

张婷,胡树贞,陶法,等,2024.地基云雷达与 FY-4A 卫星云顶高度联合反演方法[J].气象,50(7):859-867. Zhang T, Hu S Z, Tao F, et al, 2024. Joint inversion of cloud top height based on ground-based millimeter-wave cloud radar and FY-4A satellite [J]. Meteor Mon, 50(7):859-867 (in Chinese).

地基云雷达与 FY-4A 卫星云顶高度联合反演方法*

张 婷¹ 胡树贞² 陶 法² 赵培涛² 刘文忠¹ 马 婷¹ 印佳楠¹

1 河北省气象技术装备中心, 石家庄 050000

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

提 要: 基于地基毫米波云雷达与 FY-4A 卫星对云顶同步观测的特点, 分析云雷达垂直顶空观测的云顶高度与 FY-4A 卫星 AGRI 载荷通道数据之间关系, 提出了地基云雷达与 FY-4A 卫星云顶高度联合反演方法, 实现云雷达安装点周边区域卫星云顶高度的融合反演, 并对反演结果进行验证分析。结果表明, AGRI 载荷的第 11~14 通道值与云雷达观测云顶高度呈线性相关, 且卫星通道值与云雷达观测云顶高度比值呈现冬季最小、春秋季次之、夏季最大的季节性变化特点; 星地融合反演云顶高度与云雷达观测云顶高度相关系数 0.84, 融合后比融合前均方根误差减小了 0.7 km, 提高了卫星云顶高度的反演精度。

关键词: 云, 云顶高度, FY-4A, 毫米波云雷达, 数据融合

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.042601

Joint Inversion of Cloud Top Height Based on Ground-Based Millimeter-Wave Cloud Radar and FY-4A Satellite

ZHANG Ting¹ HU Shuzhen² TAO Fa² ZHAO Peitao² LIU Wenzhong¹ MA Ting¹ YIN Jianan¹

1 Hebei Province Meteorological Technology and Equipment Center, Shijiazhuang 050000

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the characteristics of simultaneous observation of cloud tops by ground-based millimeter-wave cloud radar and FY-4A satellite, the relationship between cloud top height observed by cloud radar and AGRI load channel data of FY-4A satellite is analyzed, and a joint retrieving method of cloud top height based on cloud radar and FY-4A satellite is proposed. The cloud top height of the satellite in an area around the installation point of the cloud radar is retrieved, and the retrieval results are verified and analyzed. The results show that the 11–14 channel values of FY-4A satellite are linearly correlated to the cloud top height of cloud radar. Moreover, the ratio of FY-4A satellite channel values to cloud top height observed by cloud radar shows the seasonal characteristics of minimum in winter, followed by spring and autumn, and maximum in summer. The correlation coefficient between cloud top height obtained from satellite-ground fusion inversion and cloud top height measured by cloud radar is 0.84, and the root-mean-square error is reduced by 0.7 km after fusion, which improves the inversion accuracy of satellite cloud top height.

Key words: cloud, cloud top height, FY-4A, millimeter-wave cloud radar, data fusion

* 中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J062, CXFZ2024J057)共同资助

2023 年 2 月 8 日收稿; 2024 年 1 月 15 日收修定稿

第一作者: 张婷, 主要从事地基遥感垂直资料分析及应用研究. E-mail: stereo126@163.com

通讯作者: 胡树贞, 主要从事毫米波雷达资料分析及应用研究. E-mail: 052310421hu@163.com

引 言

云覆盖地球表面一半以上的面积,是地球大气辐射收支平衡的主要调节者(Cess et al,1989;胡树贞等,2013)。在天气分析中,云观测资料主要用于明确天气状况,判别天气系统类型、覆盖范围、移动和强弱,分析大气层结稳定度(胡树贞等,2017;2020a)。其中,云顶高度等参数可以用于诊断天气系统和对流发展的强度,在天气分析、数值预报及航空气象等方面都具有重要的价值(Chahine,1974;吕达仁等,2003;陈渭民,2003)。地球辐射平衡试验(ERBE)给出了云对全球辐射加热影响最新可靠资料(Gao and Weng,1999;马晓燕和季国良,2000),与晴空相比,云靠吸收和辐射通量影响大气温度,当云顶的放射辐射超过了吸收辐射将导致云顶温度降低,同时云下大气及地表温度较高使云底被加热,云顶的冷却加上云底的增暖可产生不稳定对流,造成空气的湍流和卷挟运动(Slingo 和毛光伶,1990;汪方和丁一汇,2005)。因此研究云的物理特征参数,揭示其在地气系统辐射收支中的影响,对于提升天气预报精度和研究气候变化具有十分重要的意义。

云观测资料的获取,一种途径是通过卫星的大面积遥感观测(范思睿和王维佳,2018;徐小红等,2018),特别是静止轨道气象卫星与地球之间相对位置固定,能够实现对地同一区域持续观测。静止轨道气象卫星根据云的红外辐射与温度相关(丁伟钰等,2023;史小康等,2023),而温度又与高度相关的原理,在卫星红外云图的基础上反演得到云顶温度和高度。但由于卫星观测数据受地球的大气、地表、太阳方位角以及星上仪器工作状态等多种因素影响,另外云的红外辐射能量与云体疏密程度、云顶高度、云体厚度等因素有关,卫星反演的云顶高度有时误差较大(孙跃等,2021;Liu et al,2021;谭仲辉等,2019)。地基云的单点观测是获取云资料的另外一种途径,设备有激光云高仪、毫米波云雷达等,对这些设备的测云能力,国内外进行了一些评估与对比分析,并在气象业务中开展了实际应用(丁虹鑫等,2018;李思腾等,2015;赵静等,2017)。其中,毫米波云雷达工作在 Ka(35 GHz)或 W(94 GHz)波段,利用水凝物对毫米波的散射特性获取云、雨、雾等气象目标的回波强度、径向速度、速度谱宽等信息(张静

怡等,2022;胡树贞等,2020b;岑炬辉等,2021),能够穿透较厚云层,获取云顶高度及云厚度。但地基遥感测云存在“点”产品多,“面”产品少,垂直产品单一,限制了综合观测效益的发挥。

本文基于 Ka 波段云雷达与 FY-4A 气象卫星对云顶同步观测的特点,分析云雷达观测云顶高度与卫星对应像元多通道扫描成像辐射计(AGRI)通道数据之间关系,利用地基云观测精度高和卫星云观测面积大的特点,提出了基于云雷达实时标校的 FY-4A 卫星云顶高度反演方法,实现星地云顶高度融合反演,并对反演结果进行验证分析。

1 观测资料和数据处理

1.1 观测资料

地基云雷达观测资料源自北京地区安装的 7 部 YLU1 型全固态 Ka 波段云雷达,云雷达采用垂直顶空观测模式(曾正茂等,2022),利用观测谱数据,通过谱矩识别输出基数据,对云雷达初始基数据进行质量控制,区分气象回波和晴空回波。而后利用云的时空连续性,基于图像处理技术再次进行质量控制,去除孤立/噪点回波和径向干扰回波,输出质量控制后基数据。通过对含有云层信息的基数据廓线进行云体识别提取,依据云雷达反射率因子有无,在垂直方向上对云层进行检测,如上升下降沿检测,无云变有云为云底,有云变无云为云顶。并对多层云体进行合理的合并处理,最后提取每层云体的上边界作为云顶高度,云体的下边界作为云底高度,上下边界差值为云厚度。云雷达布局见图 1 所示,主要技术指标见表 1 所示。

FY-4A 气象卫星是我国继 FY-2 系列气象卫星之后发展的新一代静止轨道气象卫星,于 2016 年 12 月 11 日成功发射(崔林丽等,2020;陆风等,2017),2018 年 5 月 1 日正式业务运行。搭载的 AGRI 载荷具有 14 个光谱通道,工作流程为:来自地球景物的辐射被扫描镜反射到主光学系统,通过中继光学系统将入射辐射分裂成不同波段的通道,包括可见光通道、近红外通道和红外通道。探测器把景物辐射转换成电信号,经过前放、主放和滤波电路,在扫描同步信号的控制下,通过背景和噪声抑制,图像配准、校正等环节形成 DN(digital number)



图 1 北京地区毫米波云雷达布局示意图
Fig. 1 Layout diagram of ground-based millimeter-wave cloud radars in Beijing

表 1 毫米波云雷达系统主要技术指标
Table 1 Main technical indicators of millimeter-wave cloud radar system

部件	参数	指标
天线	直径	1.8 m
	增益	≥53 dB
	波束宽度	≤0.4°
	工作模式	垂直顶空瞄准式
发射机	工作频率	Ka(35 GHz±200 MHz)
	峰值功率	≥10 W
	脉冲宽度	1, 5, 20 μs
	脉冲重复频率	1000~8000 Hz
接收机	线性动态范围	87 dB
	噪声系数	5.3 dB
	增益	35 dB
整机系统	基数据产品	$Z \leq 1 \text{ dBz}, V \leq 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, W \leq 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	云观测产品	云底高度: ±10%、云顶高度: ±10%
	时间分辨率	1 min
	距离分辨率	30 m

值。DN 值是遥感影像像元亮度值,记录地物的灰

度值,值大小与传感器的辐射分辨率、地物发射率、大气透过率和散射率等有关。AGRI 载荷各通道特性见表 2 所示,其中第 11~14 通道为红外通道,主要用于云的观测。

目前, FY-4A 气象卫星对于云顶高度的反演,主要是将 AGRI 载荷红外通道的 DN 值经过定标转化为热辐射强度,再由 Planck 函数得到有云像元处的云顶亮温,然后根据云顶亮温与高度相关,反演得到云顶高度。FY-4A 气象卫星具有全圆盘观测和中国区域观测两种常规观测模式,具体为:每 1 h 一次全圆盘观测,时间为整点—整点过 15 min;每 3 h 进行一次连续 3 幅全圆盘观测;无全圆盘观测时每 5 min 进行一次中国区域观测(李琦等, 2021; 陆风等, 2017; 王新等, 2021)。正常情况下, FY-4A 气象卫星每日可获取 40 幅全圆盘云图(王明等, 2022)和 165 幅中国区域云图(曹广真等, 2023)。

1.2 数据处理

云雷达每分钟得到 1 组垂直顶空方向云层高度数据,根据雷达天线波束宽度,假设云雷达观测的云顶高度为 10 km 时,雷达在水平方向上的观测范围约为 70 m,相比于 FY-4A 气象卫星 4 km 分辨率可认为是单点观测,另外云雷达与 FY-4A 气象卫星的时间分辨率不一样。因此,星地数据融合时须进行时空匹配处理。

地基云观测数据与卫星云观测数据进行时空匹配,包括空间匹配和时间匹配。空间匹配:根据地基

表 2 FY-4A 搭载的 AGRI 载荷通道特性

Table 2 AGRI load channel characteristics of FY-4A

通道	光谱带宽/μm	空间分辨率/km	主要用途
1	0.45~0.49	1	小粒子气溶胶,真彩色合成
2	0.55~0.75	0.5~1	植被,图像导航配准,恒星观测
3	0.75~0.90	1	植被,水面上空气溶胶
4	1.36~1.39	2	卷云
5	1.58~1.64	2	低云/雪识别,水云/冰云判识
6	2.10~2.35	2~4	卷云、气溶胶,粒子大小
7	3.50~4.00(高)	2	云等高反照率目标,火点
8	3.50~4.00(低)	4	低反照率目标,地表
9	5.80~6.70	4	高层水汽
10	6.90~7.30	4	中层水汽
11	8.00~9.00	4	云、总水汽
12	10.30~11.30	4	云、地表温度等
13	11.50~12.50	4	云、总水汽量,地表温度
14	13.20~13.80	4	云、水汽

云雷达安装点位置信息,查找卫星与之最为接近的像元点进行匹配。时间匹配:以卫星观测时次为基准,往前推 30 min 作为地基云匹配时间窗,时间窗内云雷达观测云顶高度统计平均后与上述卫星匹配像元点 AGRI 载荷的通道数据进行匹配。需要指出:(1)当 30 min 内云雷达观测无云时间占比超过 30%时,该时次不参与星地融合;(2)云雷达在垂直方向观测到多层云时,取最顶层且厚度超过一定阈值的云顶高度用于星地匹配;(3)对云雷达的多个云高进行统计平均时,去除一定数量的最大值和最小值,以使数据更为准确。

2 星地匹配数据特征分析与融合算法

2.1 星地匹配数据特征分析

为建立星地融合方法,选取北京南郊站 2021 年 9 月 27 日和 2022 年 5 月 11 日两个时段层状云个例,按照前面所述数据处理方法,将云雷达观测数据与 FY-4A 气象卫星 AGRI 载荷的第 11~14 通道 DN 值进行对照分析,数据随时间变化见图 2 所示,相关性分析见图 3。

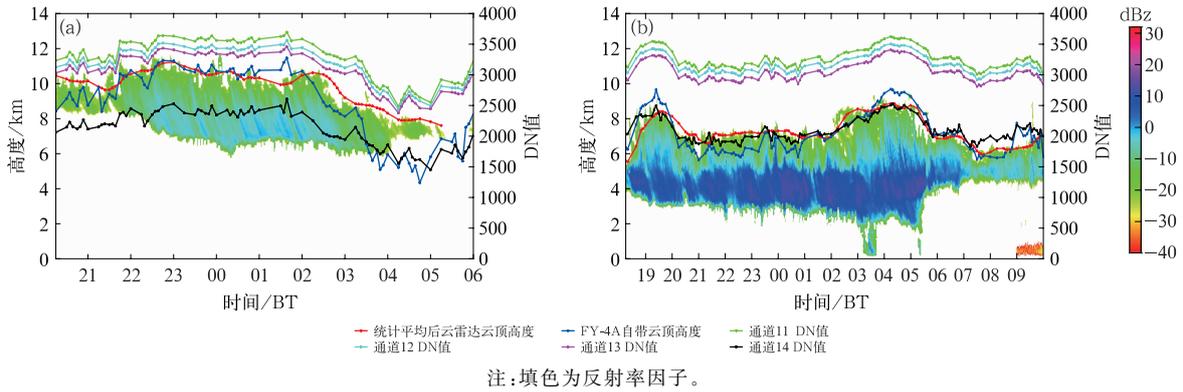


图 2 (a)2021 年 9 月 27—28 日和(b)2022 年 5 月 11—12 日南郊站云雷达数据与卫星数据时序图
Fig. 2 Time series of cloud radar data at Nanjiao Station and satellite data in (a) 27—28 September 2021 and (b) 11—12 May 2022

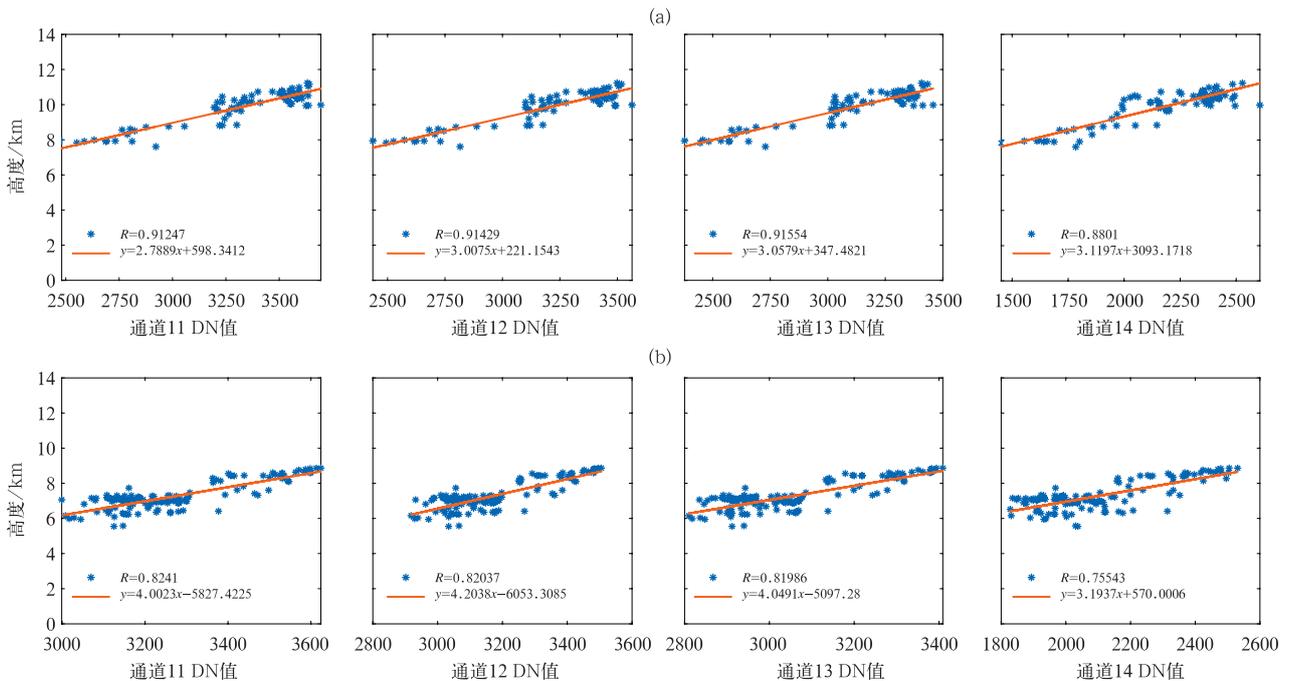


图 3 (a)2021 年 9 月 27—28 日和(b)2022 年 5 月 11—12 日南郊站云雷达云顶高度与 AGRI 载荷的第 11~14 通道 DN 值相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between radar cloud top height at Nanjiao Station and the AGRI load channel 11—14 DN values in (a) 27—28 September 2021 and (b) 11—12 May 2022

从图 2 可知,两个过程云系均为层状云,云顶呈现比较平缓的起伏波动,AGRI 载荷的第 11~14 通道 DN 值和云雷达观测云顶高度具有一致的变化趋势,进一步做相关性分析(图 3),两者呈一次线性正相关,云雷达与各通道数据相关系数基本达 0.8 以上,AGRI 通道 DN 值在一定程度上反映了云顶高度。另外,从图 2 可以看出,FY-4A 气象卫星自带的云顶高度在云层较厚时与云雷达观测之间偏差较小,但在云体稀疏或云层较薄时偏差相对较大。

通过上述个例分析可知,AGRI 载荷的第 11~14 通道 DN 值与云雷达云顶高度具有一定的相关性。但进一步分析发现,两个个例中,云雷达云顶高度与卫星通道 DN 值之间拟合方程的系数差别较大,2021 年 9 月 27 日过程各拟合方程的斜率约为 3 左右,而 2022 年 5 月 11 日过程各拟合方程的斜率更大一些。为了进一步分析两者之间相关性,将

2021 年 7 月至 2022 年 6 月期间,南郊站云雷达观测云顶高度与对应像元卫星通道数据进行统计分析,结果见图 4。

由图 4 可知,整体上云雷达观测云顶高度与 AGRI 载荷 11~14 通道 DN 值呈一次线性相关,但相关系数相比上述的个例分析明显降低。进而推断 AGRI 载荷通道数据与云雷达观测云顶高度之间并不存在通用的函数方程。如果单纯利用两者之间统计拟合方式,并不利于卫星云顶高度的精确反演。

2.2 星地云顶高度融合算法

通过云雷达观测云顶高度与 AGRI 载荷的第 11~14 通道 DN 值之间的关系分析,认为两者在较短时间表现为线性关系。为了方便地进行星地融合,将云雷达观测云顶高度与 AGRI 载荷通道数据做比值,作为星地云融合因子 α_c ,计算公式如下:

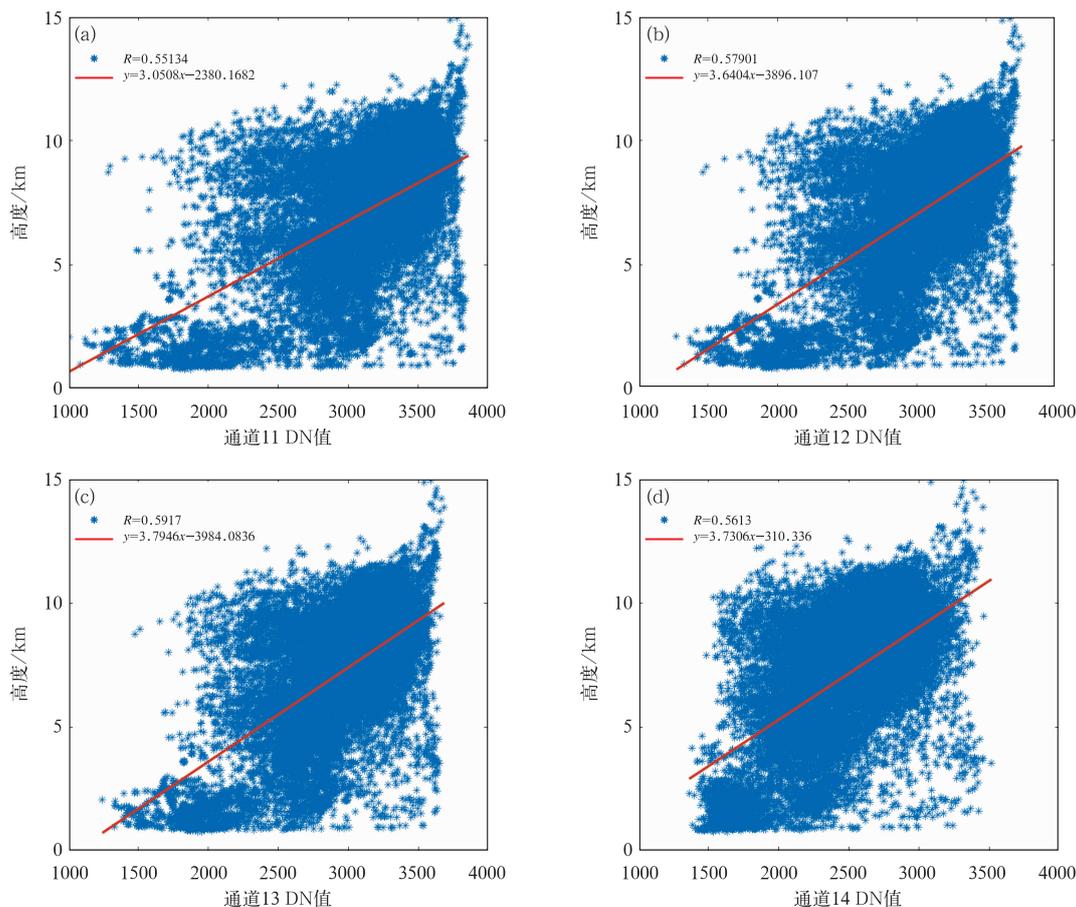


图 4 2021 年 7 月至 2022 年 6 月南郊站云雷达云顶高度与 AGRI 载荷的第 11~14 通道 DN 值相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between the radar cloud top height at Nanjiao Station and the AGRI load channel 11-14 DN values from July 2021 to June 2022

$$\partial_a = H_a / Z_a \quad (1)$$

式中： H_a 为云雷达统计平均后的云顶高度， Z_a 为云雷达安装点对应卫星像元 AGRI 载荷的通道数据。

根据上述分析，AGRI 载荷通道 13 数据与云雷达观测云顶高度的相关性始终最高。因此利用通道 13 数据和云雷达数据，统计 2021 年 7 月至 2022 年 6 月期间，北京地区 7 部云雷达与卫星的星地云融合因子，并按月份和季节进行取平均(图 5)。从图中可知，星地融合因子存在一定季节性变化，具体表现为夏季最大、冬季最小、春秋居中的规律。

基于上述分析，季节变化在一定程度上会影响卫星红外通道值与云雷达云顶高度之间的相关性。但在较短的一段时间段内，特别是对于同一个层状云系，利用云雷达与卫星之间实时星地匹配数据，计算星地云融合因子，利用卫星通道数据与星地融合因子即可实现周边一定区域云顶高度的反演，计算公式如下：

$$H_{ij} = \partial_a \times Z_{ij} \quad (2)$$

式中： H_{ij} 为卫星反演第 i 行、第 j 列像元的云顶高度， ∂_a 为星地云融合因子， Z_{ij} 为卫星第 i 行、第 j 列

像元 AGRI 载荷通道数据。

在实际应用中，星地云融合因子的使用范围不宜过大，但当周边云系与计算星地融合因子匹配数据为同一云系时，星地融合反演云顶高度准确性较高，因此该方法对于覆盖范围较大的层状云应用效果最好。

3 算法验证分析

为进一步验证该算法的可行性及准确性，利用除怀柔站以外北京地区的 6 部云雷达及式(1)对每个星地匹配数据计算星地云融合因子，其中，平谷站距离怀柔站最近(约为 46.8 km)，然后利用线性插值方式获取北京地区面上星地融合因子，最后利用式(2)得到怀柔站卫星反演云顶高度，并将其与云雷达实测值进行对比分析。

图 6~图 8 为 2021 年 9 月 27 日和 2022 年 5 月 11 日，利用星地云融合算法计算怀柔站卫星反演云顶高度与云雷达实测云顶高度之间的变化分析。从图 6 中可以看出，针对两个个例过程，星地云融合反

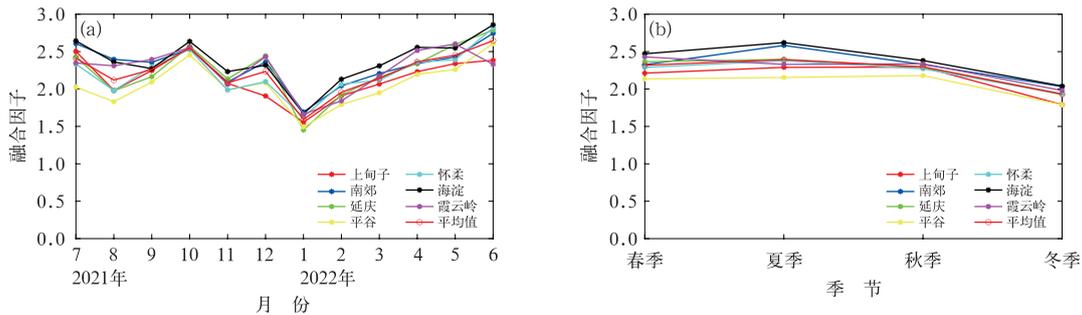


图 5 2021—2022 年北京地区融合因子(a)月份、(b)季节变化

Fig. 5 (a) Monthly and (b) quarterly changes of fusion factors in Beijing from 2021 to 2022

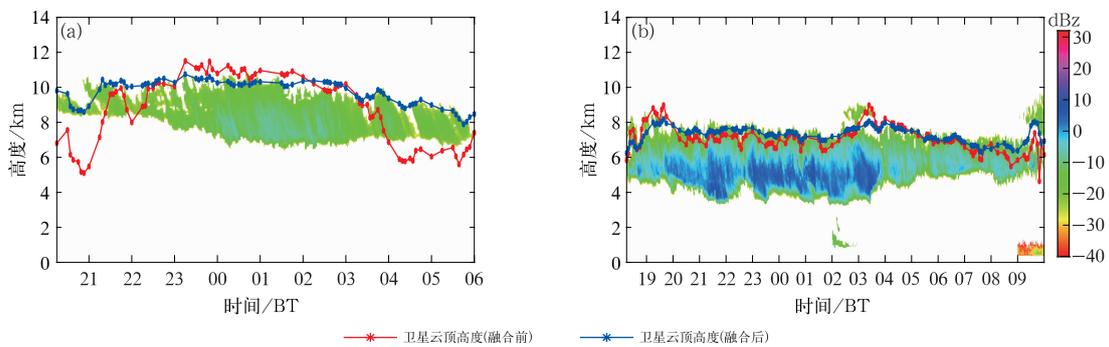


图 6 (a)2021 年 9 月 27—28 日,(b)2022 年 5 月 11—12 日怀柔站云雷达反射率因子(填色)和卫星云顶高度融合前、后时序图

Fig. 6 Time series diagram of cloud radar reflectivity factor (colored) and satellite cloud top heights before and after fusion at Huairou Station in (a) 27—28 September 2021 and (b) 11—12 May 2022

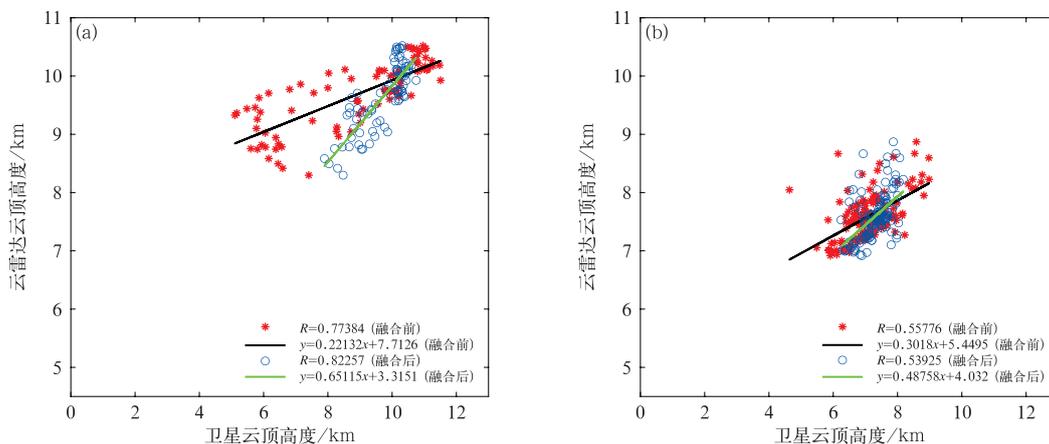


图 7 (a)2021 年 9 月 27—28 日,(b)2022 年 5 月 11—12 日怀柔站

卫星云顶高度融合前、后与云雷达云顶高度相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between the satellite cloud top height (before and after fusion) and the radar cloud top height at Huairou Station in (a) 27—28 September 2021 and (b) 11—12 May 2022

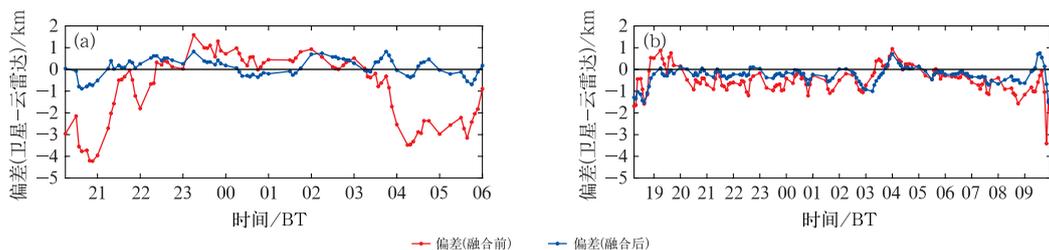


图 8 (a)2021 年 9 月 27—28 日,(b)2022 年 5 月 11—12 日怀柔站卫星云顶高度融合前、后偏差分析

Fig. 8 Deviation analysis of satellite cloud top heights before and after fusion at Huairou Station in (a) 27—28 September 2021 and (b) 11—12 May 2022

演云顶高度与云雷达实测云顶高度基本吻合,相比卫星自带云顶高度产品,融合产品更能精确描述云顶高度细节变化。图 7 的相关性分析中,星地云融合算法反演的云顶高度与云雷达实测值具有较好的相关性,两个过程的拟合斜率更接近 1,说明反演结果与实测值接近。两个过程中,卫星云顶高度与云雷达之间的均方根误差分别由融合前的 1.79 km 降低至 0.41 km、0.78 km 降低至 0.50 km,具有明显的改善效果。图 8 的偏差分析中,星地云融合反演云顶高度与云雷达实测值之间,偏差位于约 1 km 之内。

通过上述个例分析,星地云融合算法能够得到较为精细和准确的云顶高度信息。为了进一步验证融合算法准确性,统计 2021 年 7 月至 2022 年 6 月怀柔站卫星云顶高度融合前和融合后与云雷达云顶高度,进行相关性分析及误差分析(图 9)。

由图 9 可知,从 2021 年 7 月至 2022 年 6 月怀

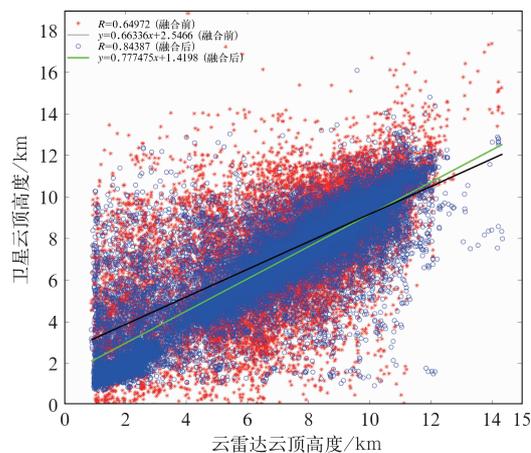


图 9 2021 年 7 月至 2022 年 6 月怀柔站卫星云顶高度融合前、后与云雷达云顶高度相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between the satellite cloud top height (before and after fusion) and the radar cloud top height at Huairou Station from July 2021 to June 2022

柔站云雷达云顶高度主要集中在 1~12 km, 卫星云顶高度融合前、后分别集中在 0~14 km、1~11 km, 卫星云顶高度融合后比融合前分布范围更集中。卫星云顶高度融合后与云雷达云顶高度相关系数 R 提高了约 0.19, 均方根误差减小了 0.7 km, 系统误差缩小了 0.11 km, 偏差的标准差减小了 0.7 km。由此可见, 星地融合反演算法能够实现 FY-4A 卫星云顶高度精确反演, 一定程度上提高了卫星云顶高度的观测质量。

4 结 论

基于地基云雷达与 FY-4A 气象卫星对云顶同步观测的特点, 分析了云雷达垂直顶空观测云顶高度与卫星对应像元多通道扫描成像辐射计通道数据之间关系, 提出了基于云雷达实时标校的 FY-4A 气象卫星云顶高度融合算法, 实现地基云雷达安装点周边一定区域卫星云顶高度的反演, 并对反演结果进行验证分析。得出以下结论:

(1) 针对单个过程, FY-4A 气象卫星 AGRI 载荷的第 11~14 通道 DN 值与云雷达云顶高度呈较好的线性相关, 但统计分析后相关性降低, 说明卫星的红外辐射通道 DN 值与季节环境相关。

(2) 星地云融合因子存在明显的年季变化, 呈现冬季最小、春秋季次之、夏季最大的特点, 基于云雷达实时标校的 FY-4A 气象卫星云顶高度融合算法可有效解决季节因素的影响。

(3) 通过个例和统计分析, 基于云雷达实时标校的 FY-4A 气象卫星云顶高度融合算法, 可以实现安装区域卫星云顶高度的精确反演, 一定程度上提高了卫星云产品的观测质量。

参 考 文 献

曹广真, 周芳成, 郑照军, 等, 2023. 静止和极轨卫星陆表温度产品的改进方法[J]. 气象, 49(3): 318-326. Cao G Z, Zhou F C, Zheng Z J, et al, 2023. Improvement method of land surface temperature remotely sensed by geostationary and polar orbiting meteorological satellites[J]. Meteor Mon, 49(3): 318-326(in Chinese).

岑炬辉, 唐世浩, 胡利军, 等, 2021. 降水-雾过程毫米波雷达探测分析[J]. 气象, 47(2): 205-215. Cen J H, Tang S H, Hu L J, et al, 2021. Analysis of a precipitation-fog process detected by millimeter-wave radar[J]. Meteor Mon, 47(2): 205-215(in Chinese).

陈渭民, 2003. 卫星气象学[M]. 北京: 气象出版社: 112-133, 419. Chen W M, 2003. Satellite Meteorology[M]. Beijing: China

Meteorological Press: 112-133, 419(in Chinese).

崔林丽, 郭巍, 葛伟强, 等, 2020. FY-4A 卫星云顶参数精度检验及台风应用研究[J]. 高原气象, 39(1): 196-203. Cui L L, Guo W, Ge W Q, et al, 2020. Comparisons of cloud top parameter of FY-4A satellite and its typhoon application research[J]. Plateau Meteor, 39(1): 196-203(in Chinese).

丁虹鑫, 马舒庆, 杨玲, 等, 2018. 云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J]. 气象, 44(12): 1604-1611. Ding H X, Ma S Q, Yang L, et al, 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 44(12): 1604-1611(in Chinese).

丁伟钰, 王洪, 和杰, 2023. 有云环境下卫星红外波段亮温资料直接同化的进展及挑战[J]. 大气科学, 47(5): 1654-1664. Ding W Y, Wang H, He J, 2023. Progress and challenges of direct assimilation of cloud-affected satellite infrared radiances[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5): 1654-1664(in Chinese).

范思睿, 王维佳, 2018. 利用 FY-4A 卫星反演产品对飞机增雨作业的分析[J]. 高原山地气象研究, 38(4): 60-66, 84. Fan S R, Wang W J, 2018. A case analysis of FY-4A satellite-retrieved of artificial precipitation enhancement operation[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 38(4): 60-66, 84(in Chinese).

胡树贞, 曹晓钟, 陶法, 等, 2020a. 船载毫米波云雷达观测西太平洋云宏观特征对比分析[J]. 气象, 46(6): 745-752. Hu S Z, Cao X Z, Tao F, et al, 2020a. Comparative analysis of cloud macro characteristics from two shipborne millimeter wave cloud radars in the West Pacific[J]. Meteor Mon, 46(6): 745-752(in Chinese).

胡树贞, 马舒庆, 陶法, 等, 2013. 基于红外实时阈值的全天空云量观测[J]. 应用气象学报, 24(2): 179-188. Hu S Z, Ma S Q, Tao F, et al, 2013. An experiment study of all-sky cloud amount observation based on infrared real-time threshold[J]. J Appl Meteor Sci, 24(2): 179-188(in Chinese).

胡树贞, 陶法, 马舒庆, 等, 2017. 地基主动式云自动观测设备外场对比试验[J]. 气象科技, 45(6): 988-994. Hu S Z, Tao F, Ma S Q, et al, 2017. Field comparative experiment of active automatic cloud observation equipment[J]. Meteor Sci Technol, 45(6): 988-994(in Chinese).

胡树贞, 陶法, 张雪芬, 等, 2020b. 基于毫米波云雷达的融化层亮带识别算法研究[J]. 气象水文海洋仪器, 37(3): 1-5. Hu S Z, Tao F, Zhang X F, et al, 2020b. Research on bright band recognition algorithm of melting layer based on millimeter-wave cloud radar[J]. Meteor Hydrol Marine Inst, 37(3): 1-5(in Chinese).

李思腾, 马舒庆, 高玉春, 等, 2015. 毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析[J]. 气象, 41(2): 212-218. Li S T, Ma S Q, Gao Y C, et al, 2015. Comparative analysis of cloud base heights observed by cloud radar and ceilometer[J]. Meteor Mon, 41(2): 212-218(in Chinese).

李琦, 蔡森, 周毓荃, 等, 2021. 基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征[J]. 大气科学, 45(6): 1161-1172. Li Q, Cai M, Zhou Y Q, et al, 2021. Characteristics of cloud vertical distribution based on cloud identification by radiosonde[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1161-1172(in Chinese).

- 陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等, 2017. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景[J]. 海洋气象学报, 37(2): 1-12. Lu F, Zhang X H, Chen B Y, et al, 2017. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects[J]. J Marine Meteor, 37(2): 1-12(in Chinese).
- 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等, 2003. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾[J]. 大气科学, 27(4): 552-566. Lü D R, Wang P C, Qiu J H, et al, 2003. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China [J]. Chin J Atmos Sci, 27(4): 552-566(in Chinese).
- 马晓燕, 季国良, 2000. 利用 ERBE 资料分析中国地区云辐射强迫的时空变化[J]. 高原气象, 19(2): 150-158. Ma X Y, Ji G L, 2000. Analysis of temporal and spacial variations for cloud radiative forcing in China by using ERBE data[J]. Plateau Meteor, 19(2): 150-158(in Chinese).
- 史小康, 程文聪, 张文军, 等, 2023. 基于 FY-4 红外资料和光流法的不同空间尺度云团的外推可预报性研究[J]. 气象, 49(5): 563-573. Shi X K, Cheng W C, Zhang W J, et al, 2023. Study on extrapolation predictability of cloud clusters in different space scales based on FY-4 infrared data and optical flow method[J]. Meteor Mon, 49(5): 563-573(in Chinese).
- Slingo A, 毛光伶, 1990. 云对气候的影响[J]. 气象科技, (4): 36-39. Slingo A, Mao G L, 1990. The effect of clouds on climate[J]. Meteor Sci Technol, (4): 36-39(in Chinese).
- 孙跃, 肖辉, 杨慧玲, 等, 2021. 基于遥感数据光流场的 2021 年郑州“7·20”特大暴雨动力条件和水凝物输送特征分析[J]. 大气科学, 45(6): 1384-1399. Sun Y, Xiao H, Yang H L, et al, 2021. Analysis of dynamic conditions and hydrometeor transport of Zhengzhou superheavy rainfall event on 20 July 2021 based on optical flow field of remote sensing data[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1384-1399(in Chinese).
- 谭仲辉, 马烁, 韩丁, 等, 2019. 基于随机森林算法的 FY-4A 云底高度估计方法[J]. 红外与毫米波学报, 38(3): 381-388. Tan Z H, Ma S, Han D, et al, 2019. Estimation of cloud base height for FY-4A satellite based on random forest algorithm[J]. J Infrared Millim Waves, 38(3): 381-388(in Chinese).
- 汪方, 丁一汇, 2005. 气候模式中云辐射反馈过程机理的评述[J]. 地球科学进展, 20(2): 207-215. Wang F, Ding Y H, 2005. An evaluation of cloud radiative feedback mechanisms in climate models [J]. Adv Earth Sci, 20(2): 207-215(in Chinese).
- 王明, 陈英英, 周毓荃, 等, 2022. 基于一次暴雨过程的风云四号 A 星三种云参数应用效果对比分析[J]. 暴雨灾害, 41(4): 396-404. Wang M, Chen Y Y, Zhou Y Q, et al, 2022. Comparative analysis of application effects of three cloud parameters of FY-4A in a rainstorm case[J]. Torr Rain Dis, 41(4): 396-404(in Chinese).
- 王新, 唐世浩, 魏彩英, 2021. 风云气象卫星天气应用回顾和展望[J]. 科技导报, 39(15): 23-30. Wang X, Tang S H, Wei C Y, 2021. Review and vision of Fengyun meteorological satellites weather application[J]. Sci Technol Rev, 39(15): 23-30(in Chinese).
- 徐小红, 余兴, 朱延年, 等, 2018. 6·23 龙卷 FY-2G 卫星云微物理特征分析[J]. 高原气象, 37(6): 1737-1748. Xu X H, Yu X, Zhu Y N, et al, 2018. Cloud microphysical properties of a tornado revealed by FY-2G geostationary satellite[J]. Plateau Meteor, 37(6): 1737-1748(in Chinese).
- 曾正茂, 郑佳锋, 吕巧谊, 等, 2022. 毫米波云雷达距离旁瓣回波质量控制及效果评估[J]. 气象, 48(6): 760-772. Zeng Z M, Zheng J F, Lü Q Y, et al, 2022. Quality control and effect evaluation of range sidelobe echo of millimeter wave cloud radar[J]. Meteor Mon, 48(6): 760-772(in Chinese).
- 张静怡, 王改利, 郑佳锋, 等, 2022. 青藏高原东南部墨脱地区弱降水微物理特征的 Ka 波段云雷达观测研究[J]. 大气科学, 46(5): 1239-1252. Zhang J Y, Wang G L, Zheng J F, et al, 2022. Study of the microphysical characteristics of weak precipitation in Mêdog, Southeastern Tibetan Plateau using Ka-band cloud radar [J]. Chin J Atmos Sci, 46(5): 1239-1252(in Chinese).
- 赵静, 曹晓钟, 代桃高, 等, 2017. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J]. 气象, 43(1): 101-107. Zhao J, Cao X Z, Dai T G, et al, 2017. Comparative analysis of cloud observed by millimeter wave cloud radar and sounding[J]. Meteor Mon, 43(1): 101-107(in Chinese).
- Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al, 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models[J]. Science, 245(4917): 513-516.
- Chahine M T, 1974. Remote sounding of cloudy atmospheres. I. The single cloud layer[J]. J Atmos Sci, 31(1): 233-243.
- Gao G, Weng D M, 1999. Retrieval of Qinghai-Xizang SASWR with ERBE and ISCCP data[J]. J Meteor Res, 13(3): 367-374.
- Liu B, Huo J, Lü D R, et al, 2021. Assessment of FY-4A and Himawari-8 cloud top height retrieval through comparison with ground-based millimeter radar at sites in Tibet and Beijing[J]. Adv Atmos Sci, 38(8): 1334-1350.

(本文责编:俞卫平)