

# 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

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  
Planétaire CNET / CNRS Issy-les-Moulineaux, France)

**摘要** 多重解析多普勒(MANDOP)方法是用解析表达式进行三维风场反演。它成功地应用于处理地基多普勒雷达资料, 获取对流系统层状降水区域的风场结构。本文将MANDOP方法在机载雷达情况下的进行推广并通过模拟研究径向速度测量中信号噪声、雨滴降落速度估计误差、平流速度估计误差、尤其是由于机载特性的引入产生的雷达束定位误差等对方法的影响。模拟结果显示, 在机载雷达的技术参数下, MANDOP方法能够提供误差可以接受的三维风场反演。这为利用MANDOP方法处理在CaPE实验中获取的历史上第一次机载双束多普勒雷达资料建立了可靠的基础。

**关键词** 机载双束多普勒雷达 三维风场反演 MANDOP方法

## 1 引言

强对流系统在大气低层和中层能量重新分配、海洋和大气能量交换等中间起着很重要的作用。为了了解其运动学及动力学特征, 雷达作为一种有力的探测手段被广泛地应用着。但以往使用的雷达地基雷达, 近年来机载大气多普勒雷达开始被逐渐使用并显示出诱人的前景<sup>[1]</sup>。和地基雷达相比, 机载雷达的好处是明显的: 自然界中大气现象如对流系统的形成在地理位置上分布是随机的, 同时雷达观测半径又是有限的, 这样地基雷达只能观测方圆几百公里的降水系统。而机载雷达可以方便地跟踪观测对象, 并且可以观察有些地基雷达较难观察的区域(如海洋)。在这样的背景下, 1990年法国国家通讯科学研究中心(CNET)的地球与行星际环境研究中心(CRPE)决定与美国国家大气科学研究中心(NCAR)合作发展一种被称为ASTRAIA/ELDORA的机载双束多普勒雷达系统。

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

各种不同反演方法被应用来分析多普勒雷达资料以获得三维空气循环结构, 如: 适用于层状降水区的速度方位显示 (Velocity Azimuth Display) 方法<sup>[2]</sup>; 适用于对流降水区的 COPLANE 方法<sup>[3, 4]</sup>。Scialom 和 Lemaitre<sup>[5]</sup>提出的一种新的解析反演方法—Multiple Analytical Doppler (MANDOP) 方法。这种分析方法提供了一种同时对流和层状降水区获得中尺度三维大气风场的可能性。它被成功地应用于分析地基雷达资料进行中纬度锋面的研究。

## 2 MANDOP 方法简介

MANDOP 方法将风速度场的每一个分量在一个同时依赖三个笛卡尔坐标轴的正交函数系上展开。然后再用最小二乘法拟合解析表达式的径向速度 ( $v_{r,th}$ ) 和雷达观测到的风的径向速度 ( $v_{r,obs}$ )。另外一些附加条件如地面边界条件以及质量守恒方程作为约束条件加入。最后归结为求解一个线性系统方程。

从数学上讲, 风速度场的每一个分量可表达为

$$U_i = \prod_{j=1}^3 f_{ij}(x_j),$$

其中,  $(x_1, x_2, x_3)$  为三个笛卡尔空间坐标  $x, y, z$ ;  $f_{ij}(x_j) = \sum_{k=1}^{n_{ij}} a_{ijk} F_{ijk}(x_j)$ ,  $a_{ijk}$  为待定系数,  $F_{ijk}$  为给定基上的正交函数 (勒让德级数、傅立叶级数等),  $n_{ij}$  为展开的级数。

风场物理上必须满足的约束条件, 即地面边界条件和连续性方程, 可表示为

$$v_3 = 0, \quad \text{div}(\rho \vec{v}) = 0.$$

这里,  $v_3$  是实际风场 ( $\vec{v}$ ) 的垂直分量, 如果定义

$$P = \sum (v_{r,th} - v_{r,obs})^2 \quad (\text{求和为含有测量点的所有网格点})$$

其中,  $v_{r,th} = L_1 U_1 + L_2 U_2 + L_3 U_3$ ,  $L_1, L_2, L_3$  是方向余弦,  $P_1 = \sum \text{div}^2(\rho \vec{U})$ ,  $P_2 = \sum U_3^2$  (求和仅限于所有包含地面的网格点)。这样, MANDOP 方法寻求的由  $N$  ( $= n_{11}n_{12}n_{13} + n_{21}n_{22}n_{23} + n_{31}n_{32}n_{33}$ ) 待定系数确定的解析表达式, 就在于求  $\lambda P + \lambda_1 P_1 + \lambda_2 P_2$  的极小值, 这可转化为求解一个线性系统方程:

$$DB = (\lambda C + \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2)B = A,$$

其中,  $A$  为一个包括实验信息的  $N$  维矢量,  $B$  为一个待定系数的  $N$  维矢量,  $D$  为一个由解析表达式元素组成的  $N \times N$  维矩阵,  $\lambda, \lambda_1, \lambda_2$  为权重。待定系数由求解  $B = D^{-1}A$  获得。

MANDOP 方法的优点主要在于:

- (1) 它适于任何数目的雷达 (但至少两个), 这些雷达可以是任意类型的 (地基的或是机载的)、可以进行任何形式的空间扫描;
- (2) 展开级数的设置由我们所要获得的场的空间分辨率决定, 而且很容易实现;
- (3) 在机载雷达情况下, 飞机的轨迹不需要一定是直线。

当然, MANDOP 也有缺点。当反演比较精细的风场结构时, MANDOP 的计算量是比较大的。因为, MANDOP 的计算量正比于展开级数的三次方, 而且随着展开级数的增加, 网格也相应取得较小, 这又需要增加计算量。

### 3 模拟结果

#### 3.1 机载雷达的扫描特性

在随后的模拟中, 我们将采纳在 CaPE 实验中应用的法国制造的 X 波段尾翼双束多普勒雷达扫描方式。雷达系统的天线绕着平行于飞机飞行方向的轴转动。这样飞机的运动加上天线的旋转就可以完成对一个体积的取样。天线的旋转速度大约为  $6\text{ s/圈}$ , 在典型 P3 飞机飞行速度 ( $\sim 150\text{ m/s}$ ) 下, 数据在水平面内的空间间隔为  $\sim 1\text{ km}$ 。尾翼双束多普勒雷达的两个天线分别以  $18.3^\circ$  指向前和后。图 1 描述了雷达的扫描几何。图 2 表明对于每一点, 两个独立的测量可以被前向和后向雷达分别测得。

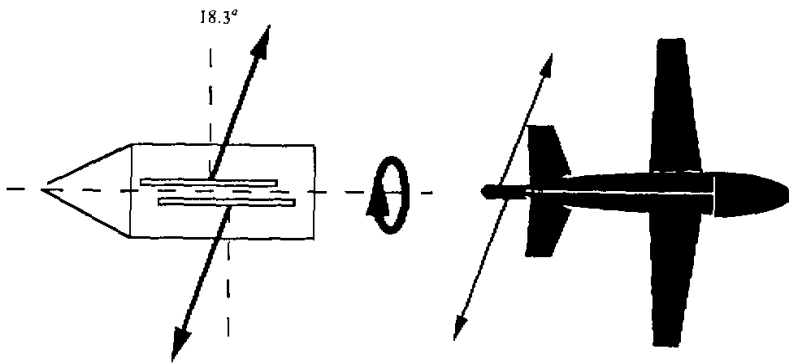


图 1 雷达天线的扫描几何图

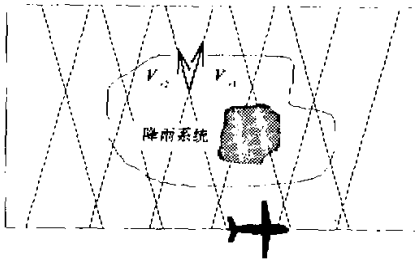


图 2 倾斜任意角度但包含飞机飞行轨迹的平面内双束雷达扫描取样格式

#### 3.2 MANDOP方法的机载雷达模拟资料验证

在引入机载这个特性后, 如果想要将应用于地基雷达的 MANDOP 方法推广去分析机载雷达资料, 必须首先用模拟的方法验证 MANDOP 在反演精度、在各种机载技术参数下 (如雷达束定位误差) 的适用限度问题等。

我们取的模拟风场, 应满足连续性方程。其数学表达式为

$$\begin{cases} U_1 = -0.5ax^2[1 - (z - z_r)/H], \\ U_2 = -0.5by^2[1 - (z - z_r)/H], \\ U_3 = (ax + by)(z - z_r). \end{cases}$$

$U_1$  和  $U_2$  为风场的两个水平分量,  $U_3$  为垂直分量,  $a$ 、 $b$  为两任意常数 (它们的选取只要使得模拟风场和实际风场的强弱近似就可以了),  $z_r$  处  $U_3$  为零,  $H$  为均质大气高度。

反演区域为  $100 \text{ km} \times 100 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ , 网格点大小为  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km} \times 0.4 \text{ km}$ , 展开级数为 3。

### 3.2.1 径向速度测量中信号噪声的影响

如前所述, MANDOP 方法是用最小二乘法进行径向观测速度和径向解析表达式速度的拟合。它本身就应有一种滤波功能。因此, 只要信号的信噪比不是很小的话, MANDOP 理应能消除噪声。在实际模拟中, 我们给信号添加一个高斯分布的噪声信号。

模拟结果见图 3, 径向速度测量噪声直到  $2 \text{ m/s}$  时, 所得到的反演速度的相对误差还低于  $10\%$ , 其中尤其值得注意的是, 反演的垂直分量的相对误差和水平分量的相对误差处于相近的水平。换句话说, 径向速度测量中噪声不是造成反演的垂直分量产生严重偏差的主要原因。

### 3.2.2 雨滴下落速度估计误差的影响

测量的径向速度中包含三个方面的因素: 来自风的, 飞机飞行速度 ( $\vec{v}_a$ ) 沿径向的投影, 以及雨滴下落速度 ( $\vec{v}_T$ ) 的贡献。在反演中我们只应用风场所产生的径向速度。飞机的飞行速度是已知的, 剩下的就是估计雨滴下落速度。在我们获得雨滴下落速度的信息后, 风场沿雷达束的投影和测量的径向速度之间关系由下列公式确定:

$$v_r = (v_r)_{\text{测量}} - \vec{r} \cdot \vec{v}_T - \vec{r} \cdot \vec{v}_a.$$

问题是如何估计雨滴降落速度以及这种估计的精度。常用的方法是利用雨滴下落速度和雷达反射率之间的经验公式。但由于雨滴下落速度和反射率之间的关系是近似的, 因此对雨滴下落速度的估计肯定存在一定的误差。模拟的目的在于研究这种误差给反演带来的影响, 这里假定雨滴降落速度的估计有  $50 \text{ m/s}$  的常量误差。

由图 4 可知, 在一个给定的离飞机的水平距离上, 垂直分量的反演误差随着高度的增加而增加; 在一个给定的高度上, 垂直分量的反演误差随着离飞机水平距离的减少而增加。这说明雨滴下落速度误差对反演的影响在雷达束的仰(俯)视角越大的地方愈甚。

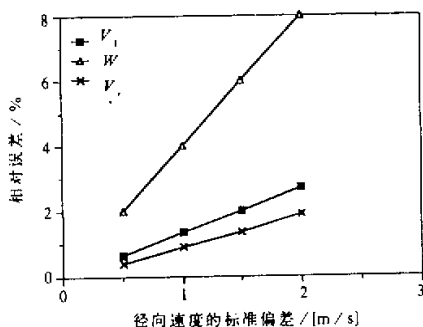


图 3 径向速度测量中噪声对反演的影响

$v_r$  为径向分量,  $v_1$  为水平分量,  
 $v_2$  为垂直分量 (以下图同)

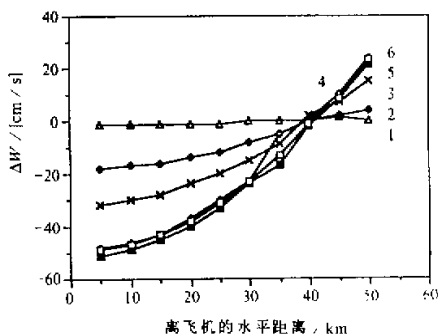


图 4 雨滴下落速度的估计误差对反演的影响

(1)  $h=0.0 \text{ km}$ ; (2)  $h=1.5 \text{ km}$ ; (3)  $h=3.0 \text{ km}$ ;  
(4)  $h=4.5 \text{ km}$ ; (5)  $h=6.0 \text{ km}$ ; (6)  $h=7.5 \text{ km}$

总之,雨滴下落速度的估计误差可以在雷达束的仰(俯)视角大的地方恶化垂直分量的反演。在层状降水区,当垂直分量不是很大时,其反演结果存在产生严重偏差的危险。

### 3.2.3 平流速度误差的影响

在雷达观察反演区域所需的时限内,被观察的大气现象同时经历了内部的变化和空间的整体平移。如果假定其自身的变化可以忽略不计,也就是说我们观察时间的尺度比起系统变化的时间尺度要小,那么系统的整体平移就是造成系统空间变化的原因。在反演中,我们是通过对连续性方程的积分来求垂直分量的,而这个积分必须在一个系统是稳态的坐标系中进行。如果不考虑平流速度的校正,会造成散度场的变形,这样垂直分量的反演就可能引起较大的误差。因此必须进行平流速度的校正。

平流速度校正的研究包括两个方面:

- (1) 假定平流速度是精确已知的,如何校正,校正的精度如何;
- (2) 实际上平流速度的估计终究是有误差的,估计误差影响反演的程度如何。

MANDOP 方法本身在于寻找一个给定时刻的三维风场的解析表达式。如果忽略系统内部的变化,那么在时刻  $t$  观察到的点  $P(\vec{r}, t)$  应等同于在时刻  $t_0$  系统内的点  $P[\vec{r} - \vec{v}_a(t - t_0)]$ 。因此,应拟合在点  $P(\vec{r}, t)$  观察到的径向速度和点  $P[\vec{r} - \vec{v}_a(t - t_0)]$  处的解析表达式。

这种校正数学上讲是非常简单的,但在实际应用中要注意一个问题。因为雷达观察数据庞大,我们无法用所有的雷达观察点去拟合三维风场的解析表达式。拟合实际上是在网格点上进行的。如果飞机的飞行轨迹是非直线的,这样同一网格点内的雷达观察数据在时间尺度上可以分得很开(如飞机进行一个常用的“L”飞行时,“L”的内部区域内的网格点)。我们必须将同一网格点的数据按时间序分组,每组内的数据用其平均时间去校正平流速度的影响,而不应整体平均,用其整体平均时间去校正。但在实际中,只取按时间序分组中那个数据最多的组去进行该网格的平流速度校正。

在研究的时间范围内,如其回波结构大体保持不变的话,可以用通常的形态学方法估计出系统的平流速度。由于系统在平移中其回波结构总或多或少有些变化,因此平流速度的估计也会因此而产生误差。数学上可以给出一种较严格的算法,但在实际应用中,由于各种参数设置的限制,其估计也不比用简单的形态学方法要好。

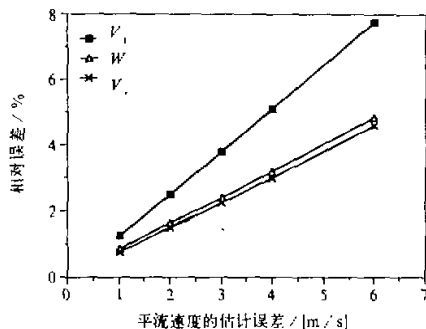


图 5 平流速度的估计误差反演的影响

假定对平流速度  $\vec{v}_a$  估计有一个误差  $\Delta \vec{v}_a$ , 进行反演时,应当将点  $P(\vec{r}, t)$  观察到的径向速度去拟合  $P[\vec{r} - \vec{v}_a(t - t_0)]$  处的解析表达式,而实际拟合的是  $P[\vec{r} - (\vec{v}_a + \Delta \vec{v}_a)(t - t_0)]$  处的解析场,这种拟合就不可避免地造成反演场的扭曲。图 5 显示反演可以容忍一个相当大的平流速度估计误差,如误差达到  $4 \text{ m/s}$  时,水平分量及垂直分量的反演误差还分别为 5% 及 3%。

### 3.2.4 雷达束定位误差的影响

在观察的过程中, 飞机是运动的, 由于技术条件的限制, 雷达束的定位存在一定的误差, 根据 Testud 和 Hildebrand<sup>[6]</sup>, ASTRAIA / ELDORA 雷达设计精度为偏航角为  $\pm 1^\circ$ , 转动角及俯仰角为  $\pm 0.1^\circ$ 。

我们设定一个固定于地面的绝对参考坐标系  $(x, y, z)$ , 另一个固定于飞机的、存在误差的测量坐标系  $(x', y', z')$ , 其两者关系由经典的坐标变换唯一地确定。固定于飞机上的坐标系有 3 个自由度即偏航角、转动角、俯仰角。这三个角度的误差对反演结果影响的方式、程度不同, 下面将分别介绍。

#### 3.2.4.1 偏航角误差 $\alpha$ 的影响

由于偏航角在  $z$  轴方向上不会发生作用, 为了方便起见, 可以任取一个水平面来研究偏航角误差的影响 (见图 6a)。经 MANDOP 方法分析反演, 可获得一个三维风场。由于偏航角存在误差, 在坐标平面  $(X', O, Y')$  中的场是在坐标平面  $(X, O, Y)$  中, 由此产生了两种误差:

(1) 反演的三维风场在水平面内的位置偏差。

实际上,  $\vec{r}'(x', y')$  处的场在空间中位于  $\vec{r}(x, y)$  处。 $\vec{r}'(x', y')$  和  $\vec{r}(x, y)$  关系由下面的公式确定:

$$\vec{r}[A] = \vec{r}'$$

其中,

$$[A] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

(2) 两个分量之间的相互污染。

$$\begin{cases} v_1 = v'_1 \cos\alpha - v'_2 \sin\alpha, \\ v_2 = v'_1 \sin\alpha + v'_2 \cos\alpha. \end{cases}$$

由于  $v'_1, v'_2$  是同一量级的两个分量, 而  $\alpha$  又很小, 所以  $v_1 \approx v'_1, v_2 \approx v'_2$ , 也就是说两个分量之间的相互污染程度很小。

应当注意, 这种类型的误差不改变风场的整体结构, 只是造成风场的一种几何变

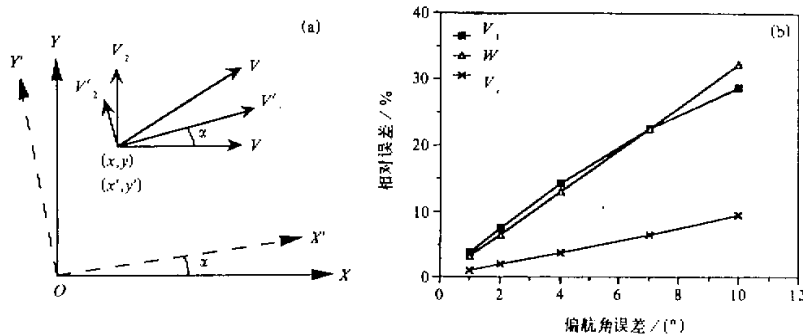


图 6 (a) 偏航角误差引起反演的三维风场在水平面内的位置偏差和两个分量之间的相互污染; (b) 偏航角误差对反演精度的影响

位。模拟结果图 6b 证明了这一点。当我们有  $4^\circ$  的误差时, 其反演的相对误差仅为 10% 左右, 而实际上雷达束偏航角定位精度可达到  $1^\circ$ 。

### 3.2.4.2 转动角误差 $\beta$ 的影响

由于转动角在  $y$  轴方向上不会发生作用, 为了方便起见, 任取一个垂直于飞机飞行方向的平面来研究转动角误差的影响 (见图 7a)。由于转动角存在误差, 在坐标平面  $(X', O, Z')$  中的场是在坐标平面  $(X, O, Z)$  中, 因此产生了两种误差:

(1) 反演的三维风场在垂直面内的位置偏差。

实际上,  $\vec{F}'(x', z')$  处的场在空间中位于  $\vec{F}(x, z)$  处。  $\vec{F}'(x', z')$  和  $\vec{F}(x, z)$  关系由下面的公式确定:

$$\vec{F} = [A] \vec{F}',$$

其中

$$[A] = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}.$$

(2) 两个分量之间的相互污染。

$$\begin{cases} v_1 = v'_1 \cos\beta - v'_3 \sin\beta, \\ v_2 = v'_1 \sin\beta + v'_3 \cos\beta. \end{cases}$$

由于  $v'_1$ ,  $v'_3$  可以是不同量级的两个分量, 即使  $\beta$  很小, 水平分量对垂直分量污染程度也可能很大。例如在对流系统的层状降水区域内, 水平分量可以比垂直分量高一至两个数量级。模拟结果图 7b 显示当转动角只有  $0.4^\circ$  估计误差时, 垂直分量的反演误差就已经达到 20%。可见转动角的影响尤其是对垂直分量的反演误差的影响远比偏航角为甚。幸而 ASTRAIA/ELDORA 雷达的转动角设计精度为  $0.1^\circ$ , 这样垂直分量的反演误差就可以降至 5% 左右。

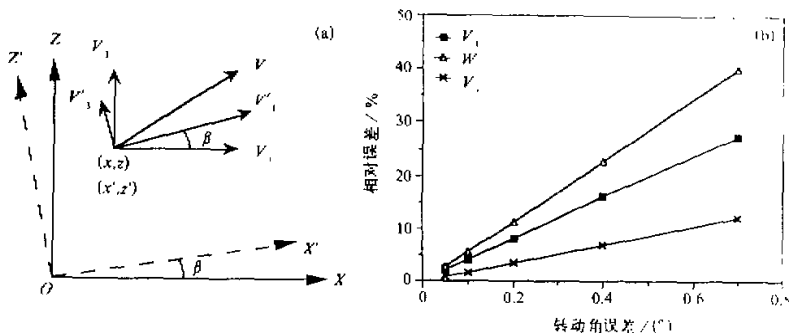


图 7 (a) 转动角误差引起反演的三维风场在水平面内的位置偏差和两个分量之间的相互污染; (b) 转动角误差对反演精度的影响

另外, 俯仰角误差的影响和转动角的影响属同一种类型, 这里就没有必要加以展开了。

当我们讨论这个问题时, 千万不能忘记飞机有一个很可观的飞行速度 (对于 P3 飞

机来说大约为  $150 \text{ m/s}$ 。如果雷达束存在定位误差, 当我们从观察到的径向分量中扣除飞机飞行速度的投影时, 不可避免地产生相当重要的误差。幸好角度的误差是一个平均值趋于零的随机变量, 而且 MANDOP 是把整个风场作为一个整体进行反演, 这样角度的误差的影响在相当程度上相互抵消。图 6b、图 7b 均是考虑了飞机飞行速度的投影误差。

由于各种误差之间是不相关的, 它们对反演产生的影响有时相互增强、有时相互抵消。我们选取了各种误差的期待值, 以各种组合经过数值试验, 发现其反演总的相对误差水平分量不超过 10%, 垂直分量不超过 20%。当然误差估计还是模拟的被反演风场的函数 (当展开级数足够大时, 误差估计基本上和被反演风场无关)。

## 4 结论

近十余年来, 技术的进步推动了机载多普勒雷达的发展。目前它已成为研究中尺度大气环流的一个强有力手段。各种不同反演方法被应用来分析多普勒雷达资料以获得三维空气运动结构。MANDOP 方法试图用解析表达式去进行三维风场反演, 它曾被成功地应用于处理地基多普勒雷达资料, 获取对流系统层状降水区域的风场结构。在法美合作的 ASTRAIA / ELDORA 机载双束多普勒雷达计划的背景下, 将 MANDOP 方法推广去分析机载雷达资料。本文用模拟的方法详细地研究了各种可能误差, 尤其是机载特性的引入带来的诸如雷达束定位误差等对方法的影响。模拟结果证明将 MANDOP 方法推广到机载雷达领域的可能性。这个结果还将在本文的第二部分被 CaPE 实验实测资料验证。

致谢: 法国国家科研中心的 Jacques TESTUD 及 Michiel CHONG 研究员、中国科学院大气物理研究所陈洪滨博士与作者进行过许多有益的讨论, 特此致谢。

## 参 考 文 献

- 1 Hildebrand, P. and R. K. Moore, 1990. Meteorological radar observation from mobile platforms. *Radar in Meteorology* (edited by David Atlas), 287~314.
- 2 Browning, K. A. and R. Wexler, 1968, The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, 7, 105~113.
- 3 Lhermitte, R. M. and L. J. Miller, 1970, Doppler radar methodology for the observation of convective storms. *Preprints 14th Radar Meteorology Conf.*, Tucson, Amer. Meteor. Soc., 133~138.
- 4 Chong, M. and J. Testud, 1983, Three-dimensional wind field analysis from dual-Doppler radar data. Part III. The boundary condition: an optimum determination based on a variational concept, *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1227~1241.
- 5 Scialom, G. and Lemaitre, Y., 1990, A new analysis for the retrieval of three-dimensional mesoscale wind fields from multiple Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 7, 640~665.
- 6 Testud, J. and P. H. Hildebrand, 1991, A technique to correct airborne Doppler data for coordinate transformation errors using surface cluster, *Preprint 25th Radar Meteor. Conf.*, Paris. Amer. Meteor. Soc., 493~496.

## Analytical Retrieval of 3-D Wind Field from Airborne Doppler Radar Data Part I: Extension of MANDOP Method to Airborne Doppler Radar Data Analysis Through Simulated Data

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** Mesoscale phenomena such as tropical squall lines were studied for years with more and more sophisticated experimental facilities, in particular meteorological Doppler radars. A new generation of such radars is presently being developed, namely airborne systems which allow for studying the life cycle of the observed phenomena. A further progress in airborne Doppler radars is their equipment with dual-beam antennas, allowing the retrieval of wind and reflectivity fields in the same conditions as from dual ground-based Doppler radars. On the other hand, MANDOP analysis was developed by Scialom and Lemaitre to study the dynamic structure of precipitating systems from ground-based Doppler radar data and applied to FRONT 84 and FRONT 87 experiments data set within stratiform precipitation. In this context, this paper consists in adapting the method to airborne Doppler radar data and validating it through simulations.

**Key words** airborne dual-beam Doppler radar 3-D wind field retrieval MANDOP method