

用机载多普勒雷达资料进行 三维风场解析反演

II. 多重解析多普勒方法应用于在 CaPE 现场 实验中获取的机载雷达实测资料

窦贤康

(中国科学技术大学, 合肥 230026)

G. Scialom Y. Lemaitre

(Centre de Recherches en Physique de l'Environnement Terrestre et
Planetaire, CNET / CNRS Issy-les-Moulineaux, France)

摘 要 模拟结果证明, 在机载雷达的技术参数下, 多重解析多普勒 (MANDOP) 方法能够提供误差可以接受的三维风场反演。1991年夏在美国的佛罗里达州举行的 CaPE 现场实验中首次应用了机载双束多普勒雷达, 并获取了珍贵的雷达实测资料。用 MANDOP 方法分析 1991年8月9日观测到的一个飑线, 取得类似于以往用地基雷达资料得到飑线内部大气环流结构。另外, 机载雷达资料与地基雷达资料联合反演的结果与纯粹用机载雷达资料反演的结果之间很好的相关性证明了机载雷达资料的可靠性。

关键词 CaPE 实验 机载双束多普勒雷达 多重解析多普勒方法 三维风场

1 引言

1991年夏在美国佛罗里达州举行了 CaPE (Convection and Precipitation / Electrification) 实验。这个实验的一个最大的特点是, 一个类似于 ASTRAIA / ELDORA 雷达的双束雷达系统被安装在美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的 P3 飞机上, 用来替代原来的单束雷达。这是大气探测历史上首次应用机载双束多普勒雷达系统进行现场实验。本文的第一部分说明了机载雷达和地基雷达相比所具有的优越性^[1], 所以我们应用机载雷达的实测资料来研究观测到的飑线的运动特征。关于飑线特性, 在文献[2~10]中主要用地基雷达资料进行的研究指出, 虽然飑线每一个都不尽相同, 但他们之间还是存在一些共同特点: 在其运动前沿有一股上升气流; 在下边界层有暖湿空气进入飑线; 有低位温的干燥空气从后中部向底层作下沉运动, 并尾部存在一个回流^[11]。

本文的这一部分把经过模拟数据检验证明解析反演 MANDOP 方法推广处理 CaPE 实验机载雷达实测资料。第二节将首先介绍一下 CaPE 实验的科学目标、应用的

1996-01-02 收到, 1996-06-09 收到修改稿

* 本文得到国家基础性研究重大关键基金资助

仪器设备等。在 CaPE 实验的 4 天的观测中观测到 3 个飑线, 这里我们重点研究 8 月 9 日所观测到飑线。第三节分析线的周围环境资料的预处理及平流速度校正等。第四节应用双束多普勒雷达获得的资料以及其和地基雷达资料联合进行三维风场反演。

2 CaPE 实验

由许多美国的科研机构 and 大学 (如 NASA、NOAA、科罗拉多大学、佛罗里达大学等) 组织的 CaPE 实验于 1991 年夏在美国的佛罗里达州中东部举行。法国国家科研中心的地球和行星际环境研究中心作为双束天线系统的提供者也参加了这次实验。这次实验的科学目标为明确对流云内部风、降水以及电场之间的关系, 发展 2~12 h 风、风暴等的数值天气预报, 等等。为了实现这些科学目标, 应用了相当规模各类仪器 (见图 1), 其中包括: (1) 地基雷达 CP-2、CP-3、CP-4; (2) 2 架 King Air、1 架 T28、1 架 ER2, 以及 1 架装备双天线多普勒雷达的美国国家大气和海洋管理局的 P3 飞机; (3) 47 个地面 PAM (便携式自动中尺度网), 用来记录压力、温度、湿度等参数; (4) 6 个无线电探空站。

法国国家科研中心的地球和行星际环境研究中心参与 CaPE 实验的目的在于试验新型双天线系统多普勒雷达。实验中, 从 1991 年 8 月 5 日到 1991 年 8 月 12 日, 装备这种雷达的 P3 飞机总共进行了 30 h 的飞行。这些飞行有着 3 个目标:

(1) 试验双天线系统多普勒雷达对风场的测量并验证立体雷达方法^[12]对衰减了的反射率的订证; (2) 测量对流系统的动力学及热动力学的特征物理量; (3) 研究云中微物理及电过程。本文主要关心风场的测量, 以及在三维风场反演基础上进行运动学研究。

3 个例选择

我们选择 8 月 9 日这天观测到的飑线进行研究基于两个原因。一方面, 地基雷达观测到的反射率和机载雷达观测到的反射率有很好的相关性。另一方面, 观测到的系统是一个具有典型特征的对流系统。这天, 大约在 20:00 UTC (协调时世界, 下同), 对流云从西北方向肯尼迪空间中心靠近。装备有机腹雷达及尾翼双束多普勒雷达 (雷达的参

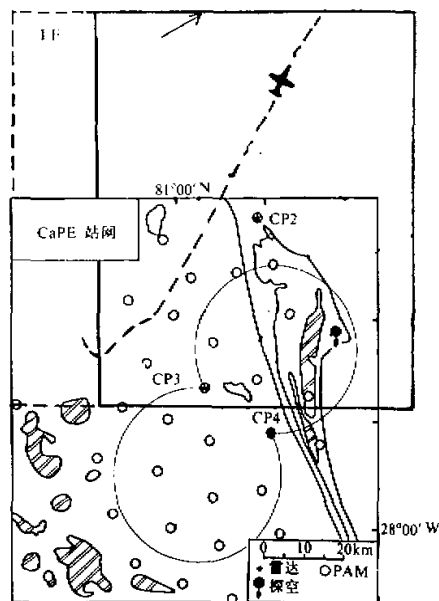


图 1 CaPE 实验的地面观测网
图中箭头所指方框区域是 MANDOP 的反演区域

表 1 机腹雷达及尾翼双束多普勒雷达技术参数

雷 达	机腹雷达	尾翼雷达
波长/cm	5.59	3.22
水平方向波束宽度	1.1°	1.35°
垂直方向波束宽度	4.1°	1.9°
脉冲重复频率/(脉冲个数/s)	200	160
歧义速度/(m/s)		12.88
最大功率/kW	70	60
天线增益/dB	37.5	40
最大有效距离/km	371	93

数见表 1) 的飞机 20:30 开始在对流系统的对流部分前面作了一个来回飞行观测飞行,接着穿入层状降水区,最后在混合降水区的对流区后部又进行一个来回飞行观测。图 2 的机腹雷达获取的反射率上同时给出了飞机的飞行轨迹。

由机腹雷达获取的反射率的结构清楚地表明了对流系统的结构、传播以及随时间的变化。从 20:30 到 20:45,对

流区带宽很窄,强降雨团的反射率很高,达 50 dBZ 以上,而且基本上是南北向。但从 20:45 到 21:45 这一小时中,对流区带宽变得越来越宽(21:30 可达 25 km),强降雨团尺度变得越来越小,其反射率也越来越低,而且对流带走向也变成西南东北走向。在 21:30 到 21:45 区间,那些高反射率的核已消失,对流部分开始与层状降水区混合,系统进入其消亡阶段。

在 21:15~21:30 期间,对流系统呈现一个典型的成熟阶段形状:(1)系统前部,一个宽约 25 km 的对流降水区;(2)系统后部,一个区域很大的层状降水区(反射率为 10~30 dBZ);(3)两者之间的“反射率洞”,由于机载雷达分辨率不是很高(垂直于地平面方向上为 4°)而表现得不很明显。“反射率洞”在随后的双束多普勒雷达反射率剖面图上可以看出。

3.1 大气状况分析

这里应用的是在肯尼迪空间中心(28°28'N, 80°33'W)释放的无线电探空资料。无线电探空仪释放的时间第一个为 10:15,第二个为 15:00,最后一个是在 22:25,前面两个记录了对流系统通过(约 20:00)前大气的状态,而最后一个则提供了对流系统通过后大气状态的信息。据此,我们观察到:

(1) 图 3a 显示 15:00 时存储于大气底层的湿静力能(H)在对流系统通过后传入高层。

(2) 图 3b 显示 15:00 时大气是不稳定的。距地面 2 km 以下大气只要其能被提升到 2 km 处就能满足产生自由对流的条件($H > H_s$)。

(3) 图 3c 显示 22:25 时大气重新变得稳定。底层大气即使被提升也无法满足产生自由对流的条件($H > H_s$)。

(4) 图 3d 清晰地表明了水汽从大气底部由于对流系统的通过而向上传输。对流系统通过后大气的比湿在 4~7 km 间达 100%。正是这些水汽的输送引起了对流系统内降水的形成。另外根据无线电探空测风资料,在对流系统后部(22:25)的冷空气区,1~4 km 间有一股非常强的前向气流,其最高速度达到 22 m/s,正是这股强冷空气流与系统前方的湿热空气相互作用形成了对流系统前沿的上升气流。

3.2 资料的预处理

由于尾翼双束多普勒雷达的歧义风速仅为 12.88 m/s,原始数据经 NOAA 的分析软件自动处理后,其中有一些径向风速的折叠效应订正有误,表现为同一网格内(尺度为 4 km × 4 km × 800 m)径向风速有高达 20 m/s 左右的差异。因此必须采取有效方法重

新加以订正。假设在同一网格内有 N 个正确的观测点, 其径向风速为 V_{r1} 左右。而另有 M 个点, 其径向风速由于折叠效应订正不当, 其值位于 V_{r2} 附近。此网格内径向平均速度及方差可求得。如果存在比较大的方差, 就说明此网格内有重要的折叠效应订正错

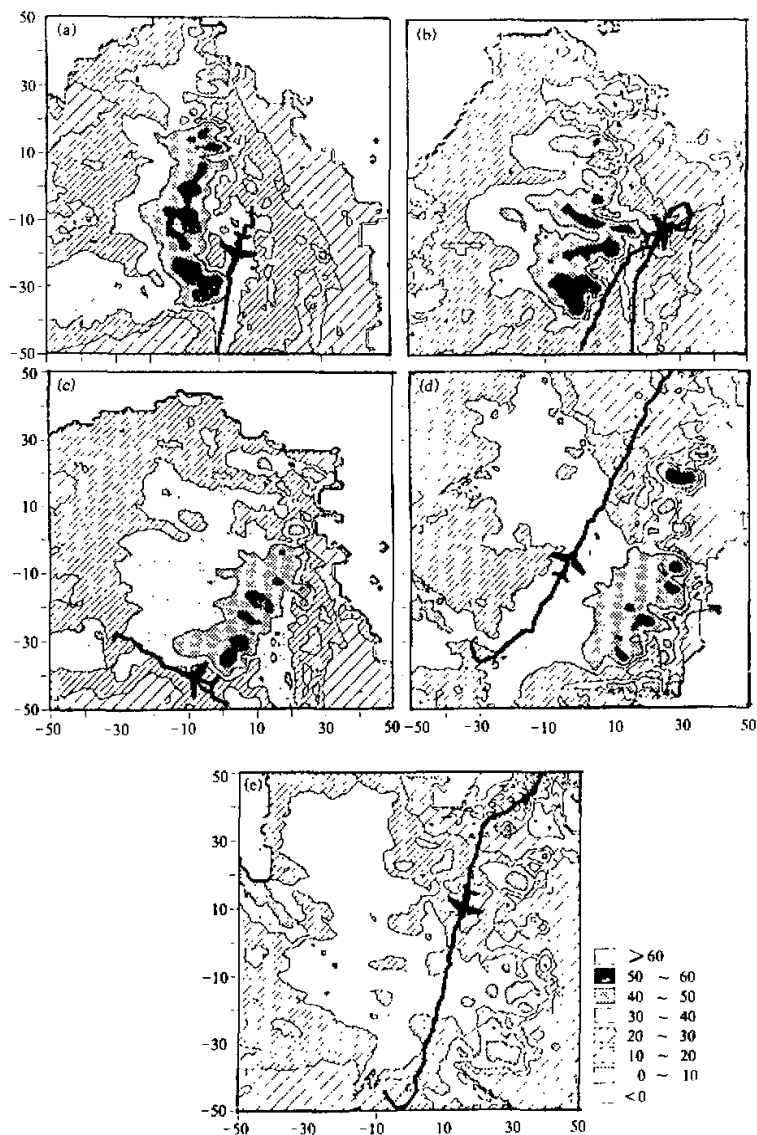


图2 机腹雷达获取的反射率

(a) 20:30~20:45; (b) 20:45~21:00; (c) 21:00~21:15;
(d) 21:15~21:30; (e) 21:30~21:45

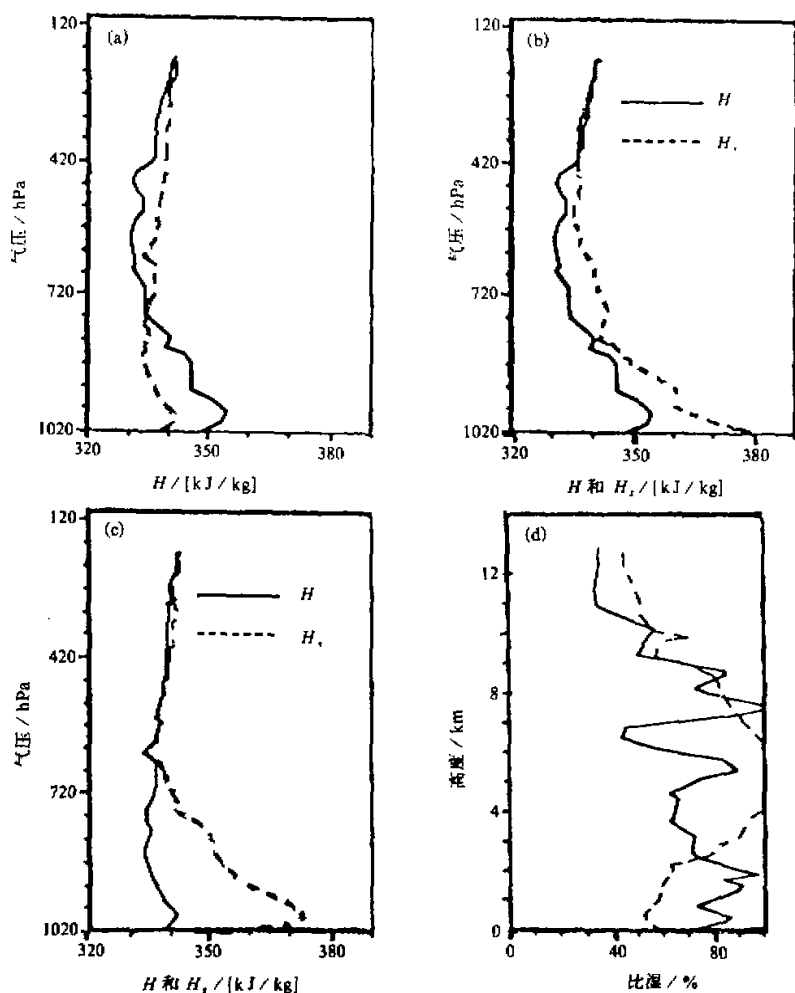


图3 (a) 湿静力能在 15:00~22:25 的廓线; (b) 15:00 峰面前湿静力能和饱和湿静力能廓线; (c) 22:25 峰面后湿静力能和饱和湿静力能廓线; (d) 比湿在 15:00~22:25 的廓线比较

误。那些径向速度偏离平均值超过给定阈值的点应被订正或删除。当然这样做的前提是在此网格中 $N > M$ ，也就是说大部分点的径向风速是正确的。为了防止在 $N < M$ 情况下，出现不仅没有改正出错径向风速，反而修正了那些正确的值。因此必须应用沿径向风速的连续性条件。这对于远离雷达区域资料的确认尤其必要。

3.3 平流速度的订正

根据 20:45~21:30 这 45 min 中雷达反射率结构的平移情况，可以近似地得出系统的平流速度为 6 m/s 向东，9 m/s 向南。另外雨滴的下落速度可用其与雷达反射率之

间的经验公式得出。

4 反演结果

资料经过精心的各种预处理后, MANDOP 被用来进行三维风场反演。反演的主要参数选取如表 2。

表 2 反演的主要参数

坐标零点	28°45'N, 80°54'W
坐标轴	X轴正向为东, Y轴正向为北, Z轴正向为上
反演区域	80 km × 80 km × 16 km
展开的级数	4

4.1 双束多普勒雷达资料反演

图 4a、b、c 显示的是高度为 1 km、4 m 及 8 km 高度上的双束多普勒雷达合成风

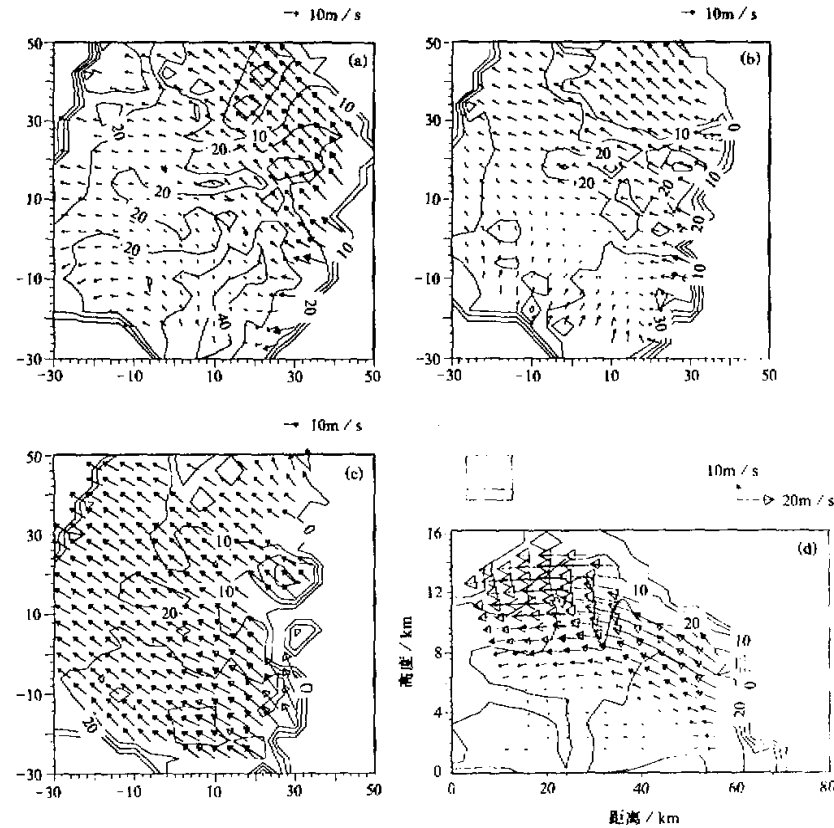


图 4 MANDOP 方法反演的风场
(a)、(b)、(c) 为水平剖面风场, 高度分别为 1、4、8 km; (d) 为一垂直剖面风场

甲 N 大气科学 97: 4

场和雷达反射率结构。考虑到两种雷达各自的空间分辨率,多普勒雷达反射率结构与前面机腹雷达所获得的相比很相似。观测资料是雷达在对流降水区后面观测所得。由于对流云团对信号的衰减,我们很难得到对流系统前沿更大范围内风场结构信息,但仍可看出在对流部分前部底层风场主要为东来的暖湿空气构成。当气流进入对流降雨区时,风速有明显的减弱。在 1 km 高度平面内水平风场有沿对流雨团两边分开之趋势。在高层 8 km 处,垂直方向的上升运动已大大减弱。风场比较均匀,为东南气流所控制。

如果取一基本上平行于系统前进方向的垂直剖面来研究(见图 4d),可以看到一个很典型的成熟结构。一股对流部分前方的暖湿入流与来自后方的冷空气流出相互作用,激发起强的上升气流。同时在尾部的底层 2 km 范围内有一股比较弱的回流存在。这两股气流应与强上升气流后部层状降雨区产生的中尺度下沉气流有关。据无线电探空测风仪所获资料推断此股下沉气流应在 6~4 km 层内由融化、蒸发等微物理过程形成。另外,上升气流后部厚达 3 km 的冷空气前向流应能够提升前面的暖湿空气,使得中尺度对流系统得以发展。

4.2 地基雷达和机载雷达资料联合反演

三维风场的反演需要至少两个独立的观测取样。这两个独立的观测取样即可由机载

雷达的两天线束获得,或由两个地基雷达获得,也可由一个地基雷达和机载雷达的一束天线获得(如果两者有着共同的观测区域的话)。MANDOP 反演对雷达的类型、取样扫描的格式没有什么特别的要求。CP4 雷达(参数见表 3)位于 80°44'8"W, 28°13'46"N,可与机载雷达形成一个共同的观测区域。此雷达在

表 3 CP4 雷达参数

雷达	CP4
波长/cm	5.49
波束宽度	0.9°
脉冲重复频率/(脉冲个数/s)	750~1667
歧义速度/(m/s)	10.3~22.9
最大功率/kW	1000
天线增益/dB	43.6

17:12~21:51 期间进行了观测,这个时间段包括上面研究的机载雷达观测时间段。这样可利用地基雷达 CP4 和机载雷达资料联合反演。因为地基雷达技术和资料已相对成熟和可靠。这种联合反演反过来又可以检验机载雷达资料的可靠性。

4.2.1 水平剖面风场

在所有高度,例如在 4 km 高度上(图 5),由 P3 飞机上双束多普勒雷达或由 P3 飞机上多普勒雷达加上 CP4、或由 P3 飞机一束前向雷达加上 CP4、或由 P3 飞机一束后向雷达加上 CP4 所获得的风场在风力的大小和方向上都呈现出很好的相关性。另外,地基雷达 CP4 的引入提供了对流南部的人流信息。

4.2.2 垂直剖面风场

如同水平风场,由 P3 飞机上双束多普勒雷达或由 P3 飞机上多普勒雷达加上 CP4 地基雷达、或由 P3 飞机一束前向雷达加上 CP4、或由 P3 飞机一束后向雷达加上 CP4 获得的垂直风场结构也呈现出相同的特征(图 6):在强反射率(>40 dBZ)上方有一股强劲的上升气流。在凝结高度以下,1~4 km 间,有中尺度下沉气流,同时在尾部的低层 2 km 范围内有一股比较弱的回流存在。另外,机载前向雷达和地基雷达联合反演的垂直分量在西部边缘和其他三种联合反演的结果有些不同。这可用几何上在这个区域前向雷达和地基雷达的波束几乎同向,没能很好地满足三维风场反演必须具备两个独立取

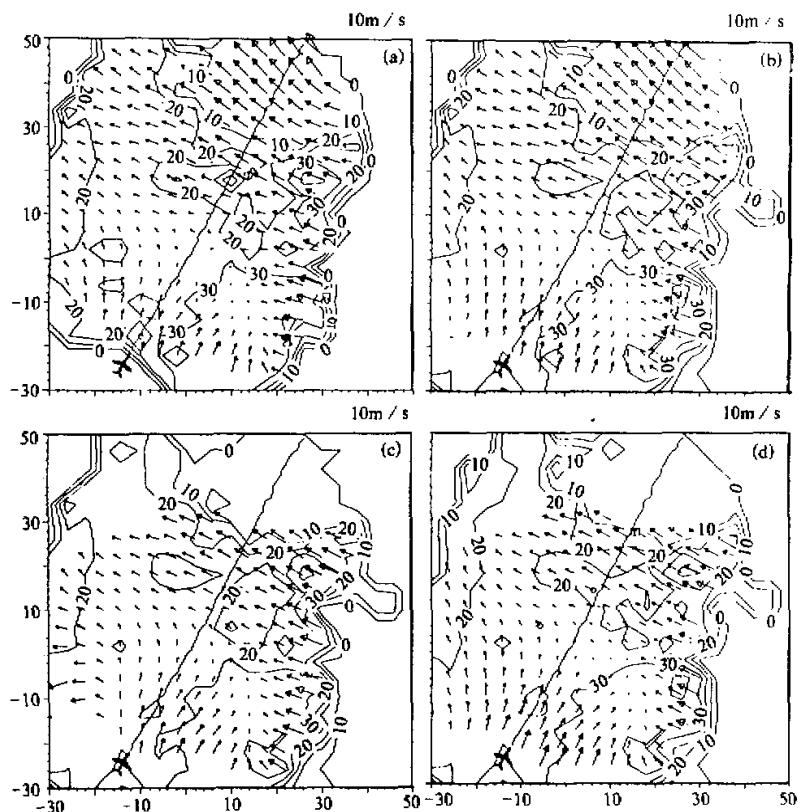


图5 高度为4 km的水平剖面风场

- (a) 双束多普勒雷达反演; (b) 双束多普勒雷达加CP4反演;
(c) 单束前向雷达加CP4反演; (d) 单束后向雷达加CP4反演

样来解释。

为了定量地显示四种联合反演的相关性。我们取 P3 飞机多普勒雷达反演结果作为参照, 计算其与 P3 飞机双束多普勒雷达加上 CP4 地基雷达、P3 飞机一束前向雷达加上地基雷达 CP4、P3 飞机一束后向雷达加上地基雷达 CP4 获得三维风场之间的均方差, 见图 7, 其数值为 1 m/s , 比 Hildebrand^[13] 获得的 2 m/s 左右的结果要好。这可由他们的机载雷达反演是由仅装备单束天线 P3 飞机的两个飞行轨迹联合反演而造成时间分辨率比较差来解释。

5 结论

1991 年夏在美国的佛罗里达州举行的 CaPE 现场实验中首次应用了机载双束多普勒雷达, 并获取了珍贵的雷达实测资料。我们应用经过模拟检验的 MANDOP 方法去

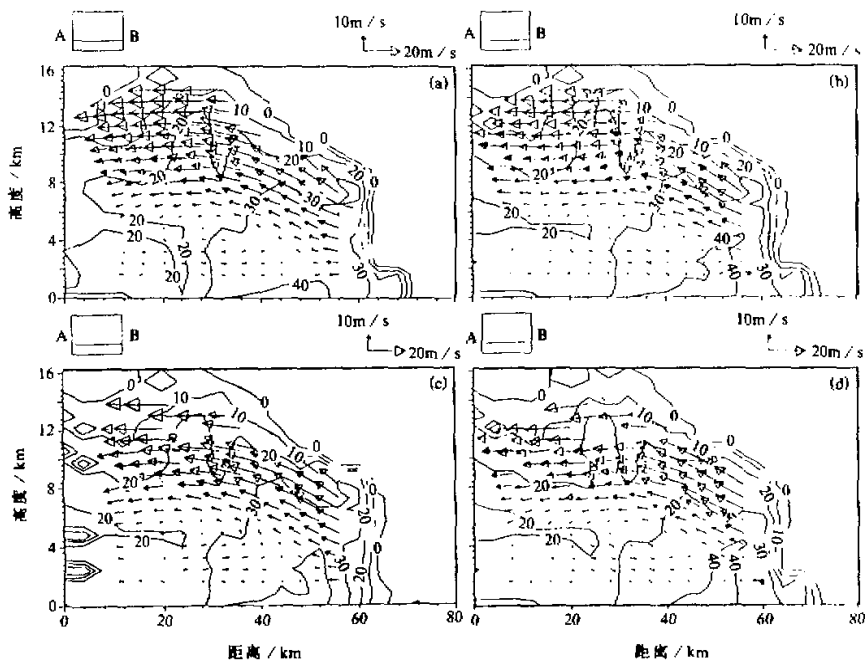


图 6 垂直剖面风场

(a) 双束多普勒雷达反演; (b) 双束多普勒雷达加 CP4 反演;
(c) 单束前向雷达加 CP4 反演; (d) 单束后向雷达加 CP4 反演

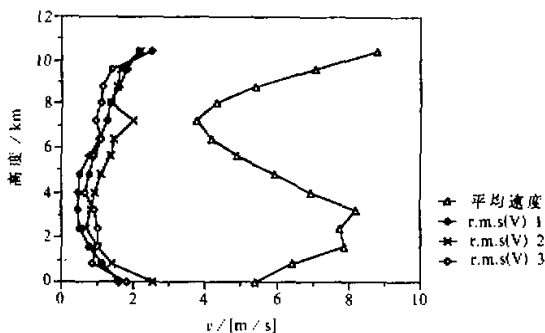


图 7 双束多普勒雷达反演结果与双束多普勒雷达加上 CP4 地基
雷达、单束前向雷达加上地基雷达 CP4、单束后向雷
加上地基雷达 CP4 获得的三维风场之间的均方差

研究 1991 年 8 月 9 日这天观察到的对流系统。由于机载双束天线多普勒雷达的歧义速度仅为 12.88 m/s , 分析过程中应充分注意有些数据可能存在折叠效应的订正误差。

MANDOP 方法反演的三维风场呈现了与以前研究相似的结构: 运动方向前部存

在一股强劲的上升气流; 同时在尾部的底层 2 km 范围内有一股比较弱的回流; 混合型降水的层状降雨区有中尺度下沉气流。另外, 因为地基雷达技术和资料已经相对成熟和可靠, 利用地基雷达 CP4 和机载雷达资料联合反演反过来检验了机载雷达资料的可靠性。

致谢: ELDORA / ASTRAIA 是一个法美合作的、有法国国家科学研究中心的地球和行星际环境研究中心及美国 NCAR 负责实施的机载双束天线多普勒雷达计划。法国方面, 国家空间研究中心 (CNES)、国家通讯科学研究中心 (CNET)、国家环境科学研究院 (INSU) 以及国家气象局 (METEO—FRANCE) 均提供了宝贵的经费支持; NOAA 的 Jorgensen 博士提供了肯尼迪空间中心无线电探空资料; 中国科学院大气物理研究所的陈洪滨博士阅读了本文的初稿, 提出了一些宝贵意见, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 窦贤康等, 1997, 用机载多普勒雷达资料进行三维风场解析反演, I. 多重解析多普勒方法在机载雷达情况下的推广及模拟验证, *大气科学*, 21(3), 348~356.
- 2 Betts, A.K., 1976, The thermodynamic transformation of the tropical subcloud layer by precipitation and downdrafts, *J. Atmos. Sci.*, 33, 1008~1020.
- 3 Zipser, E.J., 1977, Mesoscale and convective-scale downdrafts as distinct components of squall-line circulation, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1568~1589.
- 4 Houze, R.A., Jr., 1977, Structure and dynamics of a tropical squall line system observed during GATE, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1540~1567.
- 5 Leary, C.A. and R.A. Houze, Jr., 1979, The structure and evolution of convection in a tropical cloud cluster, *J. Atmos. Sci.*, 33, 520~529.
- 6 Lemaitre, Y., 1982, Etude dynamique et thermodynamique des lignes de grains tropicales observees a Korhogo pendant l'experience COPT 79, *J. Rech. Atmos.*, 16, 47~69.
- 7 Lemaitre, Y. and J. Testud, 1986, Observation and modeling of tropical squall lines observed during the COPT 79 experiment, *Annales Geophysicae*, 4, 21~36.
- 8 Gamache, J.F. and R.A. Houze, Jr., 1982, Mesoscale air motions associated with a tropical squall line, *Mon. Wea. Rev.*, 110, 118~135.
- 9 Roux, F., 1985, Retrieval of thermodynamic fields from multiple-Doppler radar data using the equations of motion and the thermodynamic equation, *Mon. Wea. Rev.*, 113, 2142~2157.
- 10 Chong, M., P. Amayenc, G. Scialom and J. Testud, 1987, A tropical squall line observed during the COPT 81 experiment in west-Africa. Part I: Kinematic structure inferred from dual-Doppler radar data, *Mon. Wea. Rev.*, 115, 670~694.
- 11 Ogura, Y. and M.T. Liou, 1980, The structure of a midlatitude squall line: A case study, *J. Atmos. Sci.*, 37, 553~567.
- 12 Testud, J. and P. Amayenc, 1989, Stereoradar meteorology: a promising technique to observe precipitation from a mobile platform, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 6, 89~108.
- 13 Hildebrand, P. H. and C. K. Muller, 1985, Evaluation of meteorological airborne Doppler radar Part I: Dual-Doppler analyses analyses of air motions, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2, 362~380.

Three Dimensional Analytical Retrieval from Airborne Doppler Radar Data Part II. Application of MANDOP Method to Airborne Doppler Radar Data Obtained during CaPE Experiment

Dou Xiankang

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

G. Scialom and Y. Lemaitre

*(Centre de Recherches en Physique de l'Environnement Terrestre et
Planetaire CNET/ CNRS Issy-les-Moulineaux, France)*

Abstract The Convection and Precipitation / Electrification Experiment (CaPE) carried out in summer 1991 in Florida, USA, was the first experiment involving a dual-beam antenna on an airborne radar facility. MANDOP analysis provides the possibility to retrieve the mesoscale three-dimensional air circulation in both the stratiform and convective regions of a squall line. On August 9, 1991, from 20:30 to 21:45 (UTC), a squall line located near (28°45'N, 80°54'W) was observed by the dual-beam antenna radar installed on a P-3 aircraft. For the first time, the recently developed MANDOP analysis was applied to real airborne radar data during this period of observation. This squall line has some common characteristics as the previous studies: upshear tilt of the updraft at the leading edge, inflow of moist air into the squall line at low levels, inflow of dry air with low potential temperature from behind at middle levels and a downdraft at the rear of the stratiform region. The analysis was also generalized to take into account simultaneously ground-based and airborne radar data. The comparisons between wind fields obtained under various combinations show the reliability of the airborne radar data.

Key words CaPE experiment airborne dual-beam Doppler radar MANDOP method
3-D wind field