

激光云高仪和毫米波云雷达协同测量云底高技术的融合算法研究^①

张 墅^②

(江苏信息职业技术学院电子信息工程学院 无锡 214061)

摘 要 基于多设备协同测云技术,围绕对云底高的协同观测而开展,依据 2015 年 1 月 1 日至 2015 年 5 月 31 日中国气象局气象大气探测试验基地 HY-CL51 激光云高仪和 Ka 波段毫米波云雷达的观测数据进行研究,提出了基于激光云高仪和毫米波云雷达协同测量云底高技术的融合算法。通过 3 种输出数据对比研究发现,融合后的数据相比于单独的激光云高仪或毫米波云雷达数据,输出的最终云底高数据准确度较高,同时提高了毫米波云雷达低云区数据获取率,改善了激光云高仪受能见度影响测量精度低的问题,一定程度上解决了缺测的状况,具有一定的应用价值。

关键词 毫米波云雷达;激光云高仪;云底高;协同观测

0 引 言

随着天气雷达的发展,天气预报分析所用的地面云观测从人工观测为主转变到以天气雷达观测为主。地面云观测在气象综合观测中能够提供云的垂直分布信息,与气象卫星构成完整的云观测体系,从而解决目前自动化云观测中信息缺乏的问题。目前,气象业务中地面自动化观测网络使用的主要设备是激光云高仪^[1]。激光云高仪是利用激光技术测量云底高度的一种主动式大气遥感设备。在云体密实条件下,激光云高仪测量云底高度准确性较高,云底高分辨率可达 5 m。但是由于云层对激光能量衰减很强,激光云高仪发射的激光在到达云底时产生很强的后向散射,一般很难穿透整个云层。我国在云自动观测领域做出了很多创新性工作,目前全固态 Ka 波段毫米波测云技术因其极大改善外场试验中云的探测结果,对云物理特征的研究、人工影响天气和大气辐射测量实验等方面都有积极的意义^[2],已成为了地面云观测系统中广泛应用的技术,它具有较高的多普勒速度分辨率和空间分辨率,

但是对近地面光学薄云的探测能力并不稳定。

天气预报是一个庞大的系统工程,以大气科学理论为依据,以各种气象探测设备为基础,以数值天气预报为核心,依靠预报人员的综合判断分析,最终形成预报结果。不同的观测设备需要观测云厚、云高、云量等多种参数量^[3],为气象预测提供数值依据,其中云的高度信息是各气象业务所必需的。本文提出了一种基于激光云高仪和毫米波云雷达协同测量云底高技术的融合算法,围绕对云高的协同观测而开展研究,主要针对毫米波云雷达与激光云高仪的观测能见度和云高观测准确度进行评价分析,通过兼顾两种测云设备的相关性和匹配性,提出了一种较为精确的气象预测数据算法,同时修正了毫米波云雷达低云测量不准确的缺点,改进了激光云高仪测量精度受能见度影响的问题。算法的输出数据不受雾霾、降水等衰减的影响,数据完整性较高。

1 观测资料获取及相关性分析

本文所依据的标准观测资料为中国气象局气象

① 江苏省高校教师企业实践项目(2019QYSJXP157),江苏省专用集成电路设计重点实验室开放基金(2020KL0P008)和江苏省高等职业院校高水平骨干专业建设(2017116)资助项目。
② 女,1983 年生,硕士,讲师;研究方向:气象雷达;E-mail: zhangshu420@qq. com
(收稿日期:2020-03-10)

大气探测试验基地的 HY-CL51 激光云高仪和 Ka 波段毫米波云雷达在 2015 年 1 月 1 日至 2015 年 5 月 31 日中连续观测(过年期间除外)的 138 d 探测数据。数据对比分析期间共有云样本数 1188 个,其中激光云高仪获取有效样本总量为 895 个,毫米波云雷达获取到有效云样本数为 1000 个,两台设备实际放置位置相距不超过 64 m,观测数据时间分辨率都为 60 s,认为这两种设备观测的是同一块云参数。本研究从云高仪与云雷达探测云的性能入手,从能见度、数据获取状况以及可靠性等方面综合探讨两种设备可进行协同观测和数据融合的基础前提。

毫米波云雷达和激光云高仪都可以探测云底高度,但两者工作原理和性能有所不同。激光云高仪是利用激光器对准云底发射脉冲光束,接收来自云底对激光产生的后向散射。根据从发射激光脉冲到接收到回波信号所经过的时间和激光束的仰角,计算出云底高度^[4]。毫米波云雷达采用真空器件发射技术,以不同毫米波波段为发射源,间歇性地向空中发射电磁波(脉冲),然后接收云目标散射回来的电磁波(回波),利用回波信息反演计算得到云信息。毫米波云雷达原始的数据是雷达探测回波的功率谱值,激光云高仪原始的数据是粒子对电磁波产生的后向散射光的强度值^[5],通过处理得到的原始数据,对云层的底部高度、顶部高度以及厚度进行分析,便可得到云参数。

针对激光云高仪和毫米波云雷达探测到的云数据进行散点图统计,研究比较这两台测云设备对云底高的测试差异。图 1 中的实线为对样本点进行拟合后得到的直线,通过拟合函数公式 $y = 0.9422x + 96.407$ 可以看出,当毫米波云雷达和激光云高仪都观测到天空有云的时候,两者观测到的云底高度有

较好的一致性,只有少数样本数据不匹配^[6],主要由于毫米波云雷达没有测到低云,而激光云高仪测到了低厚云,但激光在到达云底时就产生很强的后向散射在低云中衰减很大而没有测到高云。两种探测设备观测的云底高度相关系数为 $R = 93.48\%$,匹配性较高,可以进行算法融合。

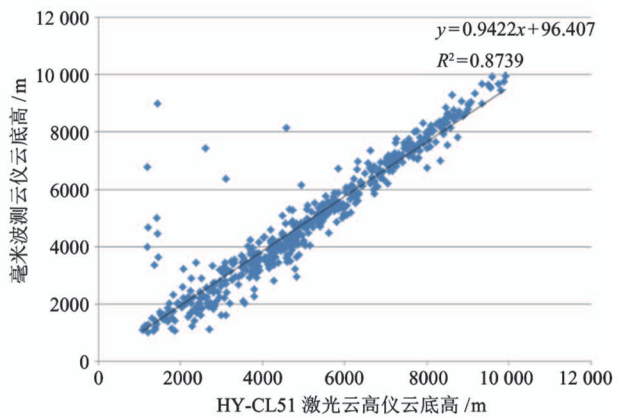


图 1 激光云高仪与毫米波云雷达有云样本散点图

2 融合算法分析

2.1 能见度条件分析

激光云高仪检测到的有效样本数量为 895 个;毫米波云雷达获取到有效云样本数为 1000 个,缺测样本数 135 个,有云样本数为 1053 个,毫米波云雷达的缺测样本比率高达 12.8%,相对激光云高仪较高。分析两台设备在能见度小于 1 km 情况下有云样本数为 31 个,能见度在 1 ~ 5 km 之间有云样本数为 405 个,能见度在 5 ~ 10 km 之间有云样本数为 312 个,能见度在 10 km 以上有云样本数为 440 个。统计发现,两台测云设备在不同能见度条件下数据获取率如表 1 所示。

表 1 能见度条件下数据获取能力对比

名称	总数据获取率	能见度 < 1 km	能见度 1 ~ 5 km	能见度 5 ~ 10 km	能见度 > 10 km
HY-CL51 激光云高仪	75.3%	38.7%	69.6%	72.8%	85.0%
Ka 波段毫米波云雷达	95.0%	96.7%	94.1%	97.1%	94.1%

分析数据可以发现,毫米波云雷达整体数据获取率较高且受能见度条件的影响较小。在低能见度

条件下,激光云高仪相比于毫米波云雷达整体数据获取率明显偏低,究其原因是低能见度时一般伴有

雾、霾天气,空气中存在大量水汽和气溶胶颗粒,对激光能量有很强的衰减作用^[7],导致激光很少或无法穿透近地雾霾层到达云层,而随着能见度增大,激光云高仪数据获取能力有所改善^[8],在能见度 > 10 km时达到最大值,说明激光云高仪数据获取能力受能见度影响较大。

2.2 云高条件对比

针对毫米波云雷达和激光云高仪捕捉云的能力进行比对研究,选取 2015 年 2 月 1 日至 2015 年 5 月 31 日(过年期间除外)近 4 个月的数据,毫米波云雷达探测到有云信息的时间为 25 578 min,激光云高仪探测到有云信息的时间为 19 052 min,两种

设备都探测到有云的时间为 13 129 min。所以,毫米波云雷达的总数据获取率为 81.1%,激光云高仪的总数据获取率为 60.5%,云雷达的总数据获取率要比激光云高仪的总数据获取率高 20.6%。由表 2 可知,在探测高云的能力方面,毫米波云雷达对数据的获取率大于激光云高仪对数据的获取率。对于中云的探测,毫米波云雷达和激光云高仪的探测能力相当,云雷达的数据获取率比云高仪的数据获取率略高。对于低云的探测,激光云高仪对数据的获取率明显比毫米波云雷达对数据的获取率高^[9],因此需要结合激光云高仪来综合确定实际中低层云的云底高度。

表 2 不同云高的数据获取率情况

云类型	云雷达探测到有云时间/min	云高仪探测到有云时间/min	两种设备都探测到有云时间/min	云雷达数据获取率/%	云高仪数据获取率/%
低云	718	1089	698	64.2	95.7
中云	8335	7425	5062	73.6	70.3
高云	16 525	10 538	7369	83.5	53.6

2.3 本文算法分析

由于两种设备受能见度的影响不同,对低层云的获取能力差异较大,同时缺测样本比率差异也较大。考虑将这两种不同原理的测云设备围绕云底高观测进行协同融合,主要依据对不同云层高度、能见度条件下的数据获取准确率结合当时云量、天气现象、云类等信息进行综合分析,同时考虑通过选用 BP 神经网络算法来实现训练样本的最大限度逼近。这种应用最广泛的算法是一种有监督学习的多层前馈式误差反向传播神经网络,通过对大量有代表性的样本进行学习训练^[10],能最大限度地逼近并掌握研究系统的本质特性,具有很强自组织、自适应能力,且结构简单、可操作性强,能够模拟任意的非线性输入输出关系。算法通过执行权向量空间误差函数梯度下降策略,动态地迭代搜索一组权向量,最终使网络误差函数达到最小值,这样完成对样本信息的提取和记忆,形成具有最大限度逼近训练样本的网络模型^[11]。融合算法主要包括以下几个步骤。

首先,针对能见度进行条件筛选,对数据进行预处理。由于激光容易因雾、霾和气溶胶粒子衰减,在

能见度低的情况下无法穿透近地面的雾霾层,影响云探测数据的获取,而毫米波云雷达在雾霾天气中探测能力基本不受能见度高低的影响,因此考虑以能见度 $\geq r_0$ 为依据进行条件筛选(本文取 $r_0 = 10$ km)。当能见度较高时,考虑在低层云区域采用激光云高仪数据以提高数据获取的准确率。

其次,针对设备的漏测点,考虑用近似估算法来建立数据模型,毫米波云雷达和激光云高仪的时间分辨率均为 1 min。设毫米波云雷达任意连续时刻中的缺测值为 i ,选取距离它最近的左右各 3 个点依次分别为 $i-3$ 、 $i-2$ 、 $i-1$ 、 $i+1$ 、 $i+2$ 、 $i+3$,利用神经网络对样本数据与算法补充的缺测样本数据进行训练^[12]。经过适当训练后,神经网络对所有样本数据进行归纳总结,得到断点 i 的近似估算关系,以此提高模型中数据获取率,对缺测样本问题提出了简单的解决办法^[13]。

然后,针对云层高度条件筛选。由于毫米波云雷达在观测低层云时数据获取率低于激光云高仪。在判断云底位置时,从第一个距离库开始,自下而上依次判断。如果从某个库开始,连续 5 个库均有信

号,则认为这个库对应云底位置。以云底位置 $\leq L_0$ 为前提进行数据条件筛选(本实验中 L_0 取值为2800 m,即中低云层高度),将数据送入神经网络算法进行训练。建立能同时满足能见度 $\geq r_0$ 和云底高 $\leq L_0$ 双重条件参数的神经网络,经过适当训练,神经网络对所有样本数据进行归纳总结,形成函数关系网络。

最后,将预处理完成的激光云高仪和毫米波云雷达数据样本作为输入,对已初始化的神经网络进行训练,待两种设备的实时数据输入已建立的神经网络,同时符合能见度 $\geq r_0$ 和云底高 $\leq L_0$ 双重条件,以该时刻激光云高仪的测试数据作为输出;不符合条件,则将毫米波测云雷达的测试数据(或对应时刻该设备的断点近似估算值)作为输出数据,由此反演出每个分辨单元对应的云底高度,最终实现云底高的最优输出^[14]。

3 实验结果

选取2015年4月1日10:00–15:00中国气象局气象大气探测试验基地的HY-CL51激光云高仪和Ka波段毫米波云雷达的探测数据,建立初始化的神经网络进行训练,得到对应能见度和云底高的函数网络关系;将同日18:00–19:45的数据资料进行预处理,使其符合神经网络的输入输出格式,通过训练反演得到对应的云底高信息。

由毫米波云雷达反射率(图2)可知,4月1日17:15–18:00云层较低,无法准确获得云底高度,

18:00–19:45的其他时刻两种设备的云底高观测数据均能探测到。通过神经网络模型进行数据估算,获取了17:15的近似估算值为456.7 m,如图3所示。同时在17:15–18:00相应的时间段中有50个缺测点也通过估算得到了对应的近似值。以每一分钟的值为单位量,仍然有20个点的值小于0.1,神经网络算法的设置中数据精确到小数点后两位,故该20个点取值为0。通过图3可以发现,神经网络的建立将原本一大段的缺测点进行了改善,毫米波云雷达数据的获取率提升了近38%。

以19:00时刻为例,从气象局观测数据资料中可知激光云高仪与毫米波云雷达的云底高分别是2800 m与1852 m,无漏测。当天19:00时的能见度大于10 km,相对湿度较小。由图4可知,该算法在能见度 ≥ 10 km和云底高 ≤ 2800 m的条件下以激光云高仪的观测数据2800 m作为输出。该日19:00探空数据云底高度2441 m与激光云高仪更为接近,激光云高仪较毫米波云雷达更为准确,算法数据输出准确。

19:15时,从气象局观测数据资料中可知激光云高仪与毫米波云雷达的云底高分别是2910 m与1785 m,无漏测,能见度大于10 km,激光云高仪云底高与探空云底高接近,但从云观测(图5(a))中发现云底高分布线下方水汽带明显,判定激光云高仪探测的云底偏高。从温湿度廓线(图5(b))中发现云底约为2500 m,判定毫米波云雷达探测数据相对准确^[15]。由图4可知,该算法在能见度 ≥ 10 km和云底高 ≤ 2800 m的条件下未能满足要求,所以选择

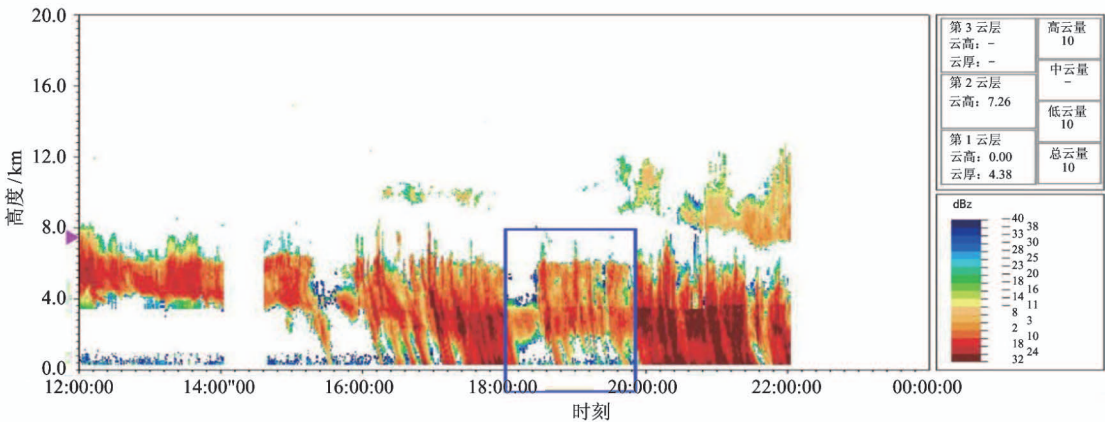


图2 2015年4月1日18:00–19:45毫米波云雷达反射率图

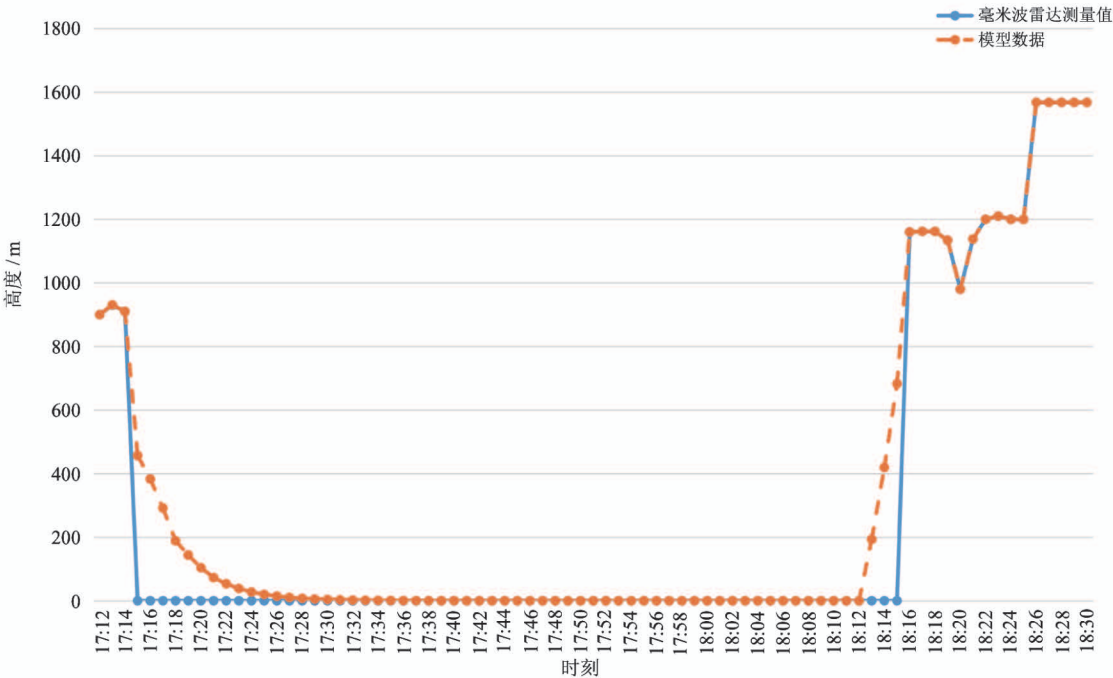


图3 2015年4月1日17:12-18:30云底高数据对比图

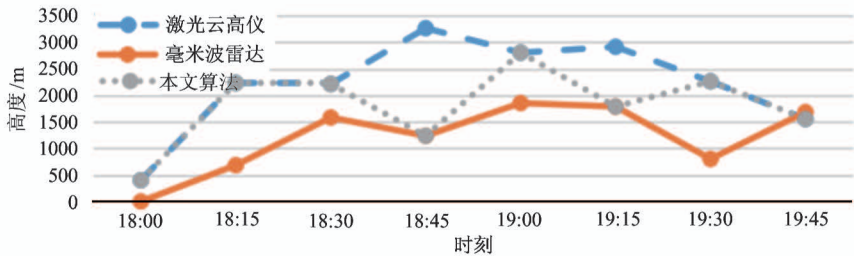


图4 2015年4月1日18:00-19:45三种输出云底高数据

毫米波云雷达的观测数据 1785 m 作为输出,算法输出准确。

2015 年 1 月 18 日地面自动站测定空气的相对湿度在 40% 以下,7:16 时能见度为 2314 m,激光云高仪与毫米波云雷达的云底高分别是 2780 m 和 1950 m,但激光云高仪云高演变(图 5(c))中云底下均有明显的水汽带,说明激光探测的云底偏高,毫米波云雷达探测数据可信度更高。由本文算法可得,该时刻输出条件未能同时满足能见度 ≥ 10 km 和云底高 ≤ 2800 m 双重要求,因此以毫米波雷达的观测数据作为输出,算法输出选择正确。

4 结 论

本文提出了基于激光云高仪和毫米波云雷达协

同测量云底高技术的融合算法,围绕观测能见度和云底高,兼顾两种测云雷达的相关性和匹配性,得出结论如下。

毫米波云雷达在低云区观测时非云回波严重,准确率较低。融合算法以同时满足高能见度和低层云为前提,通过算法筛选修正了毫米波云雷达低云测量不准确的问题,利用激光云高仪对低云测量的高精度优点,改进了毫米波云雷达低云区数据获取率低的状况。

低能见度条件下,激光云高仪在数据获取方面易受低能见度影响,随着能见度降低数据获取能力变差,而毫米波云雷达数据获取率与能见度关系不大。算法通过条件筛选改进了激光云高仪受能见度影响测量精度的问题,使输出结果准确率提高。

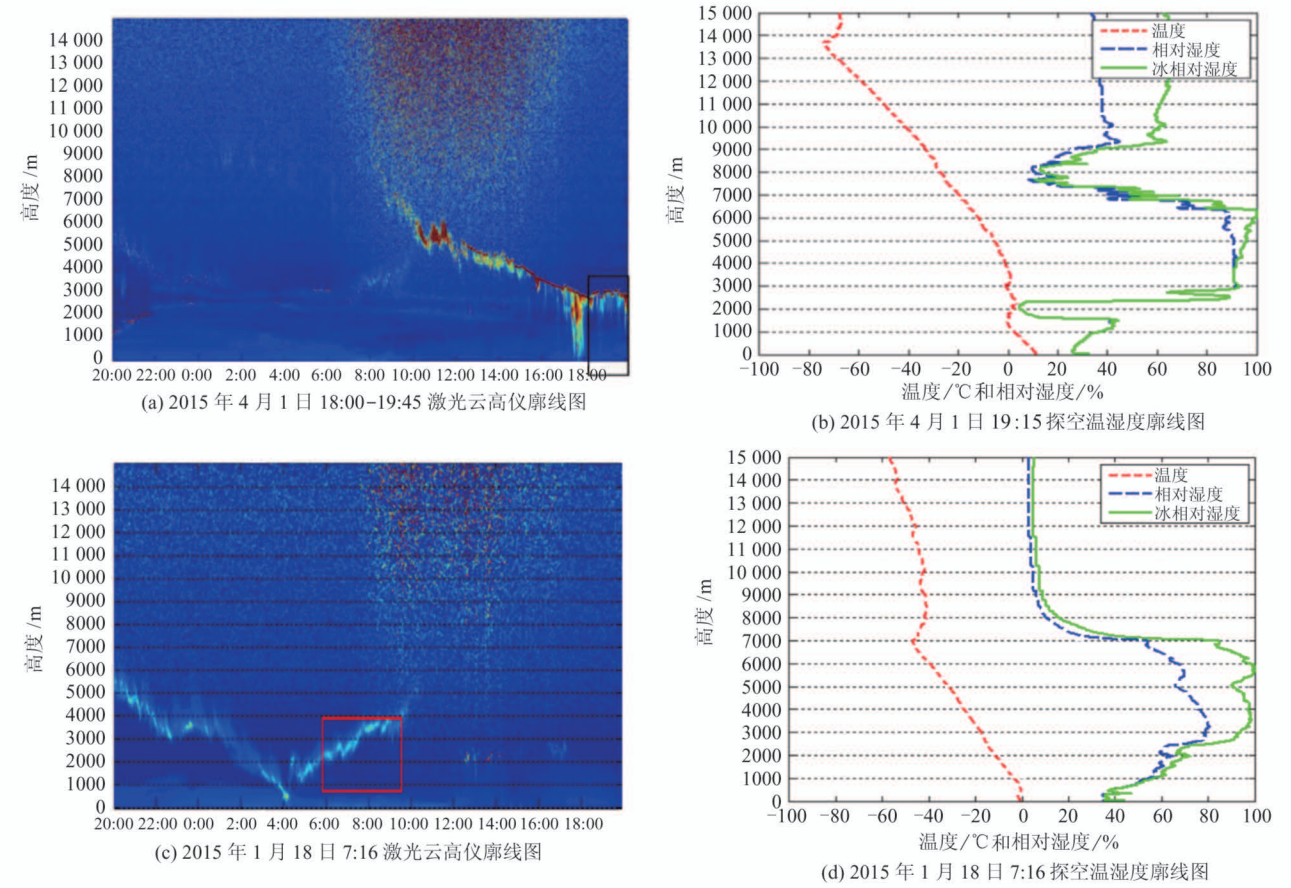


图 5 不同时段云观测对比图

针对毫米波云雷达的个别缺测现象,通过用近似估算法来建立模型数据,利用神经网络对样本数据与缺测补充的样本数据进行训练,使设备有合理的输出值,同时也提升了设备的数据获取率,缓解了缺测现象的影响。

综上所述,提出的协同测量云底高技术的融合算法,能将相关系数为 93.48% 的中国气象局气象大气探测试验基地的 HY-CL51 激光云高仪和 Ka 波段毫米波云雷达的观测数据进行算法融合,改进了毫米波雷达低云获取准确度低、激光云高仪低能见度下数据测量错误较多的不足,同时通过近似估算法在一定程度上弥补缺测数据样本,能够为气象预测提供较为准确的数据,具有一定的应用价值。但是对于云顶高和多层云的测量还有待研究。

参考文献

[1] 马宁望, 刘黎平, 郑佳锋. 利用 Ka 波段毫米波雷达功率谱反演云降水大气垂直速度和雨滴谱分布研究

[J]. 高原气象, 2019, 28(2):325-339

[2] 乔晓燕, 李栋, 尹佳莉. 毫米波云雷达与 CL51 激光云高仪测云差异研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2019, 36(2):15-18

[3] 黄兴友, 张帅, 李盈盈, 等. 云参数的两种地基雷达反演方法对比研究[J]. 气象科学, 2019, 39(5):608-616

[4] 郭志刚. Ka 波段毫米波测云雷达在航空气象观测中的应用[J]. 民航管理, 2019(8):62-67

[5] 王云. 毫米波云雷达晴空回波的特征研究[D]. 成都: 成都信息工程大学电子工程学院, 2018:20-45

[6] 姚志刚, 杨超, 赵增亮, 等. 毫米波雷达反演层状云液态水路径研究[J]. 高原气象, 2018, 37(1):223-233

[7] 王柳柳, 刘黎平, 余继周, 等. 毫米波云雷达冻雨-降雪微物理和动力特征分析[J]. 气象, 2017, 43(12):1473-1486

[8] 郑佳锋. Ka 波段-多模式毫米波雷达功率谱数据处理方法及云内大气垂直速度反演研究[D]. 北京: 中国

气象科学研究院, 2016:29-50

- [9] 赵静, 曹晓钟, 代桃高, 等. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J]. 气象, 2017, 43(1):101-107
- [10] 张永涛, 贾延明. 最小二乘法中代数多项式曲线拟合的分析及实现[J]. 计算机与数字工程, 2017, 54(4):637-639
- [11] 李勇, 高仲辉, 黄兴玉. 机载测云雷达探测模式分析[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(2):121-126
- [12] 唐英杰. 毫米波云雷达的数据分析及其探测能力改善的研究[D]. 成都:成都信息工程大学电子工程学院, 2016:17-26
- [13] Shangguan M, Xia H Y, Wang C, et al. All-fiber upcon-

version high spectral resolution wind lidar using a Fabry-Perot interferometer[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17):19322-19336

- [14] Lange D, Rocadenbosch F, Tiana-Alsina J, et al. Atmospheric boundary layer height estimation using a Kalman-filter and a frequency-modulated continuous-wave radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(6):3338-3349
- [15] 唐英杰, 马舒庆, 杨玲, 等. 云底高度的地基毫米波云雷达观测及其对比[J]. 应用气象学报, 2015, 26(6):680-687

Research on fusion algorithm of laser ceilometer and millimeter-wave cloud radar collaborative measurement of cloud base height

Zhang Shu

(School of Electronic Information Engineering, Jiangsu Vocational College of Information Technology, Wuxi 214061)

Abstract

This research is based on multi-device coordinated cloud measurement technology, which focuses on the coordinated observation of cloud base height. It is mainly based on the data observed by HY-CL51 laser ceilometer and Ka-band millimeter-wave cloud radar from the China Meteorological Administration's Meteorological and Atmospheric Detection Center (from January 1 to May 31, 2015). A fusion algorithm based on laser ceilometer and millimeter-wave cloud radar co-measurement of cloud base height is proposed. The research indicates that the fused data output has good accuracy of cloud base height than the data under single device. The proposed algorithm improves the data acquisition rate of the lower cloud area of the millimeter-wave cloud radar, and it also improves the measurement accuracy of laser ceilometer affected by visibility. And, it improves the situation of lack of testing and has great application value.

Key words: millimeter-wave cloud radar, laser ceilometer, cloud base height, collaborative observation