

徐八林,杨卫洁,徐舒扬,等,2020. C 波段高山天气雷达对森林火灾的探测能力初析[J]. 气象,46(8):1113-1121. Xu B L, Yang W J, Xu S Y, et al, 2020. Preliminary analysis of the ability of C-band mountaintop radars to detecting forest fires[J]. Meteor Mon, 46(8):1113-1121(in Chinese).

C 波段高山天气雷达对森林火灾的探测能力初析*

徐八林¹ 杨卫洁¹ 徐舒扬² 解莉燕¹ 陆 鹏³ 王 欣¹

1 云南省大气探测技术保障中心,昆明 650034

2 成都信息工程大学,成都 610225

3 云南省昆明市气象局,昆明 650503

提 要: 借鉴前人在 S 波段新一代天气雷达上探测森林火灾和城市大火烟尘的方法和研究成果,利用收集到的云南十部 C 波段新一代天气雷达的 34 次森林火灾个例资料,立足云南 C 波段高原高山雷达的一些特点,采用分类对比进行分析研究,得出 C 波段高山雷达森林火灾回波的一些特有指标。提出按雷达海拔高度分别设置森林火灾判别阈值、引入速度场特征、降水回波过滤等一些新指标和方法,进行这类地区的雷达森林火灾探测。随后开展了业务实践,经检验和实地踏勘,取得了一定效果。证明 C 波段雷达同样具有一定的探测森林火灾回波的能力,主要技术指标有:高山雷达由于海拔高差的影响,应分别针对不同雷达设置相应的阈值参数;根据森林火灾回波的上升和飘散特性,雷达回波速度场与周围回波有时呈现出一定差别;采用过滤晴空回波、过滤杂波、过滤地物回波、过滤二次回波、过滤降水回波、识别速度场特殊回波等办法,可得到滤出的火灾烟尘疑似回波。这些指标和方法对西部高山雷达探测应有一些参考作用。

关键词: C 波段天气雷达,森林火灾,识别监测,高原高山

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.08.010

Preliminary Analysis of the Ability of C-Band Mountaintop Radars to Detecting Forest Fires

XU Balin¹ YANG Weijie¹ XU Shuyang² XIE Liyan¹ LU Peng³ WANG Xin¹

1 Yunnan Atmospheric Observation Technology Support Centre, Kunming 650034

2 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

3 Kunming Meteorological Bureau, Kunming 650503

Abstract: Based on the methods and results of previous researches on detecting forest fires and urban fire smoke by S-band Doppler weather radar as well as the classification and comparison of 34 forest fire cases from 10 C-band radars in Yunnan Province, some unique indices of forest fire echoes by C-band mountaintop radars were obtained in this paper. The paper also put forward setting forest identification threshold according to radar altitude. Some new indices and methods, such as velocity field features, precipitation echo filtering, are introduced to detect forest fires. Then conducting radar detection to forest fires in such kinds of areas and operational practices proved to have achieved certain results by practical tests and field surveys. The main technical indices are as follows. Due to the effect of altitude difference of mountain radars, correspondingly indices and parameters of different radars should be set respectively. According to the rising and drifting characteristics of forest fire echoes, the radar echo velocity is different from the surrounding

* 国家自然科学基金项目(U1133603、41440034)和云南省气象局科研项目(BZ201701)共同资助

2019 年 5 月 21 日收稿; 2019 年 9 月 20 日收修定稿

第一作者:徐八林,主要从事天气雷达应用研究. E-mail: ynxbl@sina.com

echoes sometimes. By filtering clear air echo, clutter, ground object echo, secondary echo, precipitation echo and identifying special echoes of velocity field, the suspected echoes of fire smoke can be obtained. These indices and methods could be used as reference for radar detection in the western mountains.

Key words: C-band weather radar, forest fire, fire identification and monitoring, mountains

引 言

云南地处低纬高原,森林较多,其火灾频发,加之云南很多地方在一年中有一半以上时间处于护林防火期,因此对护林防火尤为重视。在国内外森林火灾的监测也受到广泛关注。过去对森林火灾的遥感观测一般都是基于卫星的热源点探测,范天锡(1990)综述了国内外如何利用气象卫星观测资料监测森林火灾的情况,介绍了林火监测原理、监测效果、存在问题与发展前景。由于森林火灾回波尺度小,在卫星云图上可以发现热点信息,但卫星监测每天 17 次,每次小于 15 min,且被云遮挡和较小面积的火灾监测不到。雷达则可以实现每 6 min 一次体扫的 24 h 全天候、全覆盖、全时段连续监测。雷达探测到的回波,除了降水回波以外,还有许多“杂波”,经过大量研究后,发现这些“杂波”存在许多有用的回波信息。近期许多专家学者利用这些回波在 S 波段(波长 10 cm)雷达上提取有用信息,分离出森林火灾引起的回波,实现了森林火灾的雷达探测,取得了一些较好的效果。黄克慧等(2013)年利用温州新一代多普勒天气雷达(CINRAD/SA)曾多次探测到森林火灾回波,采取的方法是根据森林火灾回波和降水回波、地物杂波等回波的不同特征,对雷达基数据进行分析、处理和计算,最终实现对森林火灾的识别,并实现了定位和自动报警。陈永林等(2010)对 2006 年 5 月 4 日上海市闵行区一次重大火灾烟雾的雷达回波特征进行研究,利用上海 WSR-88D 多普勒天气雷达(S 波段)在 VCP21 降水模式下监测到大火发生、升腾、扩展和扑灭的全过程,表明降水模式能探测到火灾烟尘,提出及时、准确的气象监测是灭火的重要保障。韩雷等(2007)介绍了交叉相关法和单体质心法的研究历史和主要算法,集中介绍了近几年来在外推预报基础上发展起来的一些新方法,提到了雷达杂波的一些识别方法,为森林火灾回波的识别提供了一些技术方法。黄克慧等(2007a)对浙江省南部的 10 次不同规模的森林火灾进行分析,发现温州新一代天气雷达 CINRAD/SA 能对森

林火灾进行监测。张培昌等(2001)介绍了天气雷达的基本原理和探测方法,认为有些“晴空回波”是由鸟群、昆虫群或者森林火灾形成,提到火灾回波。俞小鼎等(2006)介绍了多普勒天气雷达的基本原理,在雷达资料质量控制中提到一些杂波的可能产生原因。钟敏等(2012)对 CINRAD/SA 雷达风暴识别跟踪产品做了定量评估,同时就评估结果与美国同类产品做了对比,就速度场的一些算法进行了介绍。景号然等(2019)利用 SRTM 高程数据作为基础数据,结合天气雷达工作方式和探测方法,分析了地球曲率和电磁波折射影响,获得站点遮蔽角情况,对雷达探测范围有较好预知。朱丹等(2018)对我国已建成的 208 个新一代天气雷达站点进行地形遮挡分析,研究了雷达地形遮挡情况和雷达有效观测区域的覆盖情况,对判断雷达探测区域是否被遮挡有较好帮助。张深寿等(2017)对 2015 年 1 月 23 日一次典型的林火和 2015 年 4 月 6 日漳州古雷 PX 项目油库爆炸,详细分析其火情回波特征,发现 CINRAD/SA 雷达也能够对城市火灾、爆炸等引起的火情回波进行识别,并分析得出其回波特征。黄克慧等(2007b)采用雷达噪声过滤方法,进一步提出一种既能有效去除雷达杂波,又能保留火灾回波的杂波过滤方法。于明慧等(2019)对相控阵及双偏振雷达的一次天气过程资料研究,结果证明相控阵雷达和双偏振雷达能对认识空中目标物的发展演变有较大改进。张林和杨洪平(2018)利用双偏振雷达提取非降水回波信息,根据非降水回波的结构特征,研究了晴空回波和生物回波的识别。黄琴等(2018)以 C 波段双偏振雷达探测的晴空回波为例,分析了晴空大气的反射率因子、径向速度以及差分反射率因子回波特征。陈余兰(2011)对新一代天气雷达与 TWR01 小天气雷达在一次强降水天气过程中的探测情况对比分析,提出 X 波段天气雷达较 C 波段和 S 波段新一代天气雷达灵敏度更高,但衰减也更大;同时 C 波段较 S 波段雷达探测灵敏度较高。李晓敏等(2017)用 X 波段双线偏振天气雷达对北京一个典型雷暴单体内水成物粒子分布随时间演变特征进行了系统的分析。梅垚等(2018)用移动 C 波段

双偏振雷达对西藏那曲地区两次高原冰雹云发生发展的动力、微物理、热力结构特征进行了分析。CINRAD/CC 型天气雷达是中国气象局用于国内气象业务组网探测的新一代 C 波段全相参多普勒天气雷达,主要布设在西部山地。然而在我国占一半左右数量的 C 波段新一代天气雷达,却基本没有对探测森林火灾进行相关的研究。10 cm 波长的 S 波段雷达穿透力更好,衰减小,更适合用于探测台风、暴雨及冰雹。5 cm C 波段新一代天气雷达同 10 cm S 波段新一代天气雷达相比,由于波长更短,灵敏度也就更高,应该对森林火灾的烟尘回波更敏感。在前人利用 S 波段雷达探测森林火灾的研究基础上,提取云南新一代多普勒天气雷达探测森林火灾的回波指标,分析其探测能力,找出雷达回波阈值,形成算法,进而编程完成云南新一代天气雷达的火情自动识别软件系统。现从收集的云南十部 C 波段新一代天气雷达的 34 次森林火灾个例资料中采用分类对比进行分析,归纳出 C 波段雷达的森林火灾回波的一些特征指标,对 C 波段雷达这一能力进行探讨。

1 资料和方法

雷达资料由我国气象部门业务布点建设的十部 C 波段新一代天气雷达提供,型号均是 CINRAD/CC,为 C 波段全相参脉冲多普勒雷达。该雷达具有天线增益高、波束窄、发射功率高、脉冲宽、接收灵敏度高、动态接收范围大等特点。十部雷达均已投入全国气象业务组网运行,其资料格式、探测模式等参数均采用统一标准的 VCP 降水观测模式,取样时间间隔为 6 min 左右一次的连续体扫,每一层含三类数据回波信息,即回波强度(Z)、径向速度(V)、速度谱宽(W),雷达每一层扫描有 512 条径向线,每一个径向存储 Z 、 V 、 W 各 500 个数据。观测原始数据文件的数据记录从 1~14 层,以极坐标方式,按强度、径向速度和谱宽 3 要素顺序排列,从底层到高层存储,每层每要素有 512 个径向数据,每径向有 500 个库,每库长 300 m。文中使用的是雷达体扫的原始基数据资料,根据各库资料高度,选取邻近该高度平面(间隔 1 km)的上下两个仰角的相邻库上的数据,采用九点平滑后插值得到 ZCAPPI(强度等高平面位

置显示),各格点值为雷达反射率因子等数据。昆明雷达站区站号为 Z9871,天线海拔高度为 2484.5 m;普洱雷达站区站号为 Z9879,天线海拔高度为 1926.4 m;德宏雷达区站号为 Z9692,天线海拔高度为 2073 m。

森林火灾个例资料从当地护林防火办收集。

具体方法:把球坐标系下的雷达反射率体扫资料经九点平滑等质量控制后插值到统一的笛卡尔坐标系下的网格点上,采用常规过滤晴空回波、过滤杂波超折射回波、过滤地物回波等方法,再采用过滤二次回波、过滤降水回波、识别速度场回波等特殊方法,得到滤出的疑似火灾烟尘回波。这些过滤回波方法上文文献已有大量论述,在此不再叙述。从森林火灾回波顶高度、厚度,结合常规国家地面自动气象站风向风速和雷达观测的速度场判断回波移动方向等特征要素进行分析,进而确定是否为火灾回波。利用开发的软件系统对近年云南十部 C 波段新一代天气雷达监测的森林火灾个例的演变过程做分析。

2 算法和程序

根据雷达回波强度(反射因子)的定义,发射率 Z 与单位体积内降水质点的分布 $N(D)$ 及质点的直径 D 有关,等于有效照射体积内所有散射粒子直径的六次方之和,即:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D)D^6 dD$$

式中: Z 的单位为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$; $N(D)$ 为滴谱函数,表示在单位体积内直径介于 $D \sim (D+dD)$ 范围内的粒子数。

可见雷达发射率 Z 是由雷达探测质点的直径 D 起了决定性作用。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尘埃的后向散射物后产生回波。根据上述雷达方程的基本原理,雷达对直径小的烟尘颗粒不敏感,而对于大颗粒则较敏感,火灾产生的烟尘并不足以使雷达产生强回波,而火灾燃烧热力抬升的尺寸较大的树枝、叶等灰烬的后向散射是较强回波的主要贡献,通常能产生强回波。基于此基本原理可采用算法从天空中的多种回波滤出火灾雷达回波信息。

通常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,因此难以被较早发现。通过读取经过上述质量控制处理后的雷达资料,先过滤降水回波、过滤晴空弱回波、过滤杂波、过滤地物回波和过滤二次回波等。然后剩下的回波初步被判定为可疑火灾回波。再根据不同回波特征,采用不同距离库分别设置可调的阈值加以分类,经分析总结初步默认设置:晴空回波采用小于 10 dBz 并大于 27 000 距离库;杂波判别采用 9 个库中 6 个无回波;降水回波控制在高于雷达天线一定高度;地物回波采用径向速度绝对值小于 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为阈值;二次回波采用相邻库径向速度绝对值差为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 加以过滤,最后得到疑似火灾雷达回波。在此基础上自主编制了基于 C 波段新一代天气雷达的火情自动识别系统,对森林火情进行自动识别、定位和报警,系统提供每体扫一次的连续跟踪监测报警功能。

2.1 过滤晴空回波

CINRAD/CC 雷达有时会观测到面积较大的晴空连续回波,在这种情况下,如果存在火灾回波,可能是晴空回波与火灾回波二者叠加,所以火灾区域回波强度一般会大于周围晴空回波强度。根据这一特点,设置回波强度和回波库数的两个阈值便可以过滤掉晴空回波。

2.2 过滤杂波

为使过滤杂波更准确和提高程序的运算速度,不采用处理后的直角坐标雷达回波数据,而直接采用极坐标数据来过滤。

过滤方法如图 1 所示。图中 a 点为第 i 条径向

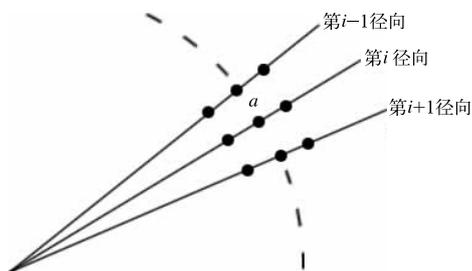


图 1 过滤杂波径向示意图

Fig. 1 Radial diagram of filtered clutter

上某点(库)。判断 a 点(库)回波是否为杂波的方法:用 a 点(库)和它周围的 8 个点(库),共 9 个点(库)来判断。如果该参数设为 6 时,表示以 6 个库为阈值(即 9 个库中出现 6 个库无回波库时)。当 a 点有回波值存在,程序统计上述 9 个库,如果 9 个库中无回波库数大于或等于 6 个库时,即认为 a 点是杂波点,将删除 a 点的回波值。

2.3 过滤地物回波

采用径向速度绝对值来过滤地物回波。根据经验,程序默认值设为 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表示径向速度绝对值小于 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,为地物回波,可根据当地风速实际状况调整。

2.4 过滤二次回波

根据二次回波在径向速度上不连续的特点来过滤二次回波。

如图 1 所示,判断 a 点回波是否为二次回波,当 a 点有回波值时,用 a 点的径向速度分别与它周围 8 个点的径向速度相减得到 8 个差值,这 8 个差值的绝对值,如果有 5 个以上大于或等于参数设置中过滤二次回波阈值(默认为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)时,那么就认为 a 点的回波是二次回波,否则不是。

2.5 过滤降水回波

最初采用通常使用的方法,当高层有回波,低层也有回波时,认为低层回波是降水回波,而不是火灾疑似回波;当高层没有回波,而低层有回波时,认为是疑似火灾回波,而不是降水回波。

然而,云南省地处低纬高原,地形性小尺度对流降水较多。特别是在对流降水回波移动较快时,往往存在低层有降水回波,而高层没有降水回波的现象。只用 1 个观测体扫数据很难过滤掉这样的小尺度对流性降水回波,产生较多误报警。

经个例分析和总结指标,针对云南高原地区和高山雷达等特性,采用 2 个连续观测体扫数据进行降水回波过滤的效果较好。具体方法是程序中设置自动查找当前观测体扫数据前 16 min 内,最近本次观测的 1 个观测体扫数据,同时读取 2 个体扫数据,分析这 2 个观测体扫数据距离雷达天线某高度(该参数默认值为 1 km)上是否有降水回波,如果有降水回波就认为该次体扫数据的低层回波是降水回波,将其过滤,否则即是疑似火灾回波,将其保留。

如果程序在前 16 min 内没有找到最近本次观测的 1 个观测体扫数据,程序就只用当前的 1 个体扫数据进行降水回波过滤,不影响程序运行,只是检验下来过滤对流性降水回波效果较差。

2.6 其他运行参数设置项

程序启动时程序指向雷达原始数据保存的默认文件夹,自动查找最后 1 个体扫观测基数据,并进行处理显示。以库为基础把上述监测指标阈值进行设置过滤(图 2),然后显示出疑似火灾回波。

在分析云南森林火灾回波、降水回波和地物杂波等不同回波特征的基础上,通过以上参数指标设置和软件编程实现森林火灾预警,提出了针对云南高原地区天气特点、地形特征和高山雷达探测特殊性的云南新一代天气雷达自动识别火情系统。

3 个例检验分析

3.1 丽江雷达个例

实况:2017 年 1 月 20 日 14:40,丽江市玉龙县石头乡利菹村委会小桥头组四脚炉发现森林火情。截止 1 月 21 日 14 时,共组织扑救人员 1700 余人和直升机参与扑救。火场有两条不连续火线,火线为 0.4 km,过火面积约 71 000 m²。

分析丽江雷达回波资料,在 2017 年 1 月 20 日 12:16 的雷达回波图上就能发现点状火灾回波,面积较小,软件没有启动报警,这比发现森林火灾提前了约 2 h。由于非主汛期,雷达观测到 15 时关机。火灾回波特征较明显出现在次日,从雷达回波图(图 3)上看,这次火灾回波在图 3a 上也有一些特征,但没有图 3b 上明显,在速度图上有较明显的 3 m·s⁻¹

特征,经查勘绿色区域大致为火灾烟尘区域,同白色零速度的地物回波形成明显对比。由于 C 波段雷达灵敏度较高,能够清晰探测到该区域内的速度差异。因此在算法中加入了速度特征指标提取。经按上述算法提取的森林火灾回波(图 3c),从雷达资料计算得出回波面积约为 17 km²,较实际面积多,说明烟尘扩散区域较大。

此次过程说明,C 波段新一代天气雷达具有一定的森林火灾探测能力;且灵敏度较高,探测森林火灾较人工瞭望台有时有一定优势;在速度场有一些明显特征,引入速度场指标对提高森林火灾探测有一定效果。

3.2 昆明雷达个例

实况:2019 年 4 月 19 日 16:39,昆明市五华区西翥街道办事处龙池山庄附近发生山火,火场以西翥街道龙池山庄为界,分为南北两线,北线火线长约 500 m,南线有不连续火点 4 个。4 月 20 日 03:30 明火基本被扑灭,扑火人员仍在清理扑救剩余火点,并开辟了火场北线、西线防火隔离带。

然而,在 20 日 09:14 的雷达回波上,可看到明显的火灾烟尘回波(图 4a),在随后的每一个体扫里

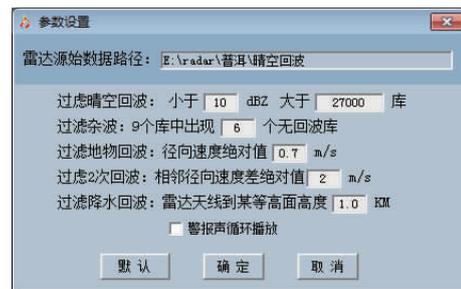


图 2 参数设置窗口

Fig. 2 Parameter setting window

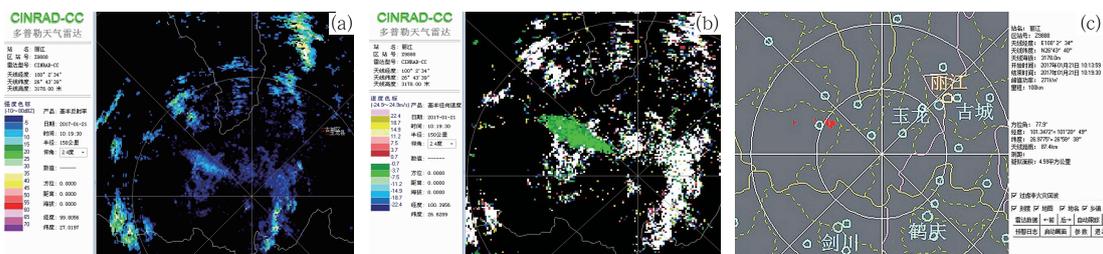


图 3 2017 年 1 月 21 日 10:19 丽江森林火灾雷达回波

(a)强度,(b)速度,(c)提取的火灾回波

Fig. 3 Radar echo map of Lijiang forest fire at 10:19 BT 21 January 2017

(a) radar echo intensity, (b) velocity, (c) fire echo extracted from the intensity diagram

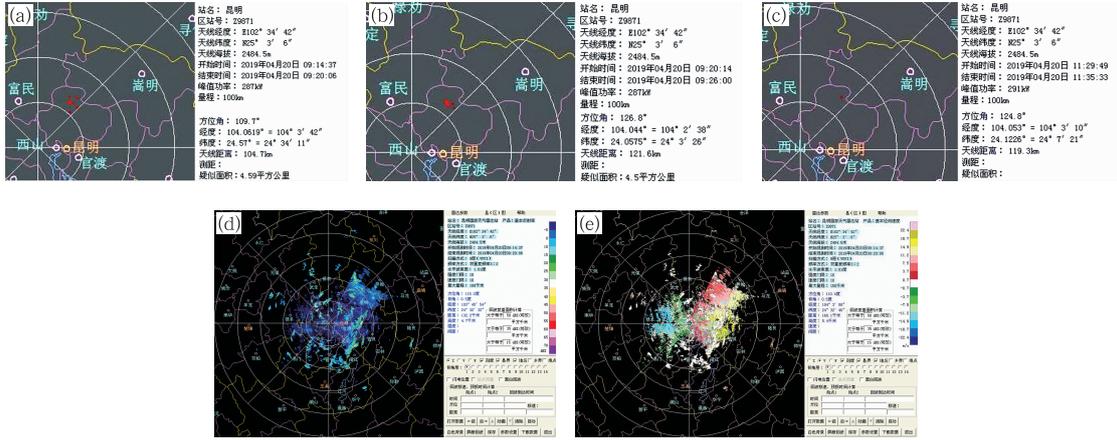


图 4 2019 年 4 月 19 日昆明五华区森林火灾扑灭后 20 日复燃的雷达回波

(a)20 日 09:14 火灾复燃,(b)20 日 09:20 火灾面积增长,(c)20 日 11:35 火灾回波逐渐减弱消失,
(d)20 日 09:14 雷达回波强度,(e)20 日 09:14 雷达回波速度

Fig. 4 Radar echo map of after forest fire put down on 19 fire resumed in Wuhua District of Kunming on 20 April 2019

(a) fire resumed at 09:14 BT 20, (b) fire area increased at 09:20 BT 20, (c) fire echo gradually weakened at 11:35 BT 20, (d) radar echo intensity at 09:14 BT 20, (e) radar echo velocity at 09:14 BT 20

面又看到更多的火灾烟尘回波(图 4b),说明森林火灾又复燃了,并且呈增长态势,及时向指挥部报告。随后进一步加强组织力量扑火,并根据火势调用直升机支援参与扑火。雷达比较及时发现了复燃的迹象,随后根据空中火灾烟尘回波面积和回波顶高的变化,判断出火势的增强与减弱,较好地分析出地面火势的变化情况,对这次扑火决策有一定参考作用。在雷达回波图上也看到回波逐渐减弱,于 11:35 基本消失(图 4c),12 时明火被扑灭。19 日 16 时和 20 日 16 时的卫星火点监测对此次过程没有监测到热源点。雷达高密度的观测数据为扑救指挥决策提供了一次及时全面的参考信息,也为森林火灾的灾后调查提供一定的科学数据支持。

此次个例说明,雷达较好地监测到了林火的复燃,为决策提供了帮助,较卫星、人工视频监测在这次个例中有一定优势,且在近地面风较小时,能够根据空中火灾烟尘回波面积粗略判断出地面火势的增强与减弱等变化情况。

3.3 德宏雷达个例

实况:2014 年 4 月 12 日 12:44,云南省保山市隆阳区永昌街道办事处呢喃山发现一起森林火灾。过火面积约为 71 000 m²,火场风力大且风向多变,现场扑救人数达 5 000 多人,直升机参与扑救。火

灾于 4 月 15 日被扑灭。

利用德宏雷达的回波资料对该过程进行回报检验,4 月 12 日 08:19 的雷达回波图就已发现点状火灾回波(图 5a),且面积不小,软件启动了报警,这比报道发现森林火灾提前了约 4 h。同时,从 08:19 一直到 11:10 的每一次体扫(图 5b),德宏雷达均观测到了这次火灾的回波。人工视频在 12 时才发现火灾,这可能是由于林火发生在人迹少至的高山林中,加之山地遮挡,人工视频存在盲区,难以及时发现。

这次监测过程说明雷达监测存在更少的遮挡盲区,较人工视频现场监测在时间和空间上有优势,也有可能提前发现森林火灾,且监测距离也有一定优势。在其他几次个例也存在类似情况。

3.4 其他个例统计

分析近年的多个森林火灾个例,利用雷达资料进行回报检验(表 1),又提炼分析出一些其他指标。从表 1 中个例 1、2、3 看出:有时雷达较目前现有方式确实能提前预警;雷达预警位置通常随风向在下风向出现;通常在上午风速较小时,雷达预警效果较好,这可能是下午风大,树叶等杂物被吹上空中,在雷达监测区域内产生较强回波,常造成误报警;速度场的变化特征可能是由于火灾烟尘的升腾作用,使火灾回波较周围的大气中颗粒物的形成速度差异,

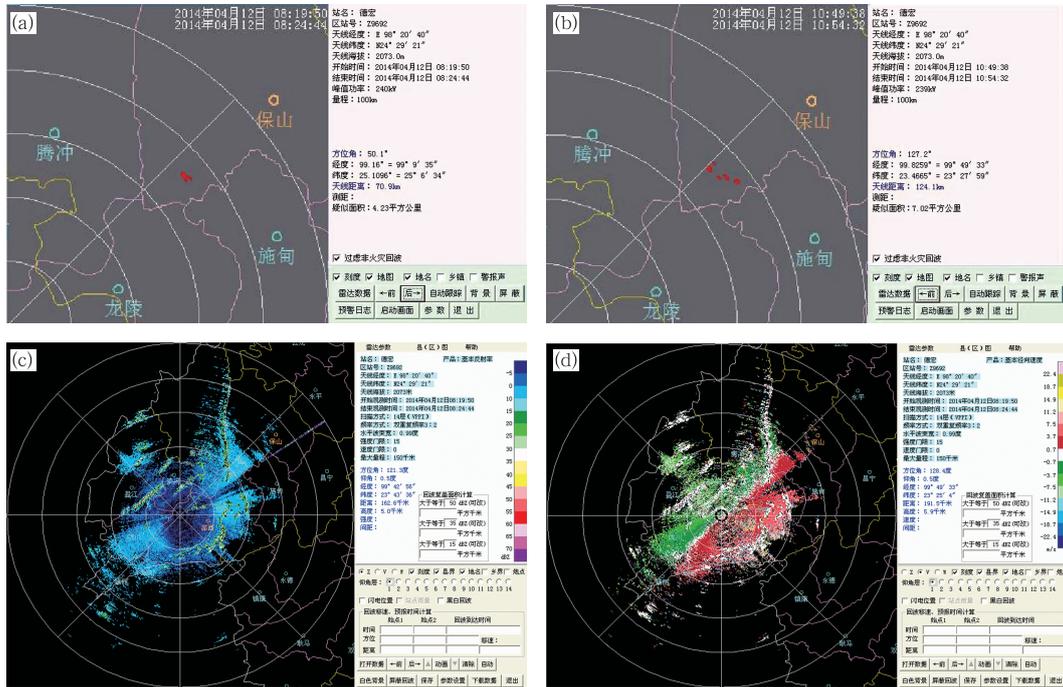


图 5 2014 年 4 月 12 日保山市隆阳区森林火灾雷达回波

(a)08:19 火灾回波,(b)10:54 火灾回波,

(c)08:19 雷达回波强度,(d)08:19 雷达回波速度

Fig. 5 Radar echo map of forest fire in Longyang District of Baoshan City on 12 April 2014

(a) fire echo at 08:19 BT, (b) fire echo at 10:54 BT,

(c) radar echo intensity at 08:19 BT, (d) radar echo velocity at 08:19 BT

表 1 火点资料个例和雷达预警的体扫资料对比

Table 1 Individual cases of fire data and body scan data of radar

序号	地点	经纬度	林业部门提供的起火时间/BT	雷达预警起始体扫时间/年月日时.分	预警时差
1	玉溪市澄江县梁王山林场鹿子箐	24°51'8"N, 102°56'16"E	2016 年 3 月 20 日 16:10	2016032014.08	提前预警
2	丽江石头乡利直村	26°45'44"N, 100°02'34"E	2017 年 1 月 20 日 14:40	2017012012.21	提前 2 h 20 min 预警
3	云南省保山市隆阳区永昌街道办事处	25°08'2"N, 99°09'56"E	2014 年 4 月 12 日 12:44	2014041208.24	提前预警
4	玉龙县白沙乡辖区东山脚	26°59'16"N, 100°12'20"E	2012 年 1 月 26 日 10:20	2012012610.35	迟 15 min 报警
5	昆明安宁市八街街道鸣凤村委会平地村白砂箐	24°38'6"N, 102°22'39"E	2017 年 4 月 11 日 13:31	2017041114.11	迟 41 min 报警
6	昆明嵩阳镇凤凰山公墓	25°22'16"N, 103°03'18"E	2016 年 3 月 17 日 12 时许	2016031713.27	迟约 1 h 报警
7	楚雄州禄丰县勤丰镇	25°05'56"N, 102°14'49"E	2013 年 4 月 23 日 11:50	2013042313.04	迟 1 h 14 min 报警
8	楚雄州禄丰县勤丰镇	25°09'31"N, 102°20'36"E	2014 年 3 月 12 日 05:50	2014031208.41	迟 2 h 50 min 报警
9	丽江市玉龙县石头乡桃花村	26°45'42"N, 100°02'31"E	2016 年 2 月 18 日 06:30	2016021812.13	迟 5 h 43 min 报警
10	丽江玉龙县黄山镇五台	26°49'44"N, 100°14'41"E	2011 年 2 月 28 日 05 时	2011022811.03	迟 6 h 报警

而导致的速度场变化差异(图 3b),这对探测森林火灾效果有一定改进;其他个例反映出在高原山地由于风的变化不均匀,给工作增加了较大难度。在西部山区,为减小地物遮挡,雷达多架设在山顶,这些高山雷达由于海拔高差各不相同,相同仰角下探测目标物高度不同,在设置识别指标时有一定的差别,应利用前期森林火灾资料进行回报检验,分别根据不同雷达设置每一部雷达相应的指标参数。

4 结 论

通过分析,C波段新一代天气雷达同样可实现对森林火灾的探测,可与卫星监测和人工视频监控等手段形成互补,为指挥扑救森林火灾提供技术支持。参考前人经验基础上,分析总结了C波段新一代天气雷达森林火灾探测的一些指标,实现了C波段新一代天气雷达的森林火灾探测,得到的初步指标方法有:

(1)由于C波段雷达的灵敏度较高,探测到的速度场变化特征可能是由于火灾烟尘回波存在上升运动,较周围的颗粒物的移动方向有一些不同,而反映出的速度场的差异变化,这一指标对探测森林火灾效果有明显改进。同时,根据空中火灾烟尘回波面积和烟尘回波顶高的变化,有时可以较好地分析出地面火势的变化情况,判断出火势的增强与减弱。

(2)在高原山地区域,高山雷达通常在上午风速较小时,其预警效果较好。对于高原地区多发小尺度对流性降水特点,降水回波过滤宜采用不同于平原地区的过滤方法,即2个体扫二次过滤方法。

(3)从时效性看雷达监测有时较卫星和人工视频监控有一定优势,有时在近地面风较小时,能够提前预警。同时,在下午风较大时误警率也较高。

(4)各高山雷达由于海拔高差各异,探测的目标物高度也不同,在设置识别指标参数时有一定的差别。应利用前期森林火灾资料进行回报检验,根据不同雷达分别设置相应的指标参数。

(5)双偏振雷达开始在我国布设运行,由于增加了特征量,特别是多了一个目标物相态,从指标提取上看双偏振雷达对森林火灾回波的探测应能有所改进。

致谢:感谢顾万龙老师对研究做的悉心指导;感谢云南省气象信息中心提供的雷达资料;感谢云南各雷达站帮助采集资料。

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[J].气象科学,30(1):121-125. Chen Y L, Cao X G, Shao L L, et al, 2010. A research on the radar echoes of a severe fire smoke in Shanghai[J]. J Meteor Sci, 30(1):121-125(in Chinese).
- 陈余兰,2011.新一代天气雷达与TWR01小天气雷达在一次强降水天气过程中的对比分析[J].气象研究与应用,32(3):39-41. Chen Y L, 2011. Comparison of new-generation weather radar and TWR01 weather radar in a heavy precipitation process[J]. J Meteor Res Appl, 32(3):39-41(in Chinese).
- 范天锡,1990.气象卫星资料在森林火灾监测中的应用[J].气象科技,(4):1-5. Fan T X, 1990. Application of meteorological satellite data in forest fire monitoring[J]. Meteor Sci Technol, (4): 1-5(in Chinese).
- 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[J].气象,33(1):3-10. Han L, Wang H Q, Tan X G, et al, 2007. Review on development of radar-based storm identification, tracking and forecasting[J]. Meteor Mon, 33(1): 3-10(in Chinese).
- 黄克慧,谷凤鸣,赵放,等,2007a.森林火灾的CINRAD-SA雷达监测[C]//中国气象学会2007年年会气象综合探测技术分会场论文集.广州:中国气象学会:234-238. Huang K H, Gu F M, Zhao F, et al, 2007a. CINRAD-SA radar monitoring of forest fires[C] // Meteor Comprehensive Detection Technology Conference of the 2007 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Guangzhou: Chinese Meteorological Society: 234-238 (in Chinese).
- 黄克慧,周功铤,谢海华,等,2007b.森林火灾的CINRAD/SA雷达监测[J].气象科学,27(S1):99-106. Huang K H, Zhou G T, Xie H H, et al, 2007b. Forest fires detected by using CINRAD/SA radar[J]. Sci Meteor Sin, 27(S1):99-106(in Chinese).
- 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[J].气象,39(2):241-248. Huang K H, Zhu J, Huang Y P, et al, 2013. Fire automatic detection system based on Doppler weather radar[J]. Meteor Mon, 39(2):241-248(in Chinese).
- 黄琴,魏鸣,胡汉峰,等,2018.晴空回波的大气风温湿结构及双偏振雷达参量分析[J].气象,44(4):526-537. Huang Q, Wei M, Hu H F, et al, 2018. Analysis of atmospheric wind, temperature and humidity structure and dual-polarization radar parameters of clear air echo[J]. Meteor Mon, 44(4):526-537(in Chinese).
- 景号然,谢晓琳,郑伟,等,2019.基于SRTM数据的天气雷达探测环境分析研究[J].气象,45(6):871-876. Jing H R, Xie X L, Zheng W, et al, 2019. Research on weather radar environment detection based on SRTM elevation data[J]. Meteor Mon, 45(6):871-876 (in Chinese).
- 李晓敏,周筠娟,肖辉,等,2017.基于X波段双偏振雷达对雷暴单体中水成物粒子演变特征的研究[J].大气科学,41(6):1246-1263. Li X M, Zhou Y J, Xiao H, et al, 2017. Research on the evolution characteristics of hydrometeors in a thunderstorm cell

- with X-band dual-polarimetric radar[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(6):1246-1263(in Chinese).
- 梅焱,胡志群,黄兴友,等,2018. 青藏高原对流云的偏振雷达观测研究[J]. *气象学报*, 76(6):1014-1028. Mei Y, Hu Z Q, Huang X Y, et al, 2018. A study of convective clouds in the Tibetan Plateau based on dual polarimetric radar observations[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(6):1014-1028(in Chinese).
- 于明慧,刘黎平,吴翀,等,2019. 利用相控阵及双偏振雷达对2016年6月3日华南一次强对流过程的分析[J]. *气象*, 45(3):330-344. Yu M H, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased-array and dual-polarization radar[J]. *Meteor Mon*, 45(3):330-344(in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社:220-229. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. *Doppler Weather Radar Principle and Business Application*[M]. Beijing: China Meteorological Press: 220-229(in Chinese).
- 张林,杨洪平,2018. S波段WSR-88D双偏振雷达观测非降水回波识别方法研究[J]. *气象*, 44(5):665-675. Zhang L, Yang H P, 2018. Non-precipitation identification technique on S-band WSR-88D polarization weather radar[J]. *Meteor Mon*, 44(5):665-675(in Chinese).
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2001. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社:334-352. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2001. *Radar Meteorology*[M]. Beijing: China Meteorological Press: 334-352(in Chinese).
- 张深寿,魏鸣,赖巧珍,2017. 两次火情的新一代天气雷达回波特征分析[J]. *气象科学*, 37(3):359-367. Zhang S S, Wei M, Lai Q Z, 2017. Analysis of CINRAD echo characteristics about two fires[J]. *J Meteor Sci*, 37(3):359-367(in Chinese).
- 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[J]. *气象*, 38(6):722-727. Zhong M, Wu C H, Wang S S, et al, 2012. The performance evaluation of the two identification and tracking products of CINRAD/SA radar[J]. *Meteor Mon*, 38(6):722-727(in Chinese).
- 朱丹,谷军霞,师春香,等,2018. 新一代天气雷达布网设计的有效覆盖和地形遮挡分析[J]. *气象*, 44(11):1434-1444. Zhu D, Gu J X, Shi C X, et al, 2018. Analysis of effective coverage and terrain blockage for next generation radar network design[J]. *Meteor Mon*, 44(11):1434-1444(in Chinese).