线状或面条状目标物的结果相一致(Banta et al,1992)。因此,火灾回波的后向散射物主要是被燃烧热力抬升的尺寸较大的树枝、叶等灰烬,而非仅仅是火灾“烟尘”。

1 步骤和方法

为了实现对火灾回波的自动识别,首先对输入的雷达基数据进行杂波和降水回波过滤处理,再对可能存在的“疑似火点”回波进行标识、定位和报警。一旦识别、报警,则可以在地理信息系统上显示“疑似火点”的位置,可利用自动站、卫星火情识别系统等辅助方法予以确认。

为使研究过程简化,先讨论晴空状况下(无降

水、无超折射回波等)去除杂波、保留火灾回波的方法,再讨论过滤降水回波的方法。系统设计所涉及的主要步骤和方法见图 1,主要过程包括火灾杂波过滤、降水回波过滤以及“疑似火点”定位、显示和报警等。

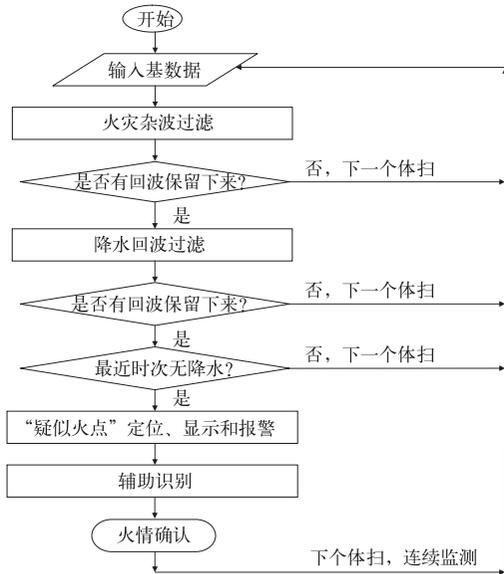


图 1 火灾回波识别流程

Fig. 1 The flowchart of fire echo detection

1.1 火灾杂波过滤

有多种方法可减少雷达数据受非气象因子的污染,其中 Zhang 等(2004)使用的噪声过滤方法能简单有效地过滤掉孤立点、线和杂波等噪声。本文尝试借鉴该方法讨论过滤杂波、保留火灾回波的方法。

在杂波过滤之前,先挑选合宜的雷达基本产品和仰角。对历史火灾样本的研究中发现,火灾回波一般有以下特征:低仰角反射率图上回波表现出水平尺度小、回波顶高度低、回波强度高等类似于地物回波的特征;低仰角速度图上一般会出现辐散型的“速度对”。高度(仰角)方面,在温州多普勒天气雷达监测到的火灾中,回波海拔高度一般在 2.5 km 以下。根据雷达距离高度公式,该高度在 0.5°、1.5°和 2.4°仰角上分别对应距离雷达站半径约 110、60 和 40 km(温州雷达站天线海拔高度为 734.7 m)。实际探测发现有大量火灾出现在距离雷达站 50~110 km 范围内,而 1.5°、2.4°以及更高仰角探测不到近距离火灾,所以对火灾回波识别来说意义不大。另外,在谱宽产品上还没有发现可供识别的显著特征。因此,为方便起见本文仅选取基数据中 0.5°仰角的基本反射率和径向速度进行计算处理。

1.1.1 噪声过滤方法

Zhang 等使用的噪声过滤方法是,对于任意给定的距离库 X ,计算以它为中心的 5×5 个距离库数中反射率探测值为非空的个数 N ,则非空值的百分率(P_x)计算公式为:

$$P_x = N/N_{\text{total}} \quad (1)$$

这里 N_{total} (=25)代表以 X 为中心窗口的距离库总数或像素点。如果 P_x 小于一个给定的阈值(缺省值为 75%),则认为点 X 是孤立点并删除。这种方法消除斑点回波非常有效,然而由于火灾初期的回波或小规模火灾回波与“噪声”极为相似,因此极易和“噪声”一起被过滤掉。为了既能保留火灾回波,又能有效去除杂波,试着对上述方法作适当调整,并作相应对比试验,调整后的方法暂且称之为“火灾杂波过滤法”,以示不同。

1.1.2 火灾杂波过滤法

以不同火灾过程的体扫资料为对象,分别取不同的 N_{total} 、回波强度和 P_x 值作对比试验,以期找到适合于过滤火灾杂波的参数。共选取 5 起火灾过程中回波最典型时刻的体扫资料来作试验,分别是 2007 年 1 月 31 日浙江省永嘉县桥下镇森林大火(用 f_1 表示),2007 年 4 月 8 日乐清市乐城镇(f_2)、青田县高湖镇(f_3)和临海市河头镇(f_4)森林火灾,以及 2010 年 2 月 20 日瑞安市锦湖街道森林小火(f_5),其中 f_2 、 f_3 和 f_4 同时刻出现在同一平显中。这些火灾发生时天气晴朗,雷达无降水回波。

1.1.2.1 N_{total} 取值

鉴于火灾回波水平尺度远小于降水回波, N_{total} 取值不宜太大,试着分别取 3×3 、 5×5 和 7×7 , P_x 取 100% 进行计算,其杂波过滤前后效果如图 2。图中可见,未经杂波过滤的原始基本反射率图上存在大量杂波,火灾回波就夹杂在这些杂波之中($f_1 \sim f_5$ 分别位于图 2 第一列箭头所指处)。当 N_{total} 取 3×3 时, f_1 火灾绝大部分杂波被过滤掉,仅有少量杂波被保留下来(见图 2a₂ 圆圈标示),同时火灾回波完整的轮廓和强回波也保留下来; f_2 、 f_3 和 f_4 火灾仍有不少杂波保留下来; f_5 除火灾回波旁边有一处弱回波外其余杂波均被清除。当 N_{total} 取 5×5 时, f_1 所有杂波都被过滤干净,同时火灾回波周围及最强回波也随杂波一起被过滤,使得火灾回波面积缩小、强度降低(见图 2a₃); 火灾回波面积缩小、强度降低的情形同样发生在 $f_2 \sim f_4$ 火灾,此时仍有少量杂波存留;而 f_5 则连同杂波一起被清除掉。当 N_{total} 取 7×7 时, f_1 仍无杂波存留,火灾回波面积和强度变得更小(见图 2a₄); $f_2 \sim f_4$ 只剩下火灾回波,面积和强

度同样变得更小; f_5 再次连同杂波一起被清除掉。可见, 当 N_{total} 为 5×5 和 7×7 时, 火灾回波的面积和强度缩小(如 $f_1 \sim f_4$), 甚至完全消失(如 f_5), 因此不利于火灾回波的识别; 当 N_{total} 取值为 3×3 时, 火灾回波的轮廓和强回波特征等信息可以得到保留, 尤其是可以保留小规模火灾回波(如 f_5), 因此可以作火灾杂波过滤的阈值。

1.1.2.2 回波强度阈值

上节, 当 N_{total} 取 3×3 时 $f_1 \sim f_5$ 火灾有少量杂波保留下来, 经观察发现这些杂波强度较弱。实际观察中也发现, 由地表、生物体等引起的晴空回波强度一般小于 15 dBz(王佑兵等, 2006), PUP 中用于抑制孤立反射率因子的缺省阈值为 18 dBz(俞小鼎等, 2006), 因此, 可考虑通过设置合宜的回波强度阈值来消除这部分杂波。方法是, 在上节 N_{total} 取 3×3 、 P_x 取 100% 的基础上, 把“反射率探测值为非空”修改为回波强度等于某个阈值(如 15、16、17、18、19 和 20 dBz 等)来作对比试验。

试验发现, 当回波强度阈值为 15 dBz 时, f_1 火灾仍有少量杂波遗留(图略), f_2 、 f_3 和 f_5 火灾只剩下火灾回波, f_4 由于强度相对较弱被过滤掉; 当阈值为 16~20 dBz 时 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 的杂波完全被清除干净; 当回波强度阈值为 20 dBz 时杂波过滤效果最好。可见, 回波强度阈值越大杂波过滤效果越好, 然而过大的回波强度阈值往往使火灾得不到及早识别, 规模较小、强度较弱的火灾甚至识别不了(如 f_4); 相反, 过小的阈值将使一些杂波保留从而影响火灾回波的识别。大量实际案例计算表明, 当回波强度阈值为 18 dBz 时既能较早地对火灾回波进行识别和报警, 又有较为理想的杂波过滤效果。

1.1.2.3 P_x 取值

试验发现, 当采用上述参数设定(N_{total} 取 3×3 、回波强度阈值为 18 dBz、 P_x 取 100%) 识别火灾时间偏迟, 规模小、强度弱的火灾难以被识别。

为了及早识别火灾回波, 同时兼顾杂波过滤效果, 试着取不同 P_x 值作对比试验, 试验结果如图 3。当 P_x 为 8/9(此处分数比百分数直观)时, 所有杂波都被清除(图 3 第一列), f_4 与上小节相同即由于强度原因也被清除; 当为 7/9 时, f_1 周围出现少许杂波, 其他火灾则依然保持干净。随着 P_x 值的减小, 除 f_5 之外, 杂波数量都随之增加, 保留下来的火灾回波面积和强度也随之增加。

可见, 当 N_{total} 为 3×3 、 P_x 为 8/9、回波强度阈值为 18 dBz 时有较为理想的杂波过滤效果。然而, 由于实际大气冷暖、干湿引起的折射指数变化, 会引起

地物回波增强或减弱, 偶尔会出现一些杂波过滤不完全的现象, 这时可把 P_x 值调大(9/9)或者把回波强度阈值调大(20 dBz)以提高杂波过滤效果。相反地, 为了提高火灾回波的识别能力及及早识别能力, 可以调低 P_x 值(如 7/9)和回波强度阈值, 使得像 f_4 这样的强度弱的火灾能够被识别。

1.2 降水回波过滤

在晴空状况下, 上述“火灾杂波过滤法”可过滤地物杂波、超折射回波等杂波, 并成功识别出火灾回波。为了减少人工干预, 满足全天候运行的需要, 系统应具备降水回波过滤的功能。

1.2.1 火灾和降水回波的距离库数特征

过滤降水回波的第一步是掌握火灾回波和降水回波定量上的差异。研究发现, 非零速度距离库数及反射率距离库数可定量反映两者间的不同。为方便比较, 把降水回波分为对流性降水、层状云降水、热带气旋降水和极弱降水等 4 种类型, 并利用火灾和每个降水类型的 2~3 个过程雷达体扫资料进行计算(雷达体扫资料见表 1)。

需要说明的是, 此处“极弱降水”是指降水强度极弱(痕量至几个 mm)、降水范围极小(仅少数几个自动站或没有自动站出现降水)的降水, 在雷达基本反射率图上通常表现为范围极小、回波高度极低(回波顶高度在 1~2 km 以下)以及强度极弱(20~30 dBz 以下)等明显有别于一般降水回波特征的降水类型。在雷达探测实践中, 这种“极弱降水”回波由于强度和范围过小且通常混杂在地物杂波中而不易引起注意。

反射率距离库数的计算方法是, 采用 1.1.2 节火灾杂波过滤法对数据进行过滤处理后, 再统计所有剩余的反射率距离库数; 非零速度距离库数的计算也类似, 不同的是, 它以速度值不为零为阈值(即任意给定的速度距离库数其周围有 8 个库或以上为非零时, 即计为 1 个非零速度库), 统计 0.5° 仰角所有速度值不为零的距离库数。

对表 1 中的体扫资料进行计算, 统计结果见表 2。非零速度距离库数与回波面积大小有关, 火灾回波的非零速度距离库数平均值(5742)比各种类型降水回波小一到两个量级。在所有类型的降水回波中, 层状云降水回波拥有最大面积且最均匀的回波, 非零速度库通常可以覆盖整个雷达扫描区域, 所以其平均数量最多(111124); 对于对流性降水(45843), 在雷达扫描范围内仍有许多区域由于没有对流体而存在无回波的“空档”, 所以非零速度库数

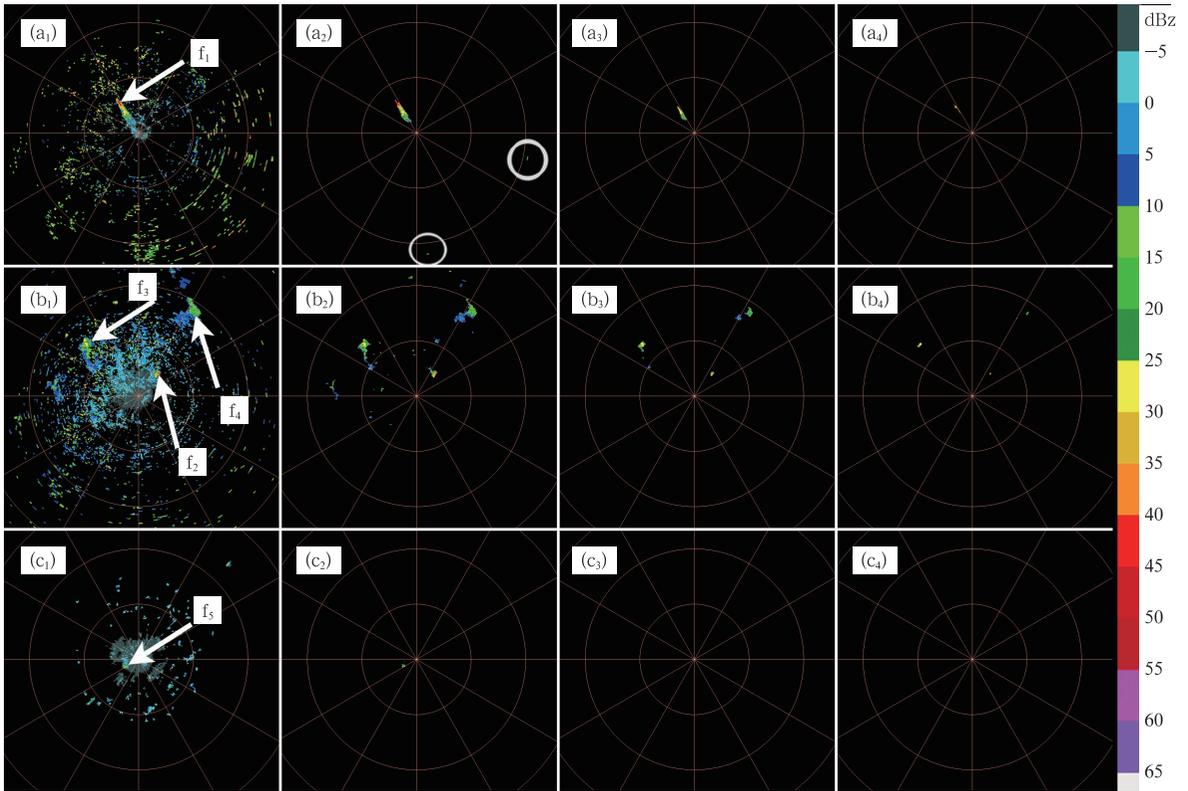


图 2 不同 N_{total} 阈值的杂波过滤效果对比

[第一列(a₁、b₁和c₁)杂波过滤前0.5°基本反射率,火灾回波位置如f₁、f₂、f₃、f₄和f₅箭头所示;第二列(a₂、b₂和c₂)、第三列(a₃、b₃和c₃)和第四列(a₄、b₄和c₄)分别是 N_{total} 取3×3、5×5和7×7时的滤波效果]

Fig. 2 The comparison of clutter filtering effects by different N_{total} thresholds

[The 1st (a₁, b₁ and c₁) for base reflectivity of 0.5° before clutter filtering, the arrows f₁, f₂, f₃, f₄ and f₅ show the fire echo locations. The 2nd (a₂, b₂ and c₂), 3rd (a₃, b₃ and c₃) and 4th (a₄, b₄ and c₄) column denotes clutter filtering by different gate numbers N_{total} of 3×3, 5×5 and 7×7]

表 1 火灾和降水过程的雷达体扫资料

Table 1 Radar volume scan datasets of forest fires and precipitation processes

回波类型	火灾或降水过程	样本数
火灾	2007年1月31日浙江永嘉桥下森林大火;2007年4月8日乐清乐城森林火灾、2010年3月28日青田和永嘉森林火灾	419
对流性降水	2008年8月13日雷雨大风天气、2009年8月18日泰顺冰雹强对流天气及8月28日瑞安雷雨、大风、冰雹天气	462
层状云降水	2009年1月25—26日强冷空气天气及2010年2月13—14日冷空气降水	538
热带气旋降水	2009年Morakot(0908)以及2008年Sinlaku(0813)热带气旋	500
极弱降水	2010年1月19日和29—30日“极弱降水”过程	390

比层状云降水回波少;而热带气旋降水的水平尺度很大,但其中有许多对流活动,所以其数量介于对流性降水和层状云降水之间(50060)。对于极弱降水回波,虽然强回波面积小,但是弱回波的范围仍然较大,对应的非零速度库数也不小(23673)。另外,火灾回波非零速度距离库数的极大值、极小值和均方

差均比各类降水回波小。

从反射率距离库数平均值看,火灾回波(平均值为124)比层状云(41025)和热带气旋降水(22238)回波小两个量级,比对流性降水(5835)小一个量级,而与极弱降水回波(297)属同一个量级。显然,非零速度库数和反射率距离库数的大小与火灾及天气个

例的选取有关,同一类型降水在不同天气过程的差异是存在的,但其量级大小基本可以反映各种类型降水回波的差异。

1.2.2 降水回波过滤方法

根据 1.2.1 节火灾与不同类型降水的非零速度距离库数和反射率距离库数特征以及火灾回波的垂直高度特点,设计降水回波的过滤方法如下:

(1) 设定一个非零速度距离库数作判别降水回

波的阈值。即把火灾回波的非零速度距离库数(5742)平均值加上两倍均方差(5128×2),其数值约为 16000,该值与火灾回波的极大值相当,当非零速度距离库数大于这个阈值时,可以判为降水回波。

(2) 设定一个反射率距离库数阈值,进一步提高降水回波过滤的有效性。取比火灾回波极大值更大的反射率距离库数作阈值(缺省为 500)。该值比对流性降水、层状云降水和热带气旋降水平均值小

表 2 火灾回波和不同类型降水回波的非零速度和反射率距离库数统计
Table 2 The gate number statistics of non-zero velocity and reflectivity for fire echoes and different kinds of precipitations

回波类型	非零速度距离库数				反射率距离库数			
	平均值	极大值	极小值	均方差	平均值	极大值	极小值	均方差
火灾	5742	16687	2747	5128	124	462	1	126
层状云降水	111124	159080	3831	44133	41025	98133	0	31136
对流性降水	45843	106458	12362	24235	5835	41828	0	9333
热带气旋降水	50060	110148	45736	22675	22238	54911	1818	12366
极弱降水	23673	74818	7415	14121	297	2981	0	650

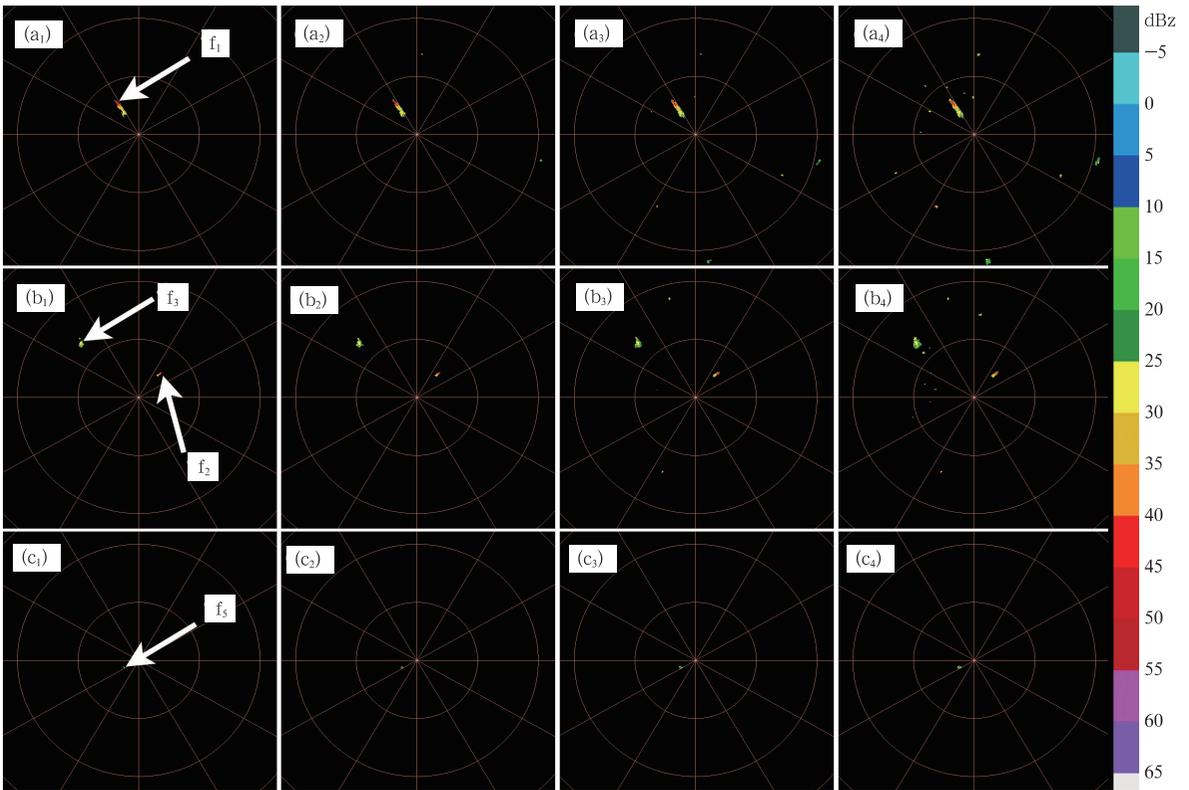


图 3 不同 P_x 阈值的杂波过滤效果对比

[(第一列(a₁、b₁和c₁)、第二列(a₂、b₂和c₂)、第三列(a₃、b₃和c₃)和第四列(a₄、b₄和c₄)分别是 $P_x=8/9, 7/9, 6/9$ 和 $5/9$ 时的杂波过滤效果, 火灾回波位置如 f_1, f_2, f_3 和 f_5 箭头所示 f_4 已被过滤]

Fig. 3 The comparison of clutter filtering effects by different P_x thresholds

The 1st (a₁, b₁ and c₁), 2nd (a₂, b₂ and c₂), 3rd (a₃, b₃ and c₃) and 4th (a₄, b₄ and c₄) column denotes clutter filtering by different P_x thresholds of 8/9, 7/9, 6/9 and 5/9 respectively, the arrows f_1, f_2, f_3 and f_5 show the fire echo locations, f_4 has already been filtered

一至两个量级。当反射率距离库数大于这个阈值时,可判为降水回波。

(3) 由于火灾回波的垂直高度普遍较低,在雷达扫描范围内,回波高度超过一定阈值的(缺省值为 3.5 km,略高于目前探测到的最大火灾回波高度 2.5 km,以免误删一些回波高度异常偏高的火灾回波)判为降水回波。

经上述方法处理后,层状云降水、对流性降水以及热带气旋降水等大型降水回波可以被过滤,即使在森林大火(即有很大的非零速度距离库数和反射率距离库数)的初期其距离库数也相当有限,火灾回波仍可得到识别。然而,从表 2 中还可以看到,除热带气旋降水外,上述非零速度距离库数和反射率距离库数阈值(分别为 16000 和 500)比各类降水的极小值要大;另外,火灾回波和极弱降水在反射率距离库数上的差异很小。因此这部分降水回波尤其是极弱降水回波可能会和火灾回波相混淆而导致降水过滤失败,其过滤方法有待进一步研究。

1.3 “疑似火点”的标识、定位和报警

经火灾杂波和降水回波过滤后若仍有回波存留,则该回波很有可能是火灾引起的回波,可作为“疑似火点”对其进行标识。

由于火灾回波一般呈现为块状,块状回波的“中心”强度强而周围强度弱,取回波大值处(“中心”)作为“疑似火点”位置进行定位,该位置与实际火点位置较为接近。定位点在雷达上为极坐标,经坐标转换后可在地理信息系统上显示。至此,“疑似火点”可被自动识别和定位,并且一旦出现“疑似火点”则用声音报警提醒。

2 结果和分析

2.1 运行结果

根据上述火灾回波的识别流程和方法,研制了多普勒雷达自动识别火灾系统(DRARFS),系统默认阈值设定为 N_{total} 取 3×3 、回波强度阈值为 18 dBz、 P_r 取 $7/9$ (参数可随时设置)。较小的回波强度阈值和较小的 P_r 值将使误警次数增加,但为了及早或能够捕捉到可能的森林火情这种代价是值得的。

经一年半时间(2010 年 3 月底至 2011 年 9 月)全天候试运行,系统共实时处理了约 14 万个个体扫数

据,自动发布了 1751 次报警,其中属火情的报警 1042 次,异常或地物回波过滤不完全引起的虚警 149 次,极弱降水回波引起的虚警 560 次。

2.2 系统评分

火情报警的命中率(P_{OD})、误警率(F_{AR})和临界成功指数(I_{CS})参照文献(Joseph, 1990)定义如下:

$$P_{OD} = \frac{X}{X+Y}, \text{表示正确发布的火情警报次数占}$$

所有火情事件总数的比率;

$$F_{AR} = \frac{Z}{X+Z}, \text{表示错误发布的火情警报占所有}$$

火情警报总数的比率;

$$I_{CS} = \frac{X}{X+Y+Z}, \text{表示正确发布的火情警报次数}$$

占已经或需要发布的火情警报总数的比率。

其中 X 表示事件和警报相一致的次数(见表 3),即火情发生、火情警报也发布的次数; Y 表示火情事件发生但没有发布警报的次数; Z 表示火情事件没有发生却发布了警报的次数。

表 3 火情警报和火情事件发生情形表
Table 3 The contingency table of fire warnings and events

		警报	
		发布	没发布
事件	发生	X	Y
	没发生	Z	W*

注: * W 表示火情事件没有发生、警报也没有发布。

这里,把评分中的“次数”改为辖区内实际火灾或报警的“过程次数”,而不是“单次报警”次数来统计。原因有,系统一次报警对应的火情可能是一起(如 f_1 和 f_5),也可能是多起(如 f_2 、 f_3 和 f_4 同时发生),若按“单次报警”统计口径可能会不同;另外,一些非技术原因可能会导致确认一起火灾是否真实发生变得困难,因此验证雷达每 6 min 一次的火情报警的真伪难度更大。统计方法是,把温州境内地理位置相近、且连续报警(达到报警阈值)达 3 次以上的划为一起过程(熄灭又复燃的、降水过程误警等均计为一次过程,连续报警 3 次以下的不作统计);再分县(市、区)逐起验证。

经验证,系统对温州境内 95 起火情发出了报警(达到报警阈值)(X),实况发生火灾而系统没有发布报警的 26 起(Y),4 起实况没有发生火灾而系统却发布了报警(Z),因此该系统的火情预警的命中率(P_{OD})为 79%、误警率(F_{AR})为 4%、临界成功指数(I_{CS})为 76%。其命中率与 CINRAD/SA 风暴识

别与跟踪算法对单体识别的命中率相当(对 30~39 dBz、40~49 dBz 和 50 dBz 以上回波的风暴识别与跟踪算法的命中率分别为 60.2%、82.9% 和 97.2%),而误警率则显著低于后者(大风组中气旋 57.8%,龙卷组中气旋 62.3%),临界成功指数也同样显著高于后者(大风组中气旋 25.0%,龙卷组中气旋 28.0%)(钟敏等,2012)。

3 结论和讨论

本文根据“噪声过滤法”提出并详细讨论了自动识别雷达火灾回波的“火灾杂波过滤法”,以及利用非零速度距离库数和反射率距离库数过滤降水回波的方法,在此基础上开发了多普勒雷达自动识别火灾系统 DRARFS。经一年半时间的试运行,系统监测到辖区内近百起森林火情,其对火情预警的命中率(P_{OD})、误警率(F_{AR})和临界成功指数(I_{CS})分别为 79%、4% 和 76%。

虽然 DRARFS 系统有较高的火情预警命中率和较低的误警率,但仍有大量火情并没有得到有效地监测和报警。导致无法监测的可能原因,包括,火灾规模或强度过小,以至于无法被雷达探测到或达不到系统报警阈值;或者由于较大环境风力的影响,烟尘等物质在扩散过程中不能堆积到引起雷达回波或系统报警强度阈值的浓度,导致火情不能被监测到;另外,可能在有效监测范围内同时出现降水和火灾回波,由于算法原因也会导致判别失败。

系统也有可能把部分极弱降水回波误判为火灾回波,导致虚警。当系统警报时,为了判断是否为虚警,可根据地理信息系统、自动气象站数据、雷达 PUP 产品和卫星火情监测结果等来综合判别。这些辅助手段虽然没有严格的标准或定义,但在实践中有一定的实用价值。

及早发现和监测火情对森林防火灭火工作意义重大,本文是多普勒天气雷达在该领域应用方面的新尝试,由于不同雷达的波长、雷达天线高度、对烟尘等物质的探测能力以及火情发生的地理、大气环境各不相同,因此火灾回波自动识别算法中存在的不足和缺陷仍有待改善和提高。

致谢: 本文在完成过程中得到浙江省永嘉县林业局施旭顶、郑文杰和叶胜忠等人的支持和帮助,在他们的帮助下对部分火灾现场进行勘查并提供详细的森林火灾资料;也得到永嘉县气象局周建辉等人现场勘查的后勤支持。乐清市

林业局森林消防指挥部吴海云为本文研究提供了该市境内详尽的火情资料。文成和泰顺等地林业局森林消防部门也提供了大力支持和帮助。温州气象雷达站的吴书筑和楼成武工程师在本课题研究中提供了许多宝贵的指导意见和帮助。在此一并表示感谢!

参考文献

- 陈永林,曹晓岗,邵玲玲,等. 2010. 上海一次重大火灾烟雾的雷达回波特征研究. *气象科学*, 30(1): 121-125.
- 韩雷,王洪庆,谭晓光,等. 2007. 基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警的研究进展. *气象*, 33(1): 3-10.
- 黄克慧,周功铤,谢海华,等. 2007. 森林火灾的 CINRAD/SA 雷达监测. *气象科学*, 27(B12): 99-106.
- 林业部森林防火办公室. 1996. 森林火灾扑救与指挥. 北京: 中国林业出版社, 45-54.
- 王佑兵,万玉发. 2006. 雷达体扫反射率场的自动质量控制. *气象科技*, 34(5): 615-619.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 220.
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 2000. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 334-352.
- 钟敏,吴翠红,王珊珊,等. 2012. CINRAD/SA 雷达两种识别跟踪产品的评估分析. *气象*, 38(6): 722-727.
- Andrei B U, Armando F, Fernando S, et al. 2003. Feasibility of forest-fire smoke detection using lidar. *International Journal of Wildland Fire*, 12: 159-166.
- Banta R M, Olivier L D, Holloway E T, et al. 1992. Smoke-column observations from two forest fires using doppler lidar and doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, (31): 1328-1349.
- Gary L H, Kelley H L W S, Raymond K M et al. 1998. Use of real-time multi satellite and radar data to support forest fire management. *Weather and Forecasting*, 13(3): 592-605.
- Jones T A, Sundar A C, Walt P. 2009. Dual-polarization radar characteristics of an apartment fire. *J Atmos Oceanic Technol*, 26(10): 2257-2269.
- Jones T A, Sundar A C. 2010. Satellite and radar remote sensing of southern Plains Grass Fires: A case study. *J Appl Meteor Climatol*, 249(10): 2133-2146.
- Joseph T S. 1990. The critical success index as an indicator of warning skill. *Weather and Forecasting*, 5(4): 570-575.
- Merrill I S. 2007. 雷达系统导论(第三版)(英文版). 北京: 电子工业出版社, 449-455.
- Rogers R R, Brown W O J. 1997. Radar observations of a major industrial fire. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(5): 803-814.
- Zhang Jian, Wang Shunxin and Clarke B. 2004. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure//American Meteorological Society. 11th Conferences on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. Hyannis, MA.