

C 波段调频连续波天气雷达探测系统及观测试验^{* 1}

阮 征^{1,2} 金 龙^{2,3} 葛润生² 李 丰² 吴 俊⁴
RUAN Zheng^{1,2} JIN Long^{2,3} GE Runsheng² LI Feng² WU Jun⁴

1. 南京信息工程大学, 南京, 210044
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081
3. 成都信息工程学院, 成都, 610225
4. 安徽四创电子股份有限公司, 合肥, 230088

1. *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

2. *State Key Lab of Severe Weather Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China*

3. *Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China*

4. *Anhui Sun-create Electronic Co., Ltd, Hefei 230088, China*

2014-05-04 收稿, 2015-02-05 改回.

阮征, 金龙, 葛润生, 李丰, 吴俊. 2015. C 波段调频连续波天气雷达探测系统及观测试验. 气象学报, 73(3):577-592

Ruan Zheng, Jin Long, Ge Runsheng, Li Feng, Wu Jun. 2015. The C-band FMCW pointing weather radar system and its observation experiment. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(3):577-592

Abstract The C-band Frequency Modulation Continuous Wave (C-FMCW) vertically pointing radar was developed with a newly signal processing technology. The C-FMCW radar uses the two-dimensional FFT signal processing technology, with the lowest detectable echo power of -170 dBm, and the quantitative calibration is difficult for weak signal. For a standard signal source analog echo point frequency, its frequency signal is able to be broadened to the signal with the same scanning range as the radar system, to get the calibration curve with the minimum input power up to -169.77 dBm, in which the calibration curve inflection point is able to confirm that the radar noise power is about -168 dBm. The spectral density of reflectivity can be computed from the spectrum of quantitative calibration. The data observed from the C-FMCW radar are compared with the SA scanning radar on Dingyuan, Anhui Province from June of 2013. The comparison analysis uses the data from the 48 km and 83 km CINRAD/SA Bengbu and Hefei radar, respectively, for the August 24 precipitation event. This event includes the two stages with convective cloud and stratiform cloud respectively. The reflectivity vertical distributions in the stratiform cloud for the C-FMCW radar and CINRAD/SA weather radar are basically in agreement, showing that the calculation of the C-FMCW radar system is reasonable. The average difference between the C-FMCW radar and SA radar in Bengbu in terms of the root mean square difference is 1.75 dB, and that between it and the Hefei SA radar is 2.02 dB. A preliminary analysis using the products and the spectral density of reflectivity, shows that the C-FMCW radar has a good prospect in the identification for the different particle phase thickness in precipitation cloud body, the study of echoes in the boundary layer of the clear atmosphere. And, it can also help to recognize the strong variations of vertical motion in the severe rain clouds.

Key words C band frequency modulation continuous wave (FMCW) radar, Radar quantitative calibration, Reflectivity comparison analysis, Precipitation cloud detection capability

摘 要 对降水云更高时、空分辨率观测资料的需求推动了天气雷达技术的发展, 调频连续波雷达 (FMCW) 系统采用收发分

* 资助课题: 国家自然科学基金项目 (41075023)、公益类行业 (气象) 科研专项 (GYHY201306004、GYHY201306040)、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室自主研究项目。

作者简介: 阮征, 主要从事地基遥感系统及方法研究。E-mail: ruanz@cma.cma.gov.cn

置双天线体制,采用数字直接移相(DDS)技术和快速傅里叶变换(FFT)信号处理技术,获取高度分辨率达到 15、30 m,探测周期 2—3 s 的回波功率谱分布和谱参数,具有脉冲多普勒雷达无法比拟的探测优势。C 波段 FMCW(C-FMCW)雷达最小可测信号功率达到 -170 dBm,微弱信号的定量标校是技术难点。采用标准信号源输出单频信号,经过数字直接移相扩展为与雷达系统相同扫频范围信号,得到最小输入功率可达 -169.77 dBm 的定标曲线,由定量标校后的谱分布计算得到回波强度谱密度分布。该雷达于 2013 年 6 月起在安徽定远开始观测,利用 8 月 24 日降水过程探测数据,与距离该地 48 km 的蚌埠和 83 km 的合肥 SA 扫描雷达观测数据,分别进行对流云与层状云的观测对比分析。对于均匀分布的层状降水云,C-FMCW 雷达与 SA 雷达探测结果基本接近,C-FMCW 雷达与蚌埠 SA 雷达的平均均方根误差为 1.75 dB,与合肥 SA 雷达的平均均方根误差为 2.02 dB,C-FMCW 雷达与两部 SA 雷达探测的回波强度差异小于 1 dB。对观测试验谱参数及回波强度谱密度分布进行了初步分析,C-FMCW 雷达在研究降水云体的相态分区、晴空大气边界层回波等方面有较好的应用前景,有助于加深对强降水云中垂直运动的强烈变化的探测和认识。

关键词 C 波段调频连续波天气雷达, 定量标校, 数据比对, 降水云探测

中图法分类号 P412.25

1 引言

在大气几千米至十几千米的降水云体中,云和降水的形成经历了较为复杂的微物理过程。近年来,气象学家对降水和云物理方面研究的重点之一是对降水云体的垂直探测及其微物理过程的反演研究;对云和降水云体的精细探测主要建立在微波遥感技术基础上,如采用高分辨率的雷达进行垂直探测。已经发展了多种波长的脉冲多普勒体制垂直探测雷达,用于进行云和降水云的垂直结构研究。

垂直探测雷达主要用于降水云的精细结构探测和谱分析研究,早期的研究多是采用 925 和 445 MHz 的风廓线雷达研究降水云中的微物理过程(Rajopadhyaya, et al, 1993);35 和 94 GHz 云垂直探测雷达主要用于反演云参数和获取云中的动力过程(Gossard, et al, 1997)。美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的高层大气试验室(AL)研制的采用相干积分和脉冲压缩技术的 S 波段高分辨率垂直探测雷达,更适合探测降水云体的完整垂直结构(Ecklund, et al, 1999);NOAA 的环境技术实验室(ETL)将可切换的微波耦合器技术应用到 S 波段垂直探测雷达,提升了对微弱信号的探测能力(White, et al, 2000)。

大气辐射测量(ARM)和北美季风试验(NAME)观测中采用了多种波长的垂直探测雷达进行联合观测,以获取大气和降水云中的物理过程和垂直演变规律,试验表明垂直指向雷达是获取大气和云垂直分布的有效探测系统(Stokes, et al, 1994;Lerach, et al, 2010);Sekelsky 等(1999)利用

多波长雷达开展了云和降水云中的微物理参数反演研究。

脉冲多普勒雷达采用窄脉冲发射方式提高探测分辨率,但是宽的接收机带宽降低了灵敏度,采用宽脉冲发射、窄脉冲接收的脉压技术,会抬高系统的噪声电平,直接影响了探测能力,因此脉冲多普勒雷达难以保证在不损失探测能力的情况下获取高的距离分辨率。调频连续波雷达(FMCW)采用连续波体制通过对发射信号频率的调制、对返回信号的解调实现距离测量,FMCW 雷达系统测距测速精度高、测距盲区小、峰值功率低、截获概率低,其对目标的精确定位能力在军事、交通等领域得到广泛应用(斯科尔尼克,1978)。

20 世纪 60 年代后期,FMCW 技术在气象部门也得到了应用。美国海军电子实验室研制的 S 波段 FMCW 体制雷达被用于边界层大气结构的研究,具有高距离分辨率和高探测灵敏度(Richter, 1969),先后开展了开尔文-亥姆霍兹不稳定性(K-H 波)、湍流引起的温度变化以及大气垂直速度对大气边界层稳定性影响等的相关研究(Eaton, et al, 1995)。

进入 21 世纪以来,窄带滤波器组被模块化快速傅里叶变换(FFT)组件代替,FMCW 技术得到进一步发展。采用快速傅里叶变换处理技术不仅能够快速得到高距离分辨率的返回信号回波强度、速度、谱宽等谱参数产品,还可以得到信号的谱分布信息。2002 年在美国能源部支持下,马塞诸塞大学研制了 S 波段 FMCW 雷达,探测能力达到 1 m 的空间分辨率和 1 s 的时间分辨率(Ince, et al, 2003);此雷达先后被用于边界层内的对流触发、水汽混合比、湍流

混合比和边界层结构参数等方面的研究(Bennett, et al,2010)。近年来发展的便携式连续波体制 Ka波段微降水雷达(MRR),发射频率为 24.1 GHz (Peters, at el,2002),主要用来研究弱降水云中的微物理参数(Melchionna, et al,2008)。

雷达探测系统的定标是雷达系统数据处理及应用的基础。仲凌志等(2011)对毫米波测云雷达进行过定标和比较试验,钟刘军等(2010)提出了对 L 波段探测功率谱密度的定标方案。C-FMCW 雷达系统定标是对返回信号功率谱密度分布中的单根谱线进行定标,其单根谱线的噪声功率仅为 -170 dBm,远低于多普勒天气雷达和风廓线雷达,对微弱信号的定标是该雷达的技术难点。

本研究针对 C-FMCW 雷达信号谱分布进行了

定量标校,通过与 CINRAD/SA 雷达数据比对分析确认 C-FCMW 雷达对降水云垂直结构描述的探测优势,对探测试验中一些新的观测事实进行了初步分析。

2 C-FMCW 垂直探测雷达系统

C-FMCW 天气雷达采用调频连续波技术通过第 1 次快速傅里叶变换提取回波信号中的距离信息,第 2 次快速傅里叶变换获得距离单元上的功率密度谱分布,进而计算出回波强度、平均多普勒速度、速度谱宽等谱参数,可以提供降水云体的精细垂直结构和回波强度谱分布数据,C 波段雷达垂直探测时强回波区对电磁波的衰减可以忽略不计。表 1 给出 C-FMCW 雷达系统的主要技术参数。

表 1 C-FMCW 垂直探测雷达系统主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of the C-FMCW radar system

序号	参数	指标
1	工作频率	5530 MHz±3 MHz/±3.5 MHz
2	探测方式	固定垂直指向探测
3	探测量程	0.015—24 km
4	重复周期	600、700 μs
5	扫描带宽	6 MHz±3 MHz/±3.5 MHz
6	时间分辨率	3 s
7	距离库长、库数	库长:15 m/30 m, 库数:800/500
8	探测能力	15 km 高度处探测能力低于 -20 dBz
9	天线型式	收发分置、抛物面
10	天线增益	≥35 dB
11	波束宽度	≤2.6°
12	发射功率	≥150 W
13	接收通道动态范围	≥82 dB
14	信号处理	二次快速傅里叶变换
15	数据输出	功率谱密度分布、谱参数

图 1a 为安徽定远 2013 年 7 月 4 日 21 时 25—45 分(世界时,下同)探测的降水云强度、速度、谱宽时序图,时间分辨率为 3 s、高度分辨率为 30 m。图 1b 为 21 时 45 分 35 秒探测的回波强度谱密度分布图。

由于 C-FMCW 接收机带宽为 2 kHz,与脉冲多普勒雷达 2 MHz 的带宽相比,灵敏度提高了 30 dB,另外,快速傅里叶变换谱分析(信号相干积累)的信号处理得益约为 25—30 dB,因此累积增加 55—60 dB,其最小可测灵敏度为 -170 dBm。采用数字直接移相技术(DDS)和高稳定度的晶振,雷达频率短

稳达到 10^{-11} (1 ms) 以上,保证了雷达高接收机灵敏度的稳定运行。

3 C-FMCW 雷达信号定标

C-FMCW 雷达接收信号的定标对雷达输出回波功率谱密度分布中谱线的功率值进行定标。C-FMCW 雷达接收机输出窄带宽信号,谱线上噪声功率在距离分辨率为 30 m 时最低为 -166 dBm、距离分辨率 15 m 时最低为 -169 dBm,雷达最小可检测信号功率亦分别为 -166、-169 dBm,C-FMCW 雷达的定标难点是对微弱信号的标定。

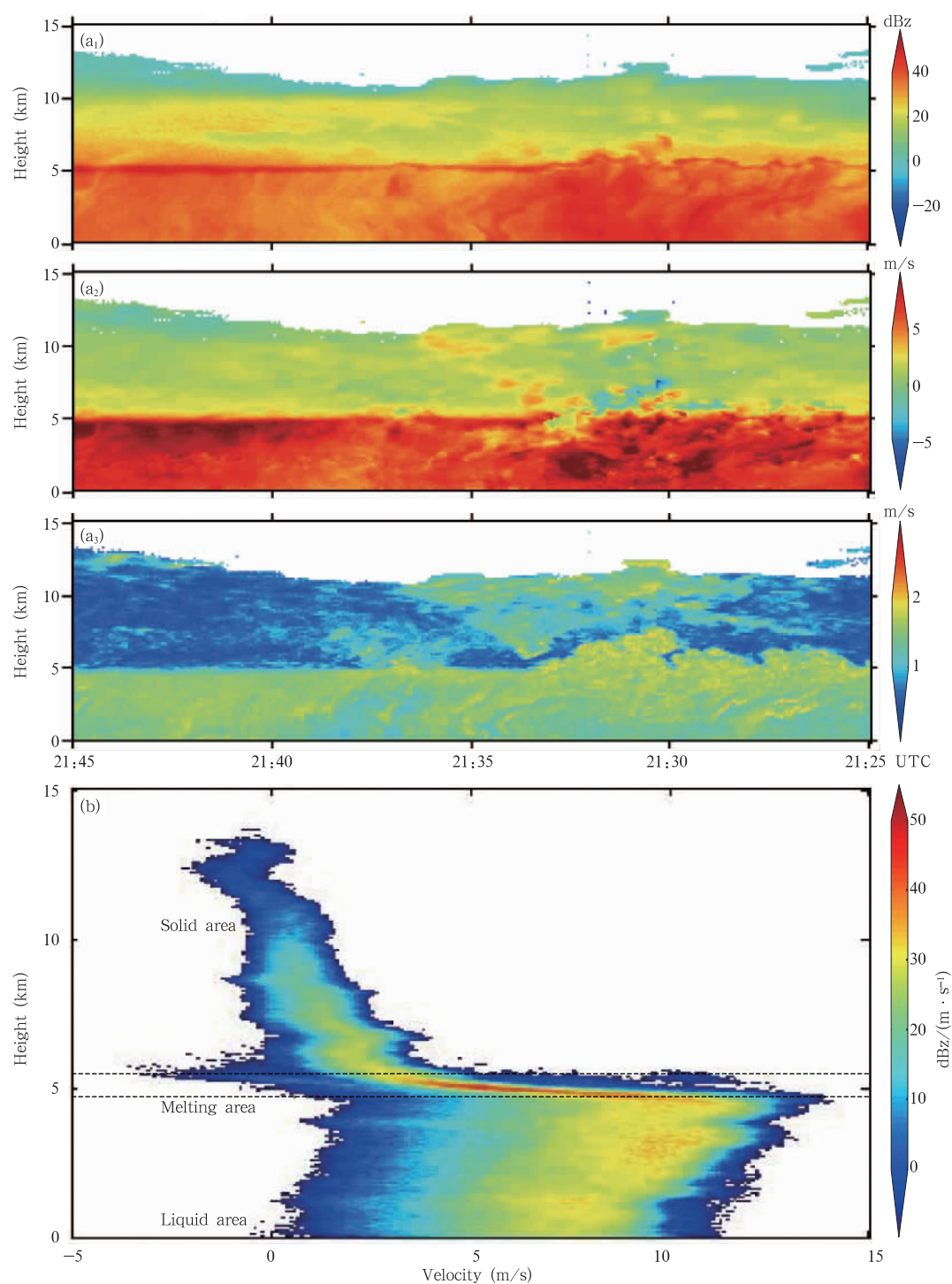


图1 2013年7月4日 LaSW's C-FMCW 雷达回波强度(a_1)、径向速度(a_2)和速度谱宽(a_3),
(b) 2013年7月4日21时45分35秒的回波强度谱密度分布

Fig. 1 LaSW's C-Band FMCW radar products (reflectivity (a_1), vertical velocity (a_2) and speed width (a_3))
on 4 July 2013 and (b) the spectral density of reflectivity at 21:45:35 UTC 4 July 2013

3.1 谱线噪声功率

C-FMCW 雷达返回信号通过快速傅里叶变换

解调提取距离信息,距离分辨率为 15、30 m 时,距离库输出的信号带宽分别为 1、2 kHz,输出信号中

混有的系统噪声功率 P_{Nr} 与带宽有关

$$P_{Nr} = -114 + N_f + 10\lg B_w \quad (1)$$

式中, N_f 为噪声系数, 单位为 dB; B_w 为带宽, 单位为 MHz; P_{Nr} 为单个距离库噪声功率, 单位为 dBm。C-FMCW 系统噪声系数为 2 dB, P_{Nr} 为 -139、-142 dBm。

返回信号进行谱分析时, 需要再次对信号进行快速傅里叶变换处理, 信号中的噪声也再次分解到各个谱线中, 单根谱线上的噪声功率为

$$P_{Ns} = P_{Nr} - 10\lg N \quad (2)$$

式中, N 为快速傅里叶变换谱处理的点数, C-FMCW 雷达选 $N=512$, P_{Ns} 分别为 -166、-169 dBm。C-FMCW 雷达最小可检测信号功率为 -166、-169 dBm。

3.2 谱线信号功率的定量标校

目前常规天气雷达和风廓线雷达最小可检测信号功率约为 -115 和 -145 dBm, C-FMCW 雷达的最小信号功率接近 -170 dBm, 常规方法难以对微弱信号进行定标。

对 C-FMCW 雷达的定标采用将标准信号源信

号转换为扫频信号进行, 单频信号经过数字直接移相后变为扫频信号输入 C-FMCW 雷达, 经快速傅里叶变换处理后分解为不同距离库上的信号, 各距离库上输出的平均信号功率为该调频周期内信号功率的 $1/K$, K 是调频带宽和距离库带宽间的频宽比。C-FMCW 雷达采用两种调频带宽——6、7 MHz, 对应的距离库带宽为 2 kHz (30 m)、1 kHz (15 m), 则 K 为 3000、7000。输入信号经数字直接移相扫频和第一次快速傅里叶变换分解使得每个距离库信号功率降低了 34.8、38.4 dB。通过确定定量标校曲线的线性动态范围, 来获取微弱信号的定量测量。

对 6 MHz 调频带宽接收系统进行了 57 组数据的测量, 外接信号源采用 HP 83752B, 为了尽可能减小测量过程中引入的误差, 在测试时仅使用了一个 50 dB 的衰减器, 理论输入单个距离库的功率最小可达 -169.77 dBm。图 2a 给出了 C-FMCW 雷达系统定标曲线, 最小可检测信号在 -167 dBm, 最大可检测信号为 -65 dBm, 拟合线斜率为 1.004, 均

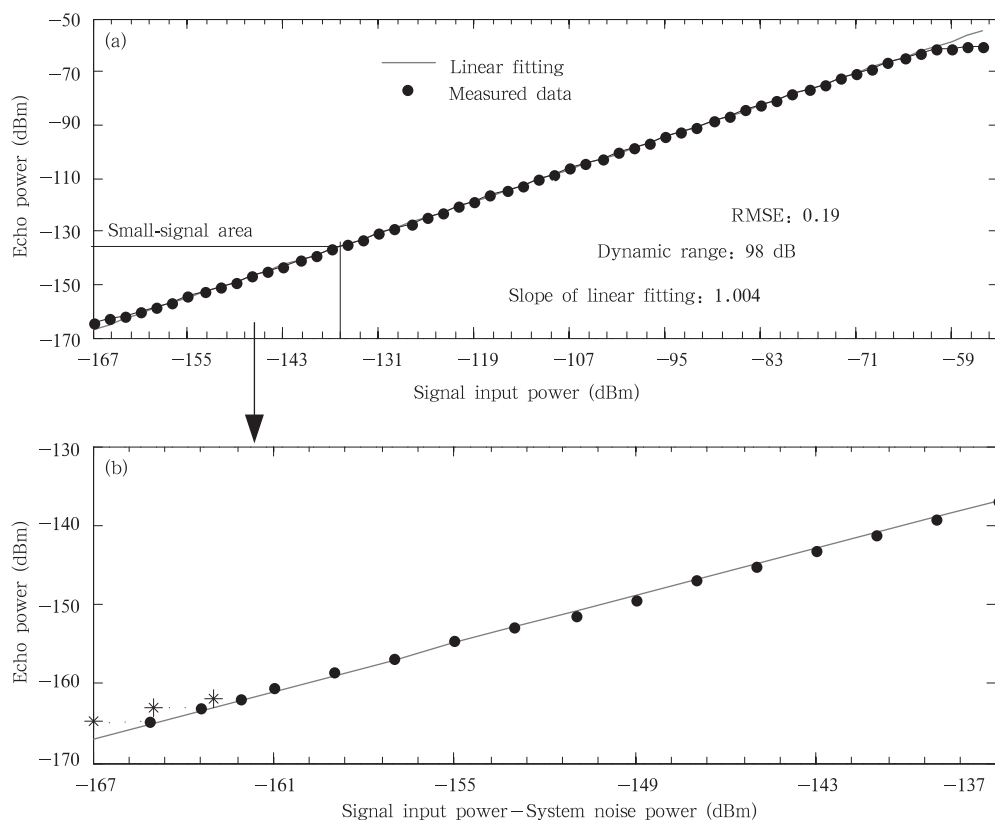


图2 C-FMCW垂直探测雷达定标曲线

Fig. 2 Calibration curve of the C-FMCW radar system

方根误差为 0.19, 系统的动态范围为 98 dB, 系统回波功率与输入功率之间线性拟合程度很高。拟合线上端拐点处为接收机最大接收功率, 下端小信号区域内拐点是机内噪声干扰导致, 由于机内噪声功率很小, 当信号源输入功率较大时, 噪声功率对输入信号功率的影响可忽略不计(大信号区域); 当信号源输入功率降低至接近噪声功率时, 便会出现拐点, 实测数据值与拟合直线值的标准差等于 3 dB 时, 输入信号功率等于噪声功率。图 2b 是在图 2a 中小信号区域的基础上, 进行了噪声订正(米字点包含系统噪声), 图 2b 中噪声订正后的定标曲线线性程度得到了改善。

图 2 中由噪声电平计算出雷达噪声功率约为 -168 dBm, 表明 C-FMCW 雷达具有对微弱气象回波信号的探测能力, 也表明此定标方案可行、定标曲线合理。

3.3 谱参数计算

定标后的单根谱线的回波功率 P_{ri} 实质上是单根回波功率谱密度谱线 $S(v_i)$ (单位: dBm/(m · s⁻¹)) 与多普勒速度间隔 Δv (单位: m/s) 的乘积

$$P_{ri} = S(v_i) \cdot \Delta v \quad (3)$$

由雷达气象方程, 谱线的回波功率 P_{ri} 可以转化为谱线的回波强度 Z_i (单位: dBz)。

$$Z_i = \frac{P_{ri} R^2}{C} \quad (4)$$

式中, $C = \frac{P_t G^2 \theta \phi h \pi^3 |k|^2}{1024 \ln 2 \times \lambda^2 L_\Sigma}$ 为雷达常数, 由雷达参数确定, 距离 R 通过第 1 次快速傅里叶变换确定。式中 P_t 为发射功率, G 为天线增益, θ 为水平波束宽度, ϕ 为垂直波束宽度, h 为距离分辨率, $|k|^2$ 为折射指数, λ 为波长, L_Σ 为馈线损耗。

大气信号的回波强度 Z 由噪声电平 P_{Ni} (远端无返回信号距离库确定) 之上的信号强度谱密度 $G(v)$ (如图 1b) 的零阶矩计算得到, N_{FFT} 为谱变换点数

$$Z = \sum_{i=-N_{FFT}/2}^{N_{FFT}/2} (Z_i - P_{Ni}) \quad (5)$$

平均径向速度(m/s)是返回信号强度谱分布的一阶矩, 表示为

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=-N_{FFT}/2}^{N_{FFT}/2} G(v_i) \cdot v_i \cdot \Delta v}{\sum_{i=-N_{FFT}/2}^{N_{FFT}/2} G(v_i) \cdot \Delta v} \quad (6)$$

速度谱宽 σ (m/s) 反映了雷达取样空间内粒子运动的不均匀性, 为信号强度谱分布的二阶中心矩

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=-N_{FFT}/2}^{N_{FFT}/2} (v_i - \bar{v})^2 \cdot G(v_i) \cdot \Delta v}{\sum_{i=-N_{FFT}/2}^{N_{FFT}/2} G(v_i) \cdot \Delta v}} \quad (7)$$

4 探测试验

2013 年 6 月起 C-FMCW 雷达在安徽定远(32°32'N, 117°40'E, 69.6 m)开展了观测试验。与距离定远 47.7 km 的蚌埠 SA 雷达(32°51'N, 117°27'E, 149.6 m)和 83.5 km 的合肥 SA 雷达(31°52'N, 117°15'E, 165.6 m)观测数据进行比较。8 月 24 日定远出现了一次较强的降水过程, 前期为强对流降水, 后期转为层状云降水, 提取了蚌埠 SA 雷达、合肥 SA 雷达探测定远上空的回波数据与相同时刻 C-FMCW 雷达数据进行比对分析。

4.1 取样空间

3 部雷达在定远上空回波强度的取样空间各不相同, SA 雷达每个仰角波束宽度为 1°, 距离库长 1 km; C-FMCW 垂直探测雷达的波束宽度为 2.6°, 距离库长 30 m。图 3 为蚌埠、合肥 SA 雷达与 C-FMCW 雷达数据代表性示意图, 图 3a 是高度取样空间, 图 3b 为水平面上取样空间。在 C-FMCW 雷达上空, 蚌埠 SA 雷达与合肥雷达的数据取样空间的高度范围分别为 0.63、1.45 km, 分别覆盖了 21 和 48 个 C-FMCW 雷达数据范围。C-FMCW 雷达在 1.5 和 10 km 高度上的水平取样范围分别为 0.022 km × 0.022 km、0.11 km × 0.11 km 和 0.218 km × 0.218 km, 在 C-FMCW 雷达上空 5 km, 蚌埠 SA 雷达取样面积是 C-FMCW 雷达的 40 倍、合肥 SA 雷达则为 85 倍。

4.2 降水云体回波强度垂直结构

根据地面降水强度和降水云垂直结构特征, 2013 年 8 月 24 日降水过程划分为两个时段, 时段 1 为 06 时 30 分—08 时的对流云降水阶段, 时段 2 为 09—11 时的层状云降水阶段。图 4 分别给出两个时段定远上空降水云体垂直廓线反射率(VPR)随时间的变化, 图 4a、b 的 C-FMCW 雷达在 06 时 30 分—08 时共进行了 1800 次探测, 09—11 时共探测了 2343 次, 垂直廓线反射率是由 SA 雷达数据中提取定远上空 7 个仰角数据插值获得, 时段 1 共有 15 次探测, 时段 2 共有 20 次探测。

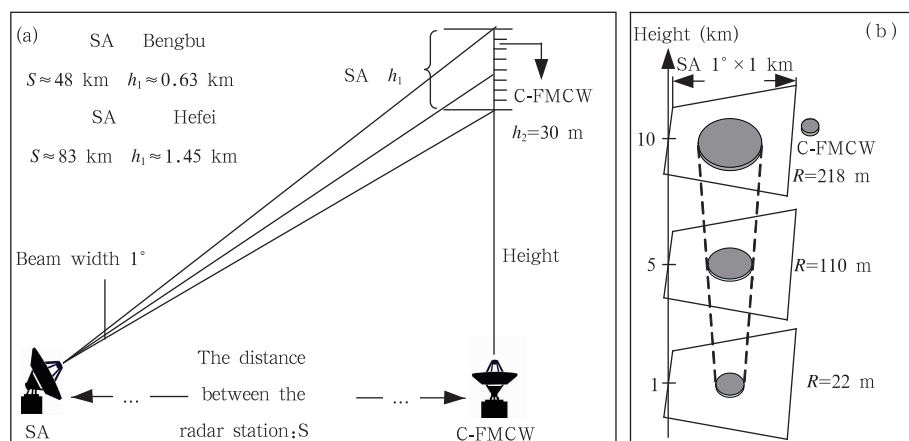


图3 蚌埠、合肥 SA 雷达与定远 C-FMCW 雷达探测取样空间示意

(a. 高度空间代表性, b. 水平空间代表性)

Fig. 3 Schematical map for the position and data spacial representation for the Dingyuan C-FMCW and, Bengbu, and Hefei SA radar (a. vertical, b. horizontal)

从图 4b、d、f 可以看出, C-FMCW 雷达观测数据描述的降水云体精细结构特征明显, 对流性降水云体结构凸出, SA 雷达无法描述对流降水的精细结构和快速变化。层状云降水回波强度水平分布均匀、垂直变化缓慢, C-FMCW 雷达在 5 km 高度上探测到清晰、稳定维持的 0℃ 层亮带结构(图 4a), 厚度约为 500 m, 而蚌埠 SA 雷达 0℃ 亮带结构并不清晰(图 4c), 合肥 SA 雷达基本无法看到 0℃ 层亮带(图 4e)。

比较两部 SA 雷达, 合肥雷达比蚌埠雷达在定远上空的取样空间更大, 两者的垂直廓线反射率特征也存在差异, 合肥 SA 雷达对弱降水云探测的回波强度偏强, 而探测强降水云的回波强度偏弱。显然, 相对于扫描雷达, C-FMCW 雷达描述降水云体垂直精细结构更为真实。

4.3 数据比较

提取 SA 雷达每个扫描仰角在 C-FMCW 雷达上空的数据进行时空匹配, 根据 SA 雷达数据覆盖的高度范围确定 C-FMCW 数据高度和数据样本, 两者在水平空间代表性的差异依然存在。考虑到低仰角地物遮挡和高仰角探测云充塞程度的不确定性影响, 比较时分别给出蚌埠和合肥 SA 雷达 2.4°、3.3°、4.2°、5.9° 四个仰角与 C-FMCW 雷达在相应高度区间的数据输出。

4.3.1 对流降水云

图 5、图 6 给出时段 1 蚌埠 SA 与 C-FMCW、合肥 SA 与 C-FMCW 雷达回波强度比对结果, 图中黑点为周期 6 min 的 SA 雷达数据, C-FMCW 雷达数据随时间的连续变化由连线给出, 红色表示扫描波束范围内 C-FMCW 的最大回波强度 $Z_{\max}$ 、绿色表示最小回波强度 $Z_{\min}$, $Z_{\max}$ 和 $Z_{\min}$ 的距离单元数与蚌埠 SA 雷达比较时为 21 个、与合肥 SA 雷达比较时为 48 个。图 5 中 C-FMCW 的 $Z_{\max}$ 为 61 dBz、蚌埠 SA 雷达 $Z_{\max}$ 为 57 dBz, 图 6 中 C-FMCW 的 $Z_{\max}$ 为 67 dBz、合肥 SA 雷达的 $Z_{\max}$ 为 52 dBz。对流云垂直结构的不均匀分布, 由于取样空间的数据平滑作用, SA 雷达探测强回波时, 回波强度偏低, 探测弱回波时, 回波强度偏大。

4.3.2 层状降水云

层状降水云水平分布均匀, 可以评估 3 部雷达探测回波强度的一致性。图 7、8 中稳定降水云的回波强度变化平缓, 图 7a、b、c 和图 8a、b 中 C-FMCW 雷达探测 $Z_{\max}$ 与 $Z_{\min}$ 强度相当, 表明层状降水云中在这些高度内呈均匀分布, 5 km 高度附近图 7d、图 8c 中 $Z_{\max}$ 与 $Z_{\min}$ 出现明显的不一致, 是 0℃ 层亮带导致(图 4a 所示), 粒子融化加大了回波强度垂直变化。图 8d 中 SA 雷达与 C-FMCW 雷达间差异加大可能是由于探测空间内云的充塞程度不同所致。

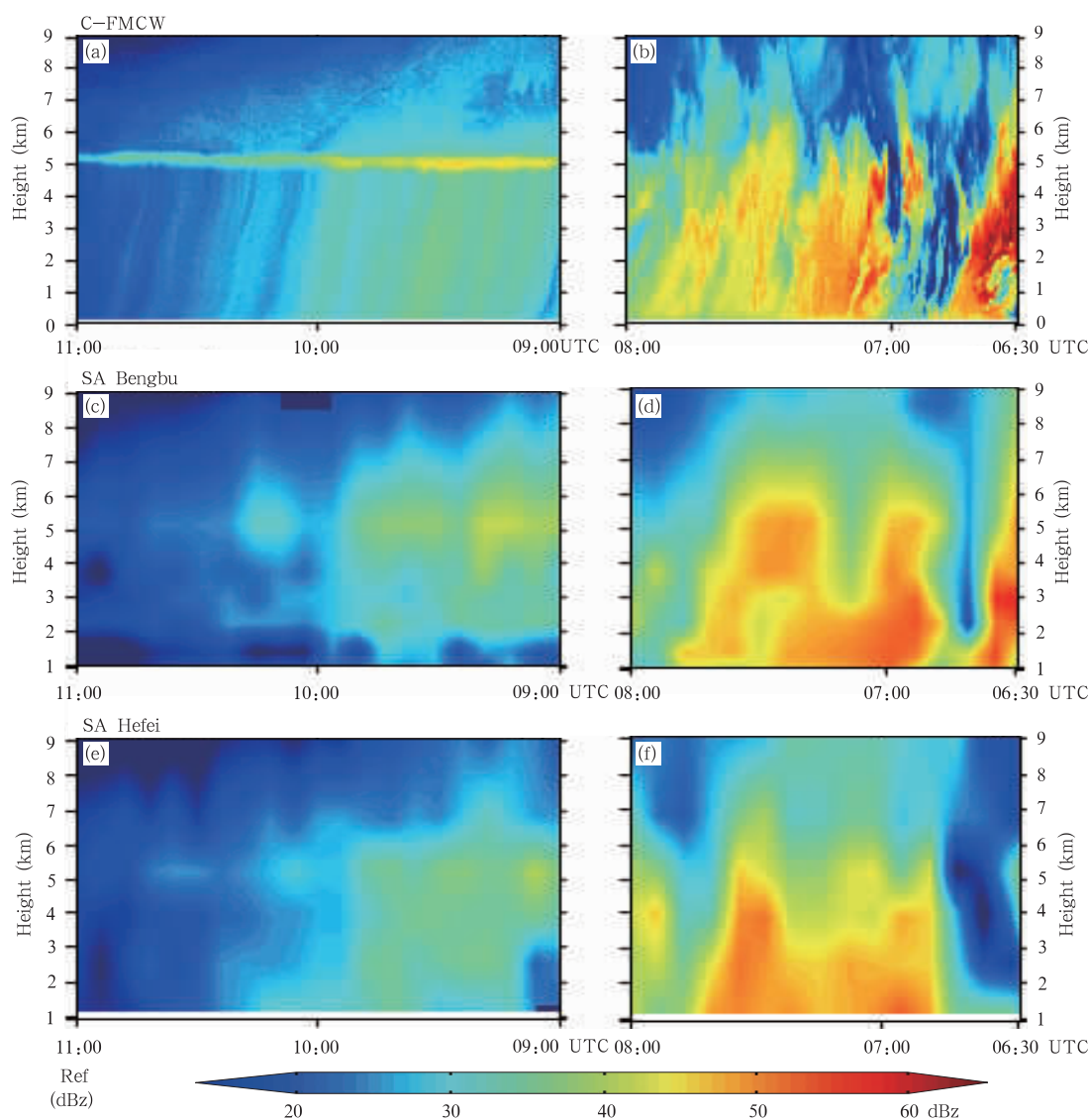


图4 降水云结构回波强度随时间的变化

(a. C-FMCW 层状云, b. C-FMCW 对流云, c. 蚌埠 SA 层状云,
d. 蚌埠 SA 对流云, e. 合肥 SA 层状云, f. 合肥 SA 对流云)

Fig. 4 Reflectivity time-height section for the stratiform and convective cloud from the C-FMCW and SA radar (a. C-FMCW stratiform, b. C-FMCW convective cloud, c. Bengbu SA stratiform, d. Bengbu SA convective cloud, e. Hefei SA stratiform, f. Hefei SA convective cloud)

利用 C-FMCW 雷达与 SA 雷达探测水平分布均匀的层状降水云数据,对图 7、图 8 中 SA 雷达 4 个仰角高度范围内 C-FMCW 雷达所有距离单元数据计算了平均回波强度 Z_{mean} , C-FMCW 雷达与蚌埠雷达匹配数据为 21 个、合肥雷达为 48 个;由 SA 雷达扫描波束在定远上空探测的时间节点提取 C-FMCW 雷达参与计算的数据进行时间匹配。

图 7 中 C-FMCW 雷达在 4 个仰角高度范围 Z_{mean} 为 16.5—45.5 dBz、蚌埠 SA 雷达回波强度分布在

18.0—41.5 dBz,两部雷达探测的 Z_{max} 相差 4 dB。融化过程导致 5.9°仰角高度处的均方根误差偏大,为 2.7 dB, C-FMCW 雷达与蚌埠 SA 雷达在其他 3 个高度上最大均方根误差为 1.53 dB、平均为 1.43 dB,最大绝对差为 0.80 dB、平均为 0.43 dB。对 4 个仰角 80 组数据的比对分析, C-FMCW 雷达与蚌埠 SA 雷达数据的平均均方根误差为 1.75 dB,探测回波强度比蚌埠 SA 雷达偏高 0.43 dB。

图 8 中合肥 SA 雷达回波强度出现在 15.5—

39.0 dBz、C-FMCW 雷达 Z_{mean} 出现在 15.1—46.1 dBz,两部雷达探测的 Z_{max} 相差约 6 dB。SA 雷达高仰角探测波束空间内回波充塞不完全导致回波强度偏低,5.9°仰角高度处 C-FMCW 与 SA 回波强度的均方根误差为 2.07 dB,同样融化过程使得 4.2°仰角高度处 C-FMCW 与 SA 回波强度的均方根误差最大,为 2.48 dB,其他两个仰角的均方根误差分别为 1.61、1.90 dB。对 4 个仰角 80 组数据的对比分析,C-FMCW 雷达与合肥 SA 雷达数据的平均均方根误差为 2.02 dB,探测回波强度比合肥 SA 雷达偏高不到

1 dB。

5 初步分析

C-FMCW 雷达于 2013 年 6—8 月在安徽定远开展了探测试验,期间共出现 6 次降水过程,获得了层状云、对流云、混合不同性质的降水云体共 55620 次探测数据,高时空分辨率的回波强度、垂直速度和速度谱宽等谱参数垂直廓线为研究降水云体垂直结构及演变提供了基础,回波强度谱密度的垂直分布可用于研究降水云中的微物理过程和机理。

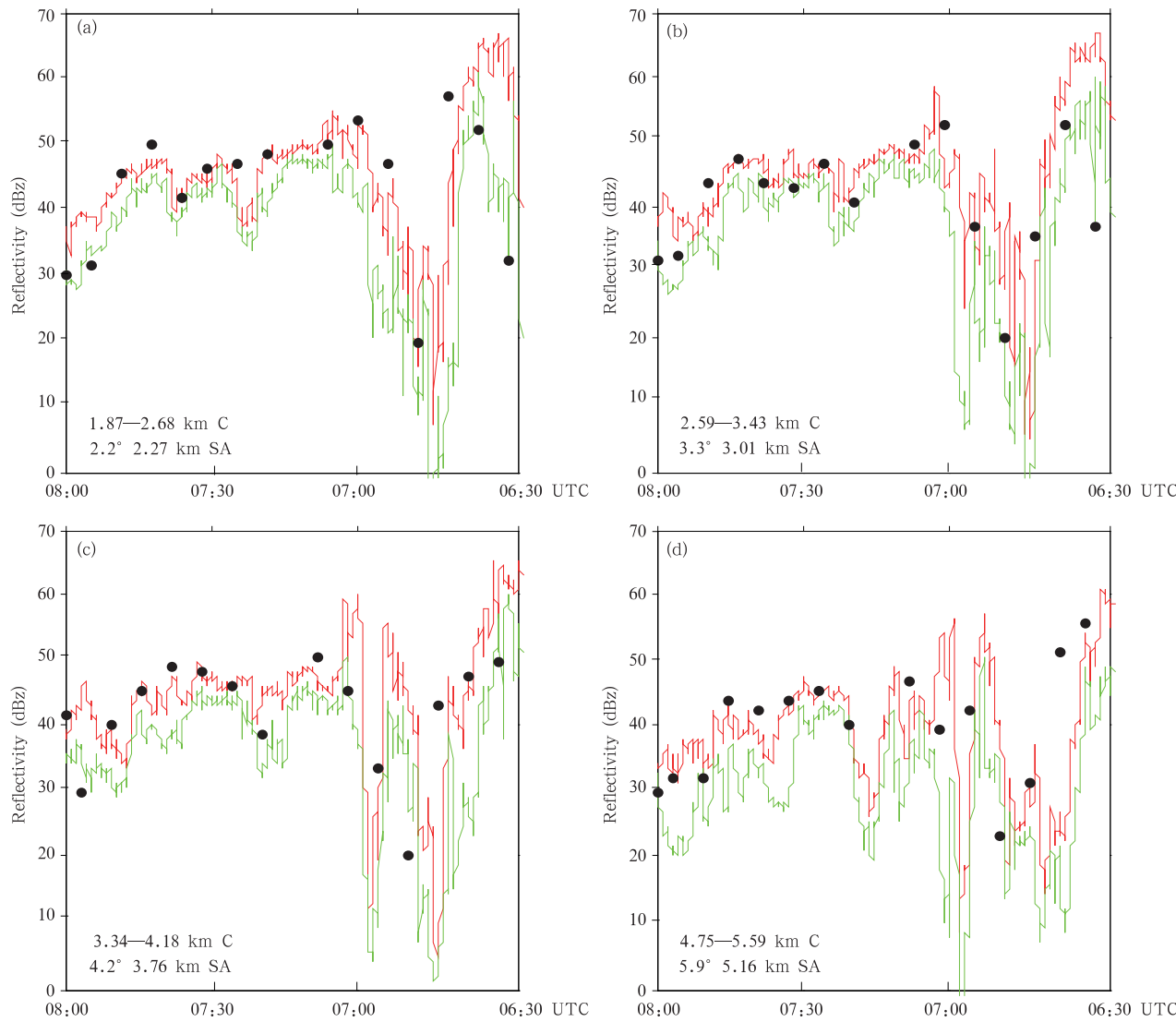


图 5 蚌埠 SA 雷达与 C-FMCW 雷达对流云探测的比对

(C-FMCW: Z_{max} 红线, Z_{min} 绿线; SA 雷达: 黑色实心圆)

Fig. 5 Comparison between C-FMCW and SA at Bengbu for the convective cloud

(C-FMCW: Z_{max} , red line, Z_{min} , green line; SA: black solid circle)

5.1 谱分布特征识别冰水混合区

固态粒子与液体粒子共存时谱分布特性与单一相态谱分布特性差异较为明显,可以用来确认亮带区即混合相态区,对图 1a 中谱参数进行了亮带结构识别,将亮带顶部、底部高度绘制在图 1b 中,亮带区是层状降水云中的冰水混合区,其上为固态粒子区,其下为液态粒子区(黄钰等,2011)。图 1b 中回波强度谱密度垂直分布清楚地表现出混合区的谱分布特征,固态降水粒子区速度谱分布范围较窄,粒子下降速度小;进入冰水混合区后冰相与液相粒子共存造成谱分布迅速变宽,粒子融化过程中的碰撞冲并、吸附以及

破碎等过程造成的粒径分布广泛,粒子融化吸热引起环境温度变化造成的微尺度环流也加大了谱展宽。亮带区之下为液体降水粒子区,此高度区基本无固态粒子,主要反映雨滴的谱分布特征,谱分布宽度比混合区小、比冰晶雪花谱分布大,随着高度下降,受大气环境密度影响雨滴下降速度略有降低。

图 9b 为 2013 年 7 月 4 日降水过程 20 时 25 分至 22 时的 C-FMCW 探测回波强度随时间的变化,图 9c 为地面分钟雨量,图 9b 中层状云 0°C 层高度在 5 km 上下,在 20 时 35 分至 21 时 15 分时段有对流泡体出现,对流强盛时期 40 dBz 回波强度发展高度达到

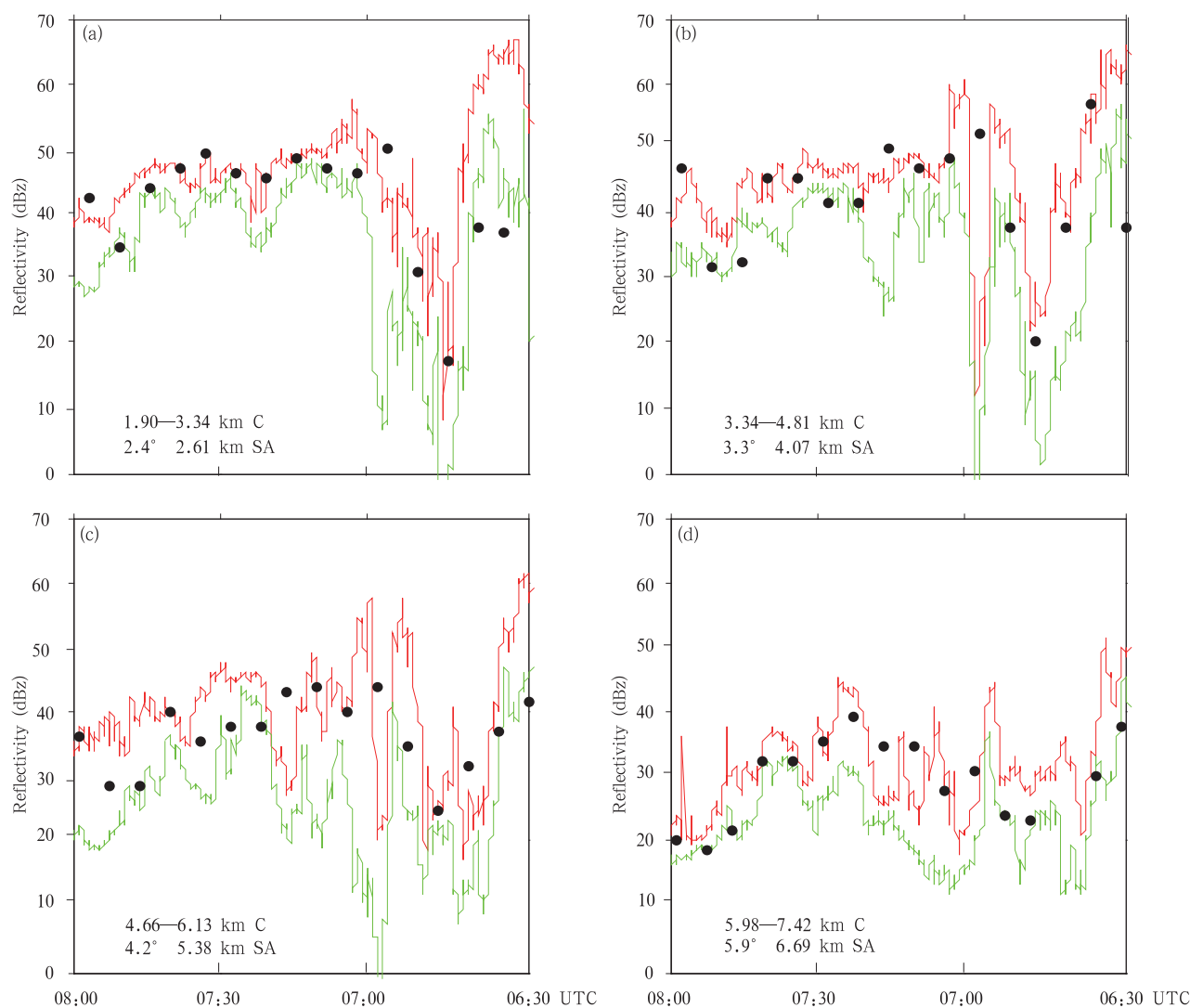


图 6 合肥 SA 雷达与 C-FMCW 雷达对流云探测的比对
(C-FMCW: $Z_{\max}$ 红线, $Z_{\min}$ 绿线; SA 雷达: 黑色实心圆)

Fig. 6 As in Fig. 5 but for Hefei

10 km,弱对流阶段 40 dBz 回波高度达到 6 km。图 9a 给出几个典型的回波强度谱密度垂直分布和混合区的高度范围。稳定的层状降水云,粒子融化过程在厚度约为 1 km 的高度内完成(图 9a₁、a₃、a₅);当有对流出时,大气环境扰动增加了混合相态粒子区厚度,谱分布宽度也随高度变化明显,图 9a₂ 混合相态区范围延伸到 3.5—10 km、厚度接近 6.5 km,图 9a₄ 混合区范围延伸到 4.5—7 km、厚度约为 2.5 km。值得注意的是固态粒子进入混合区后谱分布向两侧伸展,表明混合区中较强的空气上升运动将液态粒子抬升到较高高度;粒子从混合区进入液态降水区的高度

则低于 0℃层所在高度,这是空气下沉运动的贡献;因此混合层厚度可以反映环境大气运动的对流程度。

混合区中水汽、冰晶、水滴三态共存,固态质点饱和水汽压低,液态饱和水汽压高,有利于水汽的凝结增长;固态质点下降速度慢,液态粒子下降速度快,大气对流运动造成混合层厚度增大,加强了粒子碰并、吸附增长过程,大粒径降水粒子数浓度增多使得地面降水强度加强。图 9b、c 中,地面降水强度在层状云降水阶段小于 0.1 mm/min、弱对流阶段约为 0.6 mm/min、对流阶段约为 1.0 mm/min,表明混合层的厚度与地面降水呈正相关。

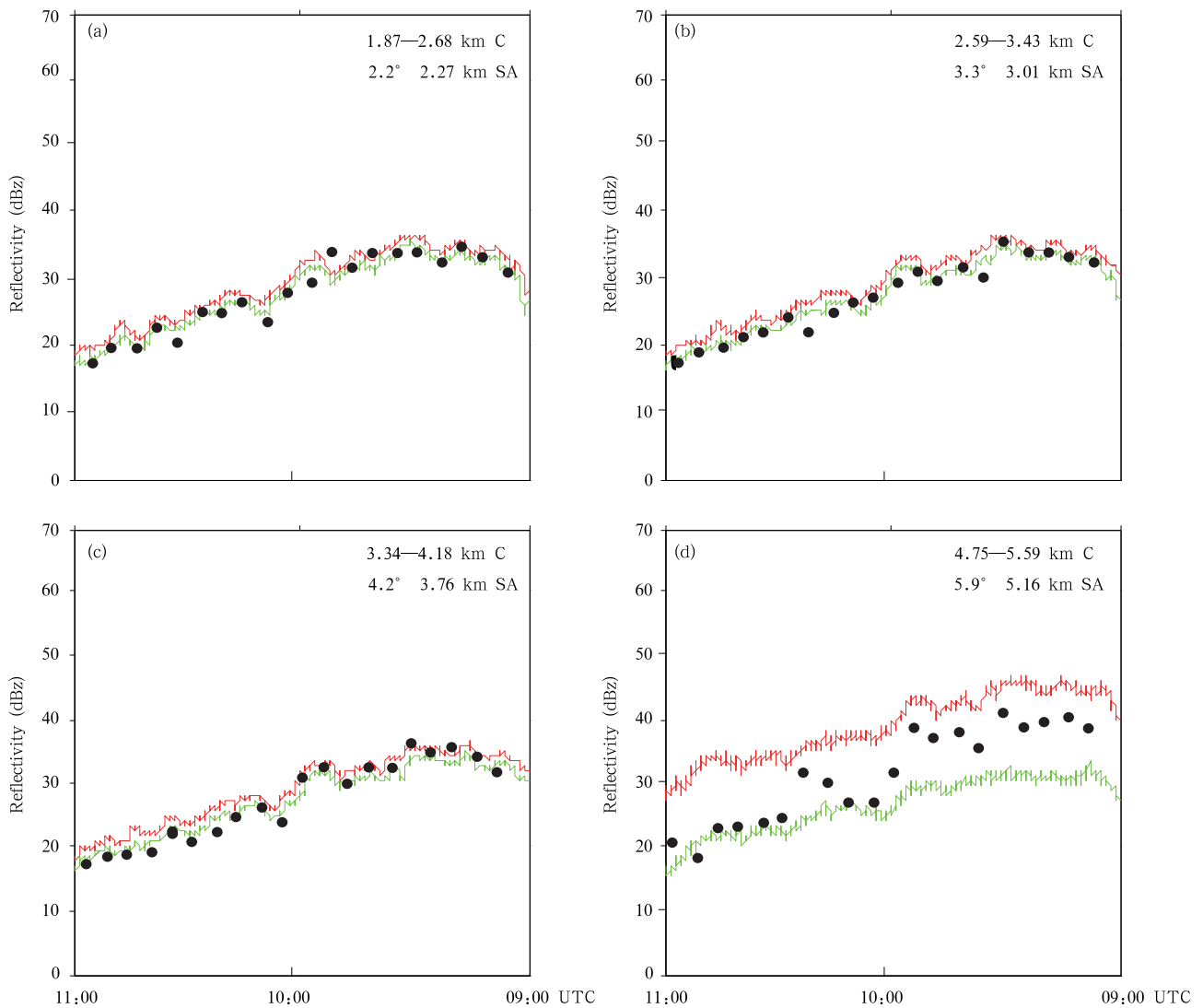


图 7 蚌埠雷达与 C-FMCW 雷达层状云探测比对
(C-FMCW: $Z_{\max}$ 红线; $Z_{\min}$ 绿线; SA 雷达: 黑色实心圆)

Fig. 7 As in Fig. 5 but for the stratiform cloud

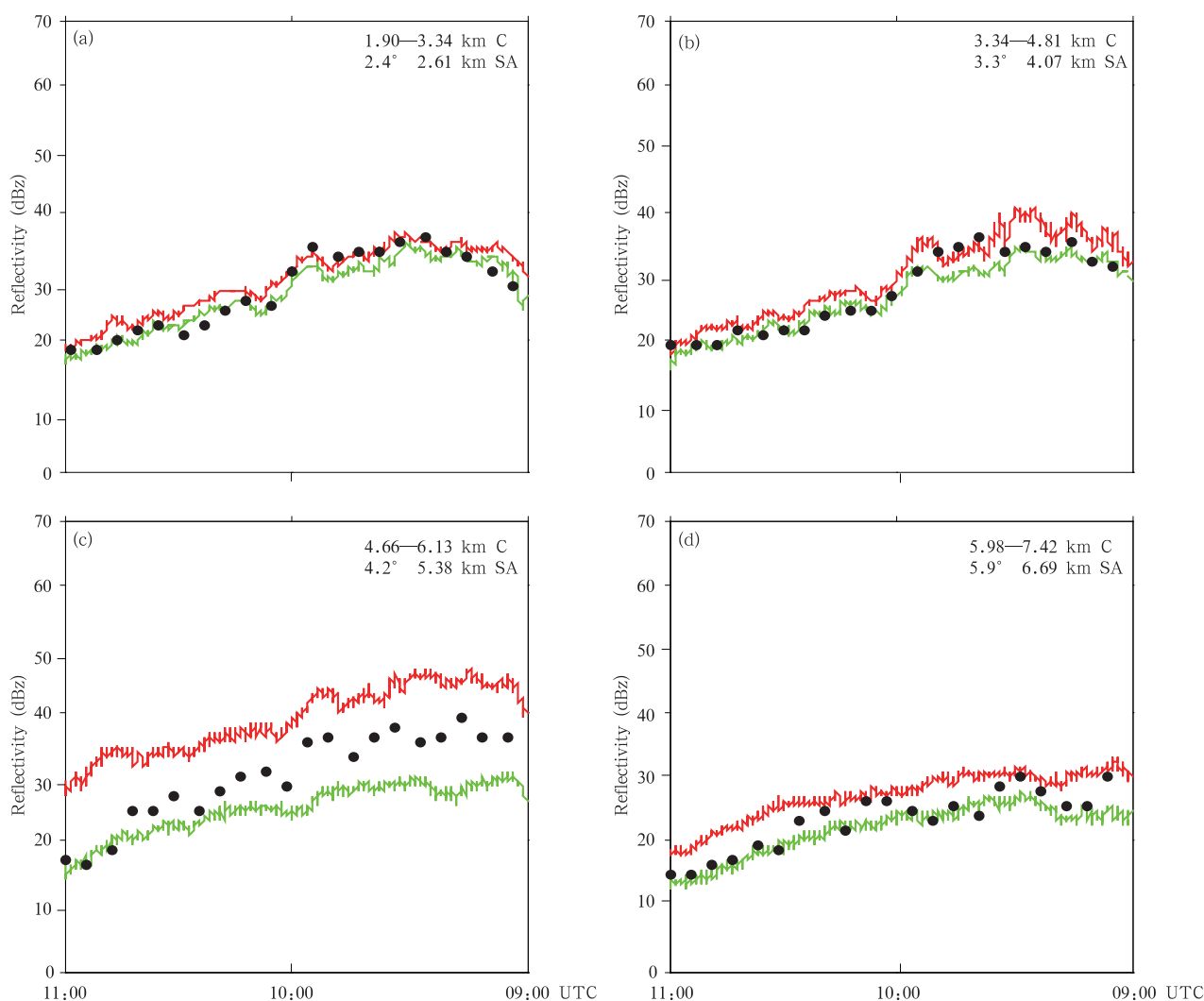


图8 合肥 SA 雷达与 C-FMCW 雷达层状云探测对比图

(C-FMCW: $Z_{\max}$ 红线; $Z_{\min}$ 绿线; SA 雷达: 黑色实心圆)

Fig. 8 As in Fig. 7 but for Hefei

5.2 晴空边界层回波

利用大气扰动的后向散射功率计算大气折射率结构常数 C_n^2 , 联合大气垂直运动和速度谱宽, 可以研究边界层大气晴空对流泡(何平等, 2012)和水汽累计(孙康远等, 2013)。C-FMCW 雷达接收机最小可测功率达到 -170 dBm, 雷达在 3 km 高度上可以探测到约为 -30 dBZ 的回波, 对 C_n^2 的强度探测能力为 $5 \times 10^{-15} (\text{m}^{-2/3})$; 与脉冲雷达相比, 灵敏度提高了 $30\text{--}40$ dB, C-FMCW 具有对晴空和云的探测能力, 可用来研究晴空大气边界层。

边界层内 C_n^2 对大气湿度变化更为敏感。图 10 为 2013 年 8 月 24 日强对流降水发生前后 C-FMCW

雷达谱参数随时间的变化, 根据地面降水时间划分晴空回波和降水回波谱参数输出时段, 图 10a 中 05 时—06 时 15 分的晴空回波用 $C_n^2 (\text{m}^{-2/3})$ 表示, 06 时 15—40 分为降水回波强度时段, 降水阶段垂直速度和速度谱宽分布范围均大于晴空时期(图 10b、c)。图 10b 中在强对流降水前期低层大气垂直上升与下沉运动交替出现, 时间周期约为 10 min, 表明垂直活动存在明显不均匀, 随着对流降水云体临近, 上升、下沉速度加强, 上升速度增大到 2 m/s, 上升运动将近地层的水汽向上输送, $C_n^2 (\text{m}^{-2/3})$ 在 $1, 2$ km 高度上出现了极值区(图 10a), 降水发生前的低层水汽辐合有利于其后强降水的发展与加强。

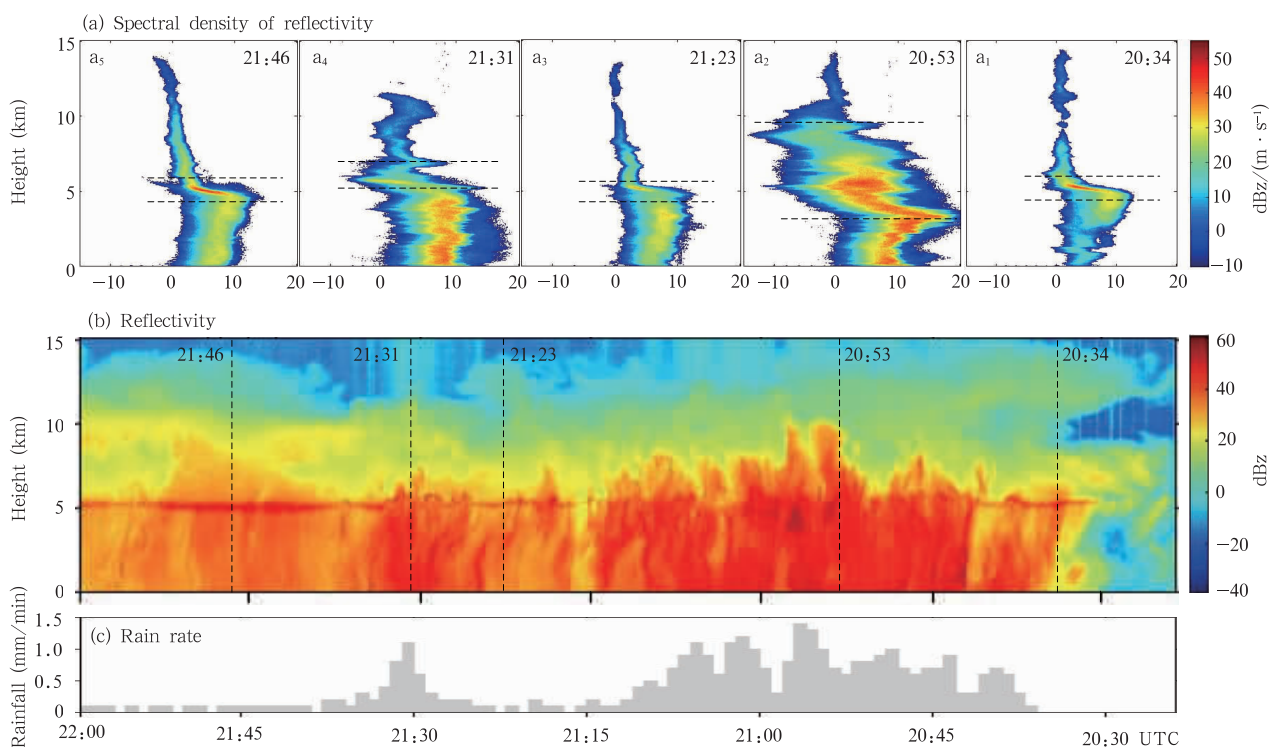


图9 2013年7月4日降水过程C-FMCW数据产品及地面雨量

(a. 回波强度谱密度分布, b. 回波强度时间变化, c. 地面分钟雨量)

Fig. 9 Products of C-FMCW and the rainfall in the precipitation event of 4 July 2013

(a. spectral density of reflectivity, b. time-height section of reflectivity, c. rain 1 min accumulative rainfall)

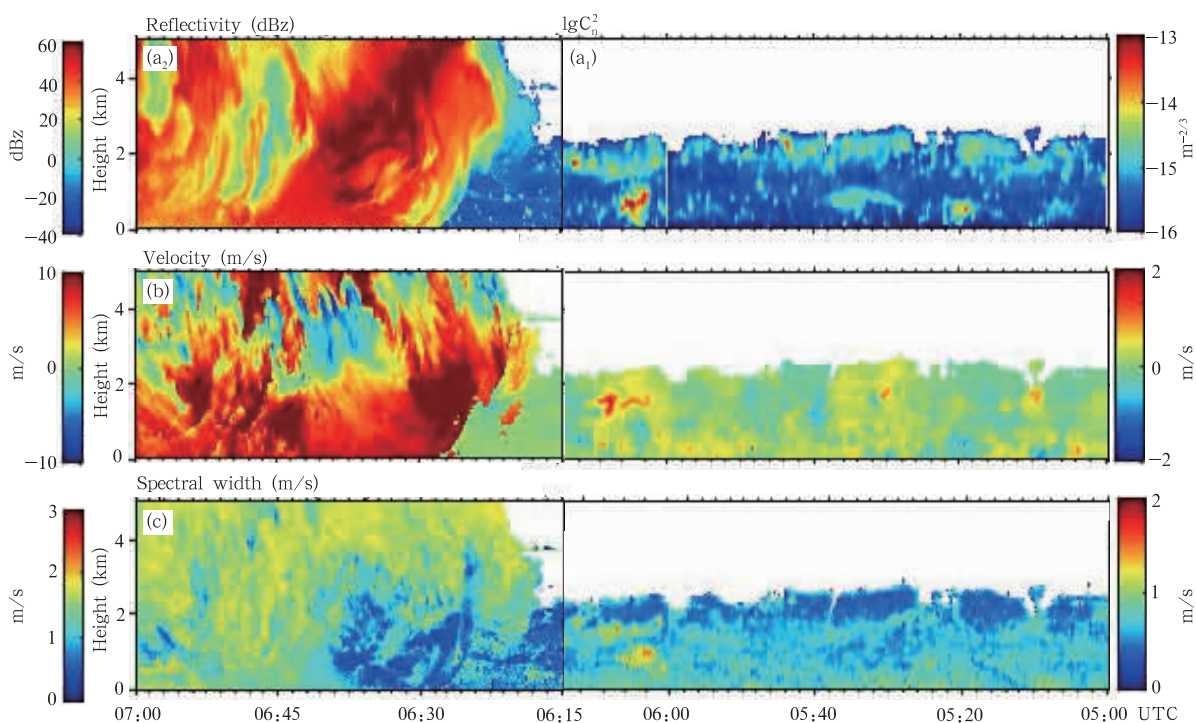


图10 2013年8月24日05时—06时40分C-FMCW晴空及降水谱参数的时间变化

(a₁. $\lg C_n^2$, a₂. 回波强度, b. 径向速度, c. 速度谱宽)

Fig. 10 Time-height section of C-FMCW radar products during 05:00–06:40 BT on 24 August 2013

(a₁. $\lg C_n^2$, a₂. echo intensity, b. radial velocity, c. speed width)

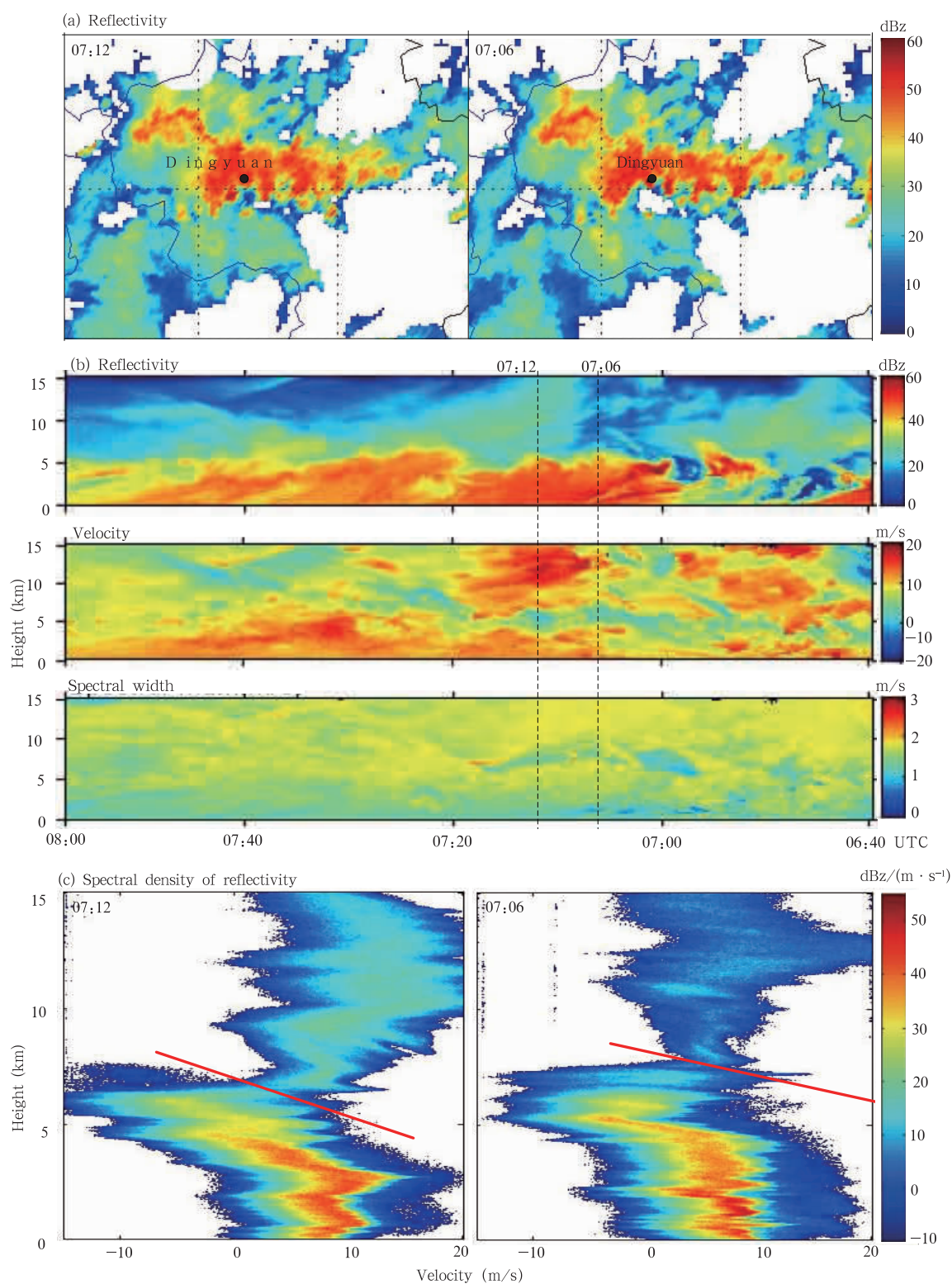


图 11 2013 年 8 月 24 日降水过程蚌埠 SA 雷达和 C-FMCW 探测产品

(a. SA 回波强度, b. C-FMCW 雷达时序, c. 回波强度谱密度分布)

Fig. 11 Products of Bengbu SA radar and C-FMCW radar on August 24, 2013

(a. reflectivity of Bengbu SA Radar, b. time-height section of C-FMCW radar, c. spectral density of reflectivity)

5.3 高空“下击暴流”

C-FMCW 可以描述降水云的精细垂直结构和快速演变特征,谱参数和谱分布的协同分析,有助于深入认识云中的水汽与动力过程。

图 11b 为 C-FMCW 雷达 2013 年 8 月 24 日 06 时 40 分—08 时谱参数随时间的变化,07—08 时 77.4 mm/h 的降水强度为定远当年最强降水。图 11a 中蚌埠 SA 雷达 07 时 06 分、12 分的组合反射率因子,图中定远位于雷达回波前端。

图 11b 中 C-FMCW 雷达探测的云体高度发展到 15 km,但是强回波主要出现在 5 km 高度之下;图 11b 的径向速度时序图上,在 5—7 km 高度附近出现明显的上升速度,最大为 10.6 m/s,在其下方较强的下沉速度与回波强度的分布趋势一致;上升速度区之上出现强的下沉运动,最大为 20.6 m/s,而回波强度图上则表现为弱回波区。这种强的下降速度在此称为高空“下击暴流”。

上升和下沉运动的强烈变化在回波强度谱分布中的表现更加清晰。图 11c 两个时次回波强度谱的垂直变化过程在 7 km 高度附近均出现了从 10 m/s 到 -10 m/s 的转折(图中红线),这两种向上连续延展和向下连续延展的谱分布分别代表了不同物理属性的粒子群运动;垂直径向速度受降水粒子下降运动与大气垂直运动共同影响,强回波强度主要出现在 5 km 以下,上部强下降速度谱分布反映了来自高空的强烈下沉,这种下沉运动在雷达回波主体前缘表现更为剧烈,可能是回波主体高空向前伸展的卷积云中冰晶雪花下降时的升华强烈吸热造成周围空气急剧变冷和下沉运动加强,类似于雪幡形成的物理过程。这种现象在 2014 年广东阳江的季风爆发前观测试验中也有发现。

6 结 语

(1)C-FMCW 雷达是对返回信号功率谱密度分布中的单根谱线进行定标,其单根谱线的噪声功率仅为 -170 dBm,对微弱信号定标是技术难点。采用数字直接移相技术,将测试信号源输出信号扩张为扫频信号,再由快速傅里叶变换对扫频信号解调,变化信号输入功率带宽,降低输入信号功率约 30 dB,实现了对大气返回微弱信号的定量标校。

(2)对 2013 年 8 月 24 日的降水过程的 C-FMCW 与蚌埠、合肥 CINRAD/SA 雷达进行了数据比对。3

部雷达对层状降水云的探测结果基本接近,剔除低层地物干扰和 0℃层的影响,与蚌埠 SA 雷达一个扫描仰角 0.63 km 探测空间内回波强度均方根误差平均为 1.75 dB,与合肥 1.45 km 一个波束探测空间的回波强度均方根误差平均为 2.02 dB;C-FMCW 雷达探测与蚌埠、合肥 SA 雷达探测回波强度平均差小于 1 dB,表明 C-FMCW 雷达对降水云回波强度的探测结果合理。

(3)C-FMCW 雷达与 SA 雷达探测对流降水云回波强度变化趋势接近,C-FMCW 雷达可以给出对流降水云的快速演变和精细结构;与 SA 雷达相比,C-FMCW 雷达可以给出层状云 0℃层亮带中回波强度垂直变化和精准垂直结构。SA 扫描雷达远距离探测的波束展宽影响会低估强降水云体的回波强度,利用扫描雷达研究降水云体垂直结构需要考虑空间代表性对数据准确性的影响。

(4)2013 年 6—8 月安徽定远的观测试验对 C-FMCW 雷达探测优势有了初步认识,回波强度谱密度分布为研究降水云中的微物理参数、分析降水云中的微物理过程提供了很好的手段;C-FMCW 对微弱信号和降水云的探测能力,可以追踪晴空大气、云和降水云发展演变过程;对降水云体中多参数与谱分布的联合分析,可以发现和解释降水形成过程中的一些现象和物理过程。

今后尚需要联合其他遥感设备以及地面雨滴谱观测数据,对 C-FMCW 雷达数据进行深入分析研究。

参考文献

- 何平,马颖,阮征等. 2010. 晴空热对流泡的风廓线雷达探测研究. 气象学报, 68(2): 264-269. He P, Ma Y, Ruan Z, et al. 2010. Study of thermal bubbles in the lower atmosphere based on the data detected using wind profiler radar. Acta Meteor Sinica, 68(2): 264-269 (in Chinese)
- 黄钰,阮征,葛润生等. 2011. 风廓线雷达探测零度层亮带的试验研究. 高原气象, 30(5): 1376-1383. Huang Y, Ruan Z, Ge R S, et al. 2011. Study on bright band detection using wind profiler radar. Plateau Meteor, 30(5): 1376-1383 (in Chinese)
- 斯科尔尼克 M I. 1978. 雷达手册. 北京: 国防工业出版社, 7-5-7-38. Skolnik M I. 1978. Manual of Radar. Beijing: National Defence Industry Press, 7-5-7-38 (in Chinese)
- 孙康远,阮征,魏鸣等. 2013. 风廓线雷达反演大气比湿廓线的初步试验. 应用气象学报, 24(4): 407-415. Sun K Y, Ruan Z, Wei M, et al. 2013. Preliminary estimation of specific humidity profiles with wind profile radar. J Appl Meteor Sci, 24(4): 407-415 (in Chinese)

- Chinese)
- 仲凌志, 刘黎平, 葛润生等. 2011. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究. 气象学报, 69(2): 352-362. Zhong L Z, Liu L P, Ge R S, et al. 2011. A study of the calibration of the new generation of millimeter-wavelength cloud radar (HMBQ) and its detection capability. Acta Meteor Sinica, 69(2): 352-362 (in Chinese)
- 钟刘军, 阮征, 葛润生等. 2010. 风廓线雷达回波信号强度定标方法研究. 应用气象学报, 21(5): 598-605. Zhong L J, Ruan Z, Ge R S, et al. 2010. Calibration method of echo intensity of wind profile radar. J Appl Meteor Sci, 21(5): 598-605 (in Chinese)
- Bennett L J, Weckwerth T M, Blyth A M, et al. 2010. Observations of the evolution of the nocturnal and convective boundary layers and the structure of open-celled convection on 14 June 2002. Mon Wea Rev, 138(7): 2589-2607
- Eaton F D, McLaughlin S A, Hines J R. 1995. A new frequency-modulated continuous wave radar for studying planetary boundary layer morphology. Radio Sci, 30(1): 75-88
- Gossard E E, Snider J B, Clothiaux E E, et al. 1997. The potential of 8-mm radars for remotely sensing cloud drop size distributions. J Atmos Oceanic Technol, 14(1): 76-87
- Ince T, Frasier S J, Muschinski A, et al. 2003. An S-band frequency-modulated continuous-wave boundary layer profiler: Description and initial results. Radio Sci, 38(4): 1072, doi: 10.1029/2002RS002753
- Lerach D G, Rutledge S A, Williams C R, et al. 2010. Vertical structure of convective systems during NAME 2004. Mon Wea Rev, 138(5): 1695-1714
- Melchionna S, Bauer M, Peters G. 2008. A new algorithm for the extraction of cloud parameters using multipeak analysis of cloud radar data-First application and preliminary results. Meteor Z, 17(5): 613-620
- Peters G, Fischer B, Andersson T. 2002. Rain observations with a vertically looking Micro Rain Radar (MRR). Boreal Environ Res, 7(4): 353-362
- Rajopadhyaya D K, May P T, Vincent R A. 1993. A general approach to the retrieval of raindrop size distributions from wind profiler Doppler spectra: modeling results. J Atmos Oceanic Technol, 10(5): 710-717
- Richter J. 1969. High-resolution tropospheric radar sounding. Radio Sci, 4:1261-1268
- Sekelsky S M, Ecklund W L, Firda J M, et al. 1999. Particle size estimation in ice-phase clouds using multi frequency radar reflectivity measurements at 95, 33, and 2.8 GHz. J Appl Meteor, 38(1): 5-28
- Stokes G M, Schwartz S E. 1994. The Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program: Programmatic background and design of the cloud and radiation test bed. Bull Amer Meteor Soc, 75(7): 1201-1221
- White A B, Jordan J R, Martner B E, et al. 2000. Extending the dynamic range of a S-band radar for cloud and precipitation studies. J Atmos Oceanic Technol, 17(9): 1226-1234

更正

勘误:本刊 2015 年第 2 期 242 页右侧第二行的“图 5j”应为“(图 5i)”,特此更正!

《气象学报》编辑部