

# 双基地多普勒雷达的风场反演能力评估

邱拓<sup>1, 2</sup> 刘锦丽<sup>1</sup> 段树<sup>1</sup> 吕达仁<sup>1</sup> 毕永恒<sup>1</sup>

(1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029;

2 成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225)

**摘要:** 主、被动相结合的双基地天气雷达风场反演技术, 是国际上近年来发展的新型技术。为了评估该技术的反演能力, 将X波段双基地雷达(主、从站)联合反演的风场, 与X/S波段多普勒雷达(双主动雷达)联合反演的风场进行对比。结果表明, 在降水天气过程中, 两者反演的风场一致性较好。此外, 对方法中存在的问题也做了一些讨论。

**关键词:** X/S波段多普勒天气雷达, 双基地多普勒天气雷达, 风场反演

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.04.001

## Capability Assessment of Wind Field Retrieval by Bistatic Radar Network

Qiu Tuo<sup>1, 2</sup>, Liu Jinli<sup>1</sup>, Duan Shu<sup>1</sup>, Lü Daren<sup>1</sup>, Bi Yongheng<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 Electronic Engineering College, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

**Abstract:** Wind field retrieval by bistatic Doppler radar is a new type of technology, which has been developed in China recently. To assess the ability of this technology, in this paper, two wind field retrieval methods derived from bistatic X-band radar and X/S band Doppler radar are compared. The analysis results show that the two wind field retrieval methods are reasonably consistent. In addition, some problems of the bistatic technology are also discussed.

**Keywords:** X/S band Doppler radar, bistatic radar, wind field retrieval

### 0 引言

多普勒天气雷达是目前探测对流活动中大气动力场随时间和空间变化的主要手段。如何更好地从多普勒雷达速度资料中提取矢量风场的信息, 目前已有许多方案。由于多普勒雷达探测到的只是矢量风场的径向分量, 而由单部雷达反演三维风场的算法, 均采用了一些假定条件, 存在很大局限。例如: 速度方位显示(VAD)算法获取风场信息精度太低, 速度方位处理(VAP)技术只适合低仰角速度数据等。

为提高风场反演精度及可靠性, 消除假设前提, 出现了多部多普勒雷达联合反演风场的方法。自20世纪60年代以来, 双/多多普勒天气雷达联合探测大气风场的试验取得了很大的进展。1969年, Armijo<sup>[1]</sup>从理论上搭建了反演方程组, 使风场反演技术踏上了一个新

新台阶, 很大程度上提高了雷达风场反演精度和可靠性。之后不断有算法在此基础上更新, 主要是通过减少运算中的迭代次数、优化插值算法、改良雷达扫描方式等进一步提高反演精度。近来使用最为频繁的是1988年Bousquet等<sup>[2]</sup>发展的多部多普勒雷达综合和连续调整技术(MUSCAT), 使用变分法一步完成三维风场的求解。双(多)主动雷达风场反演技术现在已经得到了普遍认可。

双(多)主动雷达风场反演技术虽然已经日渐成熟, 但也存在一些弊端。如主动雷达的造价高, 时间、空间同步难以控制等。为了改善以上弊端, 从20世纪90年代起, 国外学者发展了双(多)基地雷达联合反演风场技术。虽然早在1968年, Atlas等<sup>[3]</sup>就开展了多基地多普勒雷达对气象目标强度的探测研究, 但直到20世纪90年代, Wurman<sup>[4]</sup>等研制了第一台双(多)基地多普勒雷达样机, 使用多基地雷达系统进行风场反演后, 这种技术才趋于成熟。1999年, Protat等<sup>[5]</sup>利用多基地雷达数据以变分法反演了大气风场。2003年, Satoh等<sup>[6]</sup>验证了双基地角是影响反演精度的

收稿日期: 2014年2月27日; 修回日期: 2014年7月10日  
通信作者: 刘锦丽(1938—), Email: jliu@mail.iap.ac.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目(40939949); 国家自然科学基金仪器专项(40227001)

一个主要因素，提出旁瓣污染和低增益的接收天线也是造成反演风场与现实风场出现差异的原因。2004年，Friedrich等<sup>[7]</sup>通过多部主从雷达间进行反演数据对比和飞行试验，验证了多基地雷达风场反演的可靠性，指出产生误差的原因来自雷达系统和天气条件等，认为评估反演误差难度较大。目前，国内对双（多）基地雷达在气象方面研究较少，还停留在起步阶段。

本文主要利用中国科学院大气物理研究所（以下简称大气所）X波段双基地雷达数据反演矢量风场，以及架设在相同位置的双主动多普勒雷达对同一区域、同时观测数据反演矢量风场，通过对比评估双基地系统的反演精度、误差及实用性。由于在可探测范围内找不到两台同波段主动雷达，为了节约成本，这里使用北京市气象局（以下简称北京局）S波段雷达和大气所X波段雷达，进行双多普勒天气雷达风场反演（不同波段主动雷达联合反演可能会增加系统误差，不过随着试验的进行可以发现这个误差在允许的范围之内）。

### 1 双主/双基地风场反演流程

图1即为双主动多普勒天气雷达（X波段与S波段）与双基地（X波段）天气雷达风场反演流程图。

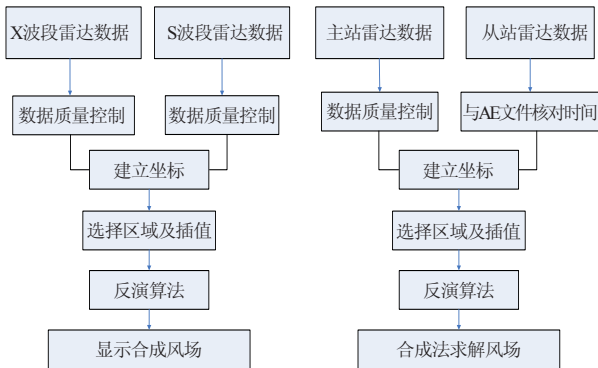


图1 双主动雷达（左）与双基地雷达（右）风场反演流程图

#### 1.1 质量控制

雷达数据的质量控制包括：噪声剔除，主要包括剔除地物遮挡和异常回波；速度退模糊，采用二维多路退速度模糊算法<sup>[8]</sup>，退模糊可靠性高，无需假设。

从站雷达数据与AE文件核对，以确保主从站数据的时间配对。

#### 1.2 坐标建立与区域选择

根据S波段、X波段及其从站气象雷达的位置，选择最佳反演区域。大气所X波段气象雷达主站位置（39.977°N，116.381°E），从站位置（39.807°N，116.469°E）；北京局S波段气象雷达位置（39.809°N，116.472°E）。由于三个雷达站海拔高度接近，计算时高度差忽略。各雷达站位置如图2所示。

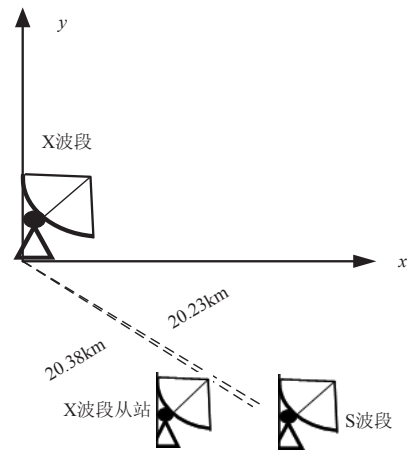


图2 三部多普勒天气雷达布局示意图

由于X波段雷达从站位置与S波段雷达的距离很接近（约80m），反演最佳区域<sup>[9]</sup>重叠部分较多，方便进行反演效果的比较（图3）。

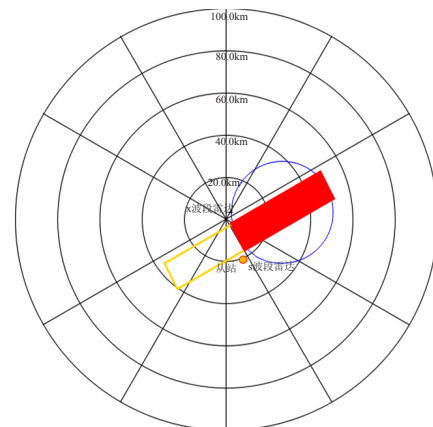


图3 中心为X波段雷达站点，橙色点标识出从站与S波段雷达站位置。红色矩形框范围为两种反演的公共最佳区域，也是实例选择的反演区域

为了计算方便，以X波段雷达为坐标原点，图4提供了X波段雷达与S波段雷达空间位置与坐标（从站雷达与S波段雷达位置接近，不再重复列图说明）。

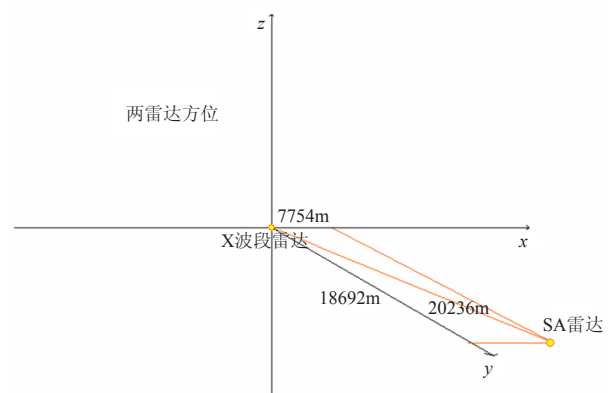


图4 中心为X波段气象雷达站坐标（0，0，0），S波段气象雷达站坐标为（18692m，7754m，0）

### 1.3 插值部分

由于反演区域的特点，其与雷达探测点并不对应，所以本文采用三维Cressman椭球插值方法得到各个格点的径向资料值<sup>[9]</sup>。对于任一个网格点上的物理量 $F$ ：

$$F = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i} \quad (1)$$

式中， $f_i$ 是第 $i$ 个观测点的值， $w_i$ 是第 $i$ 个观测点与网格点的距离权重系数，由下面的关系定义：

$$w_i = \frac{R_i^2 - D_i^2}{R_i^2 + D_i^2}; \text{ 当 } D_i \leq R_i \quad (2)$$

$$w_i = 0; \text{ 当 } D_i > R_i \quad (3)$$

式中， $D_i$ 为网格点与观测点的距离， $R_i$ 是影响半径：

$$\begin{cases} V_1 = \sin(\alpha_1) \cos(e_1) u + \cos(\alpha_1) \cos(e_1) v + \sin(e_1) w_p, \\ V_2 = \frac{\sin(\alpha_1) \cos(e_1) + \sin(\alpha_2) \cos(e_2)}{2 \cos(\beta/2)} u + \frac{\cos(\alpha_1) \cos(e_1) + \cos(\alpha_2) \cos(e_2)}{2 \cos(\beta/2)} v + \frac{\sin(e_1) + \sin(e_2)}{2 \cos(\beta/2)} w_p \end{cases} \quad (6)$$

式中， $V_1$ 、 $V_2$ 分别为主站和从站测得的径向速度， $\alpha_1$ 、 $e_1$ 为主站的方位角和仰角， $\alpha_2$ 、 $e_2$ 是反演格点位置相对于从站的方位角和仰角， $\beta$ 为双基地角， $u$ 、 $v$ 为水平风场分量， $w_p$ 为粒子垂直速度， $w_p$ 是垂直气流速度 $w$ 和粒子下降末速度 $w_i$ 的求和（即： $w_p = w + w_i$ ），这里 $w_i = 3.8 \times Z^{0.071}$ ， $Z$  (dBz) 为反射率因子。通过积分质量连续方程：

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = kw \quad (7)$$

求解出垂直速度 $w$ ，为了满足 $w$ 的边界条件，这里采用伴随矩阵法求解<sup>[8]</sup>。这样，由上述反演方法即可获得三维风场结构。

对于两个主动雷达系统，根据径向投影关系得：

$$R_1 V_1 = ux + vy + (h - h_1)(w + w_i) \quad (8)$$

$$R_2 V_2 = u(x - x_2) + v(y - y_2) + (h - h_2)(w + w_i) \quad (9)$$

使用质量连续方程作为强约束条件的三维风场信息<sup>[2]</sup>，使用其中的X波段雷达站点位置坐标（坐标原点） $(x, y, h)$ ，S波段雷达站点位置坐标 $(x_2, y_2, h_2)$ ， $R_1$ 为观测点到坐标原点距离， $R_2$ 为观测点到S波段雷达坐标距离， $V_1$ 为X波段雷达测得的径向速度， $V_2$ 为S波段雷达测得的径向速度。方程中有三个未知数 $(u, v, w)$ ，再通过联立质量连续方程求解三维风场信息。

## 2 风场反演实例

从2011年三部雷达（X波段，S波段，X波段从站）全年获取的降雨数据中选取了10余组进行对比分

$$R_i = \frac{R_H R_Z}{(R_H^2 \sin^2 \psi_i + R_Z^2 \cos^2 \psi_i)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

$$\psi_i = \arctan \left[ \frac{z_i}{(x_i^2 + y_i^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (5)$$

式中， $R_H$ 和 $R_Z$ 分别是水平半径和垂直半径， $(x_i, y_i, z_i)$ 是观测点相对于网格点的笛卡儿坐标， $\psi_i$ 表示观测点相对于网格点的仰角。

资料插值变换（图略），网格点处的物理量值 $F$ ，由位于椭球内部的所有雷达观测点的物理量通过三维Cressman距离权重插值函数计算得到。

### 1.4 反演算法

对于一个主动雷达，一个被动雷达的双基地雷达系统，只有两个方向的径向速度，本文采用多普勒速度合成方法<sup>[6]</sup>：

析的风场资料。

### 2.1 分析步骤

1) 反演空间选取：三部雷达空间位置限制，选取15km×40km×10km区域，具体雷达对应位置如图2和图3所示，风场反演网格设置为500m×500m×250m。水平分辨率500m，垂直分辨率250m。

2) 双基地和双主动雷达数据反演风场。

3) 两种反演方法对比分析。

除反演风场结果对比分析外，还计算了两种方法获得风向风速的离差：

$$\text{平均离差: } M_u = \frac{\sum_{i=1}^N (U_{v1i} - U_{v2i})}{N} \quad (10)$$

$$\text{相对离差: } D_i = \frac{|U_{v1i} - U_{v2i}|}{U_{v1i}} \quad (11)$$

$$\text{离差: } d_i = |U_{v1i} - U_{v2i}| \quad (12)$$

$$\text{均方差: } O_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_{v1i} - U_{v2i})^2}{N}} \quad (13)$$

其中， $U_{v1}$ 表示双主动雷达反演速度， $U_{v2}$ 表示双基地反演速度， $N$ 表示反演总点数， $i$ 表示第 $i$ 个点。

### 2.2 实例 1

2011年7月24日20时06分（北京时）北京出现雷阵雨天气，进行双基地雷达风场反演和双主动雷达观测及风场反演，图5给出了当时由X波段雷达和S波段

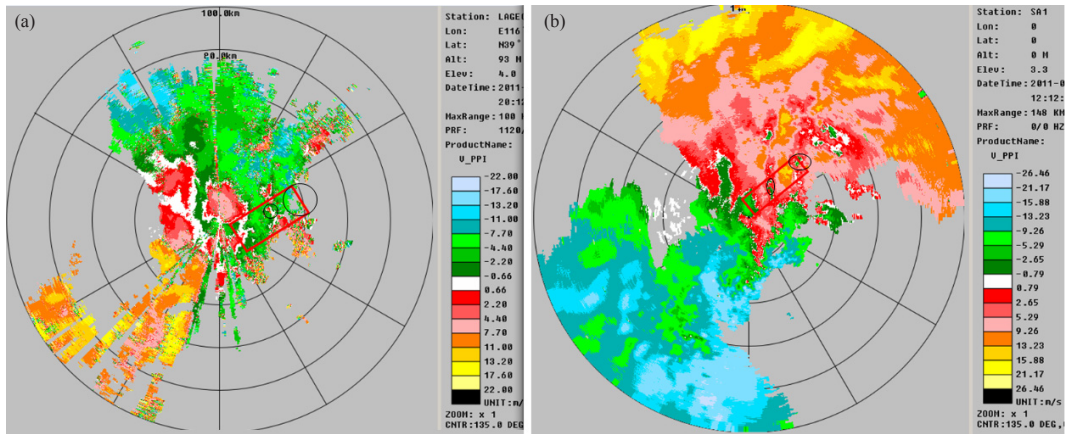
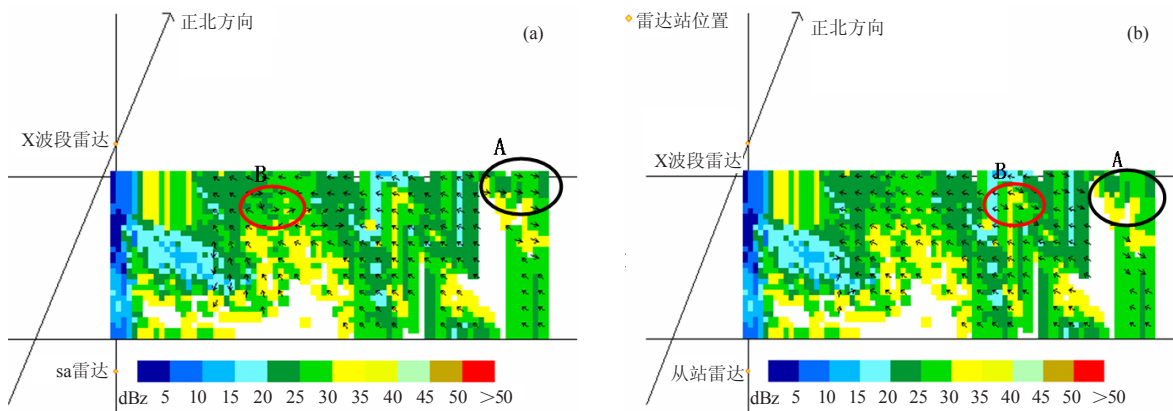


图5 X波段雷达在4°仰角获得速度 (a) 和S波段雷达在3.3°仰角获得速度 (b)

雷达获得的径向速度信息，红色矩形框标示出反演区域，黑色圆圈标示出反演出现差异的位置。图6—9及

表1给出双主动以及双基地雷达反演的流场、风场、风速/风向离差等对比分析结果。



(a) 背景为插值到1200m高处的反射率信息，红色圆圈 (B) 标示出切变区域。黑色圆圈 (A) 区域依然可以获得较好的流场信息  
(b) 背景为插值到1200m高处的反射率信息，红色圆圈 (B) 标示出切变区域。黑色圆圈 (A) 区域已经超出其反演区域

图6 双主动 (a) 和双基地 (b) 雷达联合反演所得流场信息

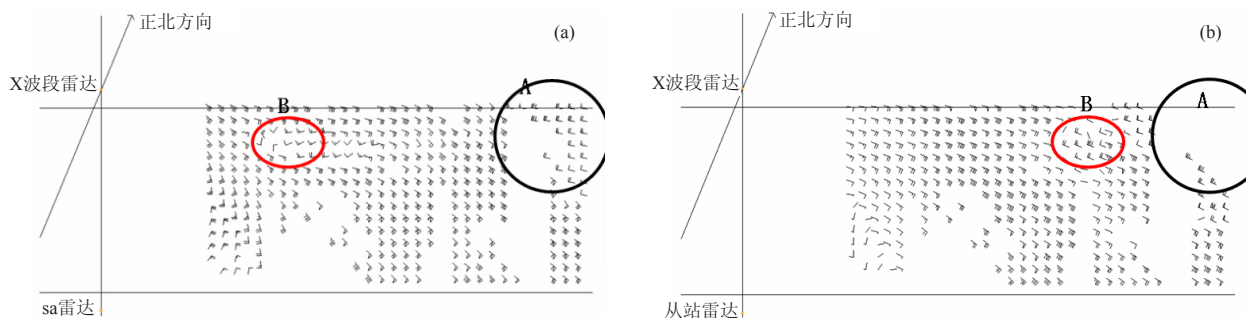


图7 双主动 (a) 和双基地 (b) 雷达联合反演风场信息，标示区域意义同图6

由反演所得的流场和风场图可以看出，两种反演方法所得结果在大部分区域内一致性较好，只有在小部分区域（图6—7中圆圈标识区A, B）还存在差异。图6—7中A区（黑色圈区域），双基地反演没能在此区域获得完整的风场信息，而双主动雷达却能反

演出更完整的风场信息，由图中B区（红色圈包围区域）可以看出有明显的风切变，两部雷达都反演出风切变，不过切变的类型和位置都出现了一定差异，产生这种误差的原因可能是由双主动雷达时间同步性问题造成的，这一问题一直没得到很好的解决<sup>[1-2]</sup>，而双

表1 数理统计结果

速度							
高度/km	平均离差	均方差	相对离差	<10%	<20%	<25%	<30%
1.2	-4.807	8.3255		47.07%	52.13%	55.94%	61.85%
风向 (角度)							
高度/km	平均离差	均方差	相对离差	<10°	<20°	<25°	<30°
1.2	35.551	65.77		65.23%	78.22%	82.11%	83.39%

基地雷达采用单发双收体制，在时间同步性上虽然有所改善，但并没有从根本上解决该问题<sup>[4-6]</sup>。

为了具体和直观地对双主动和双基地雷达联合反演风场的结果进行比对，给出了散点图（图8）和对应位置差异图（图9），可以看到，两种反演方法获取风场一致性较好，而且风向一致性优于风速一致性。两种方法离差的统计（表1）也支持上述结论。

### 2.3 实例2

2011年7月16日23时42分（北京时）北京雷阵雨天气，进行双基地雷达风场反演和双主动雷达风场

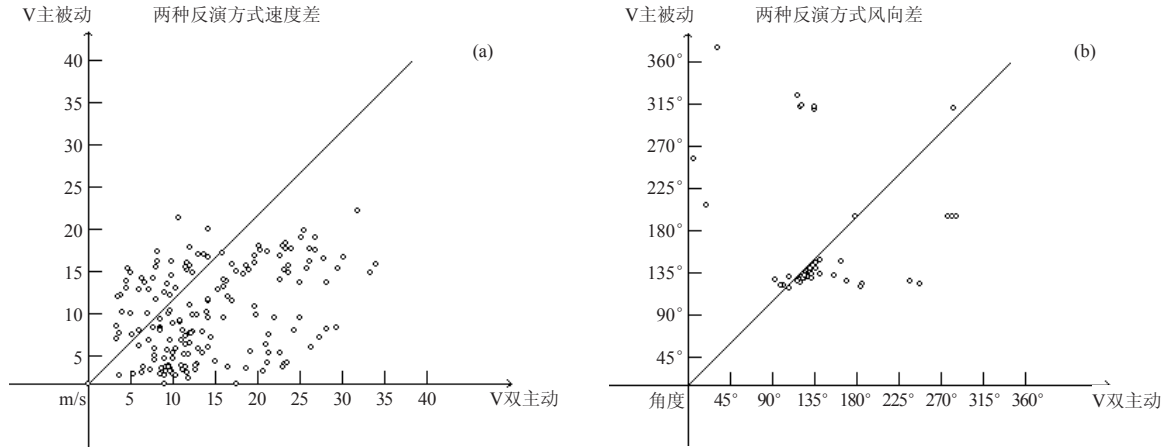


图8 风速散点信息 (a) 和风向散点信息 (b)

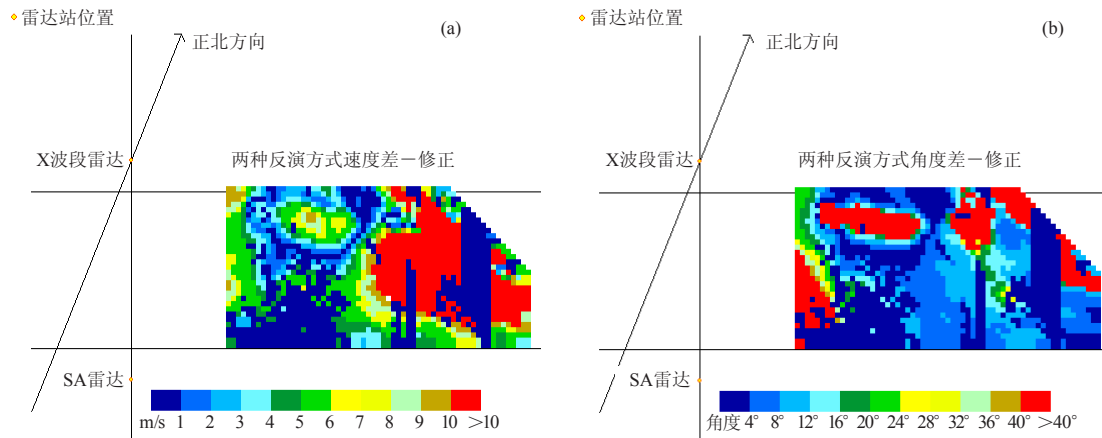


图9 对应点风速差异信息 (a) 和对应点风向差异信息 (b)

反演，图10给出了当时由X波段雷达和S波段雷达获得的径向速度信息，红色矩形框标示出反演区域。图11—14及表2给出双主动以及双基地雷达反演的流场、风场、风速/风向离差等对比分析结果。

由反演所得的流场和风场图可以看出，两种反演方式所得结果一致性较好，只有在矩形框包围区域出现较大差异。出现差异的原因，由PPI速度信息推断可能是从站雷达接受回波能力较弱造成的。图11黑色圆圈包围区域，双基地反演没能获得风场和流场信

息，而双主动雷达却能反演出更完整的风场信息，再次验证了实例1的结论。

散点图（图13）和对应位置差异图（图14），以及表2中的统计信息，也体现出实例1中的诸多特点：两种反演方法获取风场一致性较好，而且风向一致性优于风速一致性（下面将通过统计特征来说明）。风速波动大的可能原因：1）在双主雷达联合反演使用不同波段雷达，系统误差相对同波段雷达要高一些；2）时间同步性问题，也在一定程度上增加了反演误差；

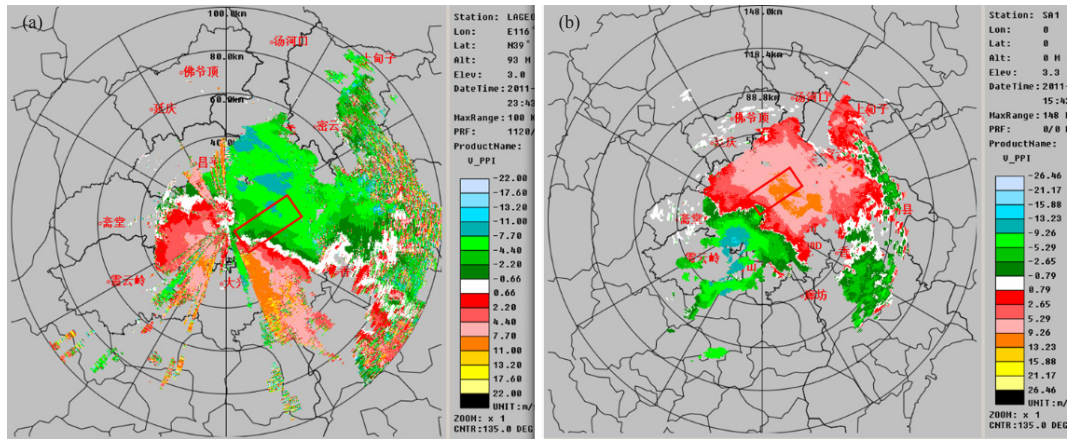
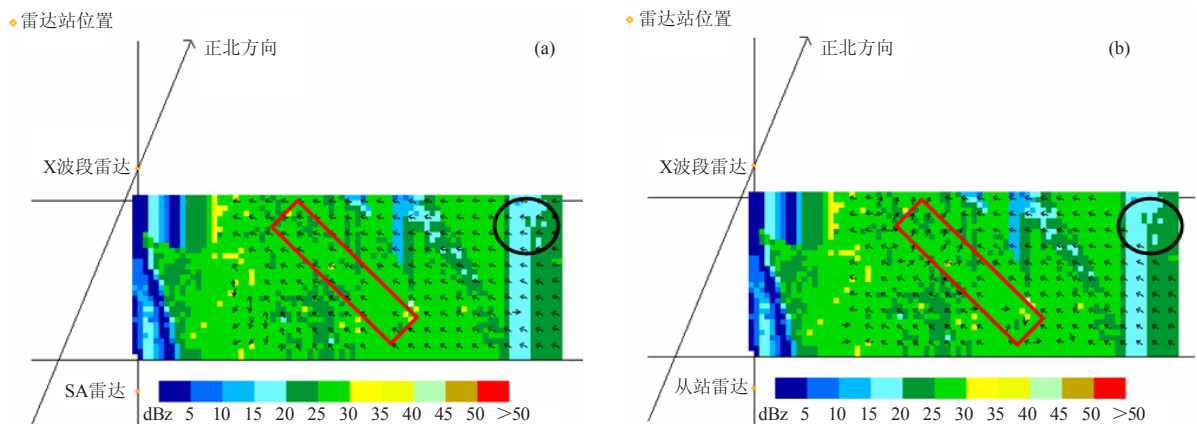


图10 X波段雷达在3°仰角获得速度 (a) 和S波段雷达在3.3°仰角获得速度 (b)



(a) 背景为插值到1200m高处的反射率信息, 红色矩形框标示出切变区域。黑色圆圈、区域依然可以获得较好的流场信息  
(b) 背景为插值到1200m高处的反射率信息, 红色矩形框标示出切变区域。黑色圆圈区域已经超出其反演区域

图11 双主动 (a) 和双基地 (b) 雷达联合反演所得流场信息

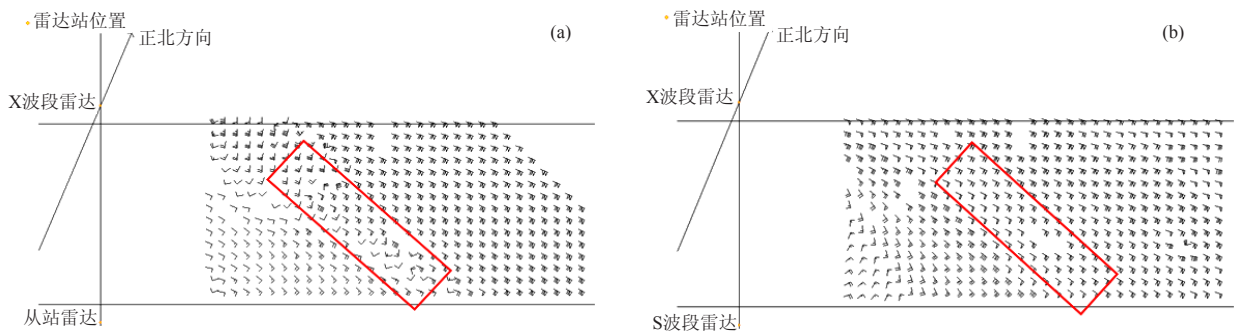


图12 双主动 (a) 和双基地 (b) 雷达联合反演风场信息

3) 双基地雷达的从站雷达接收弱回波能力较弱; 4) 双基地雷达的反演精度与双基地角变化有关。

## 2.4 实例统计与分析

为了更好的分析, 从试验数据中随机选出了十组数据组合做散点图 (图15), 可以看出, 两种反演方法获得的风场信息一致性好, 风向一致性要优于风速一致性。表3给出了具体的离差统计结果。

对这十组例子进行分析, 发现一致性强弱还与双基地角的变化有关。图16给出了反演区域与双基地角变化关系示意图。再利用示意图中中间红色箭头对应位置的数据进行差异分析 (图17), 可以发现, 双基地角在90°附近时一致性最强。在图17所示最佳区域内, 通过数理统计运算, 发现风速相差在10%以下的占75%以上, 风向相差10°以下的占85%以上。

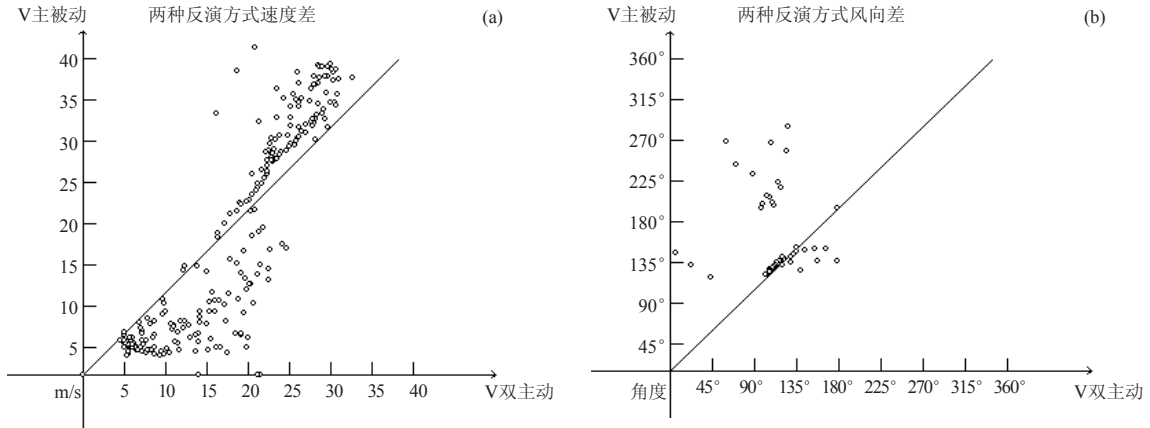


图13 风速散点信息 (a) 和风向散点信息 (b)

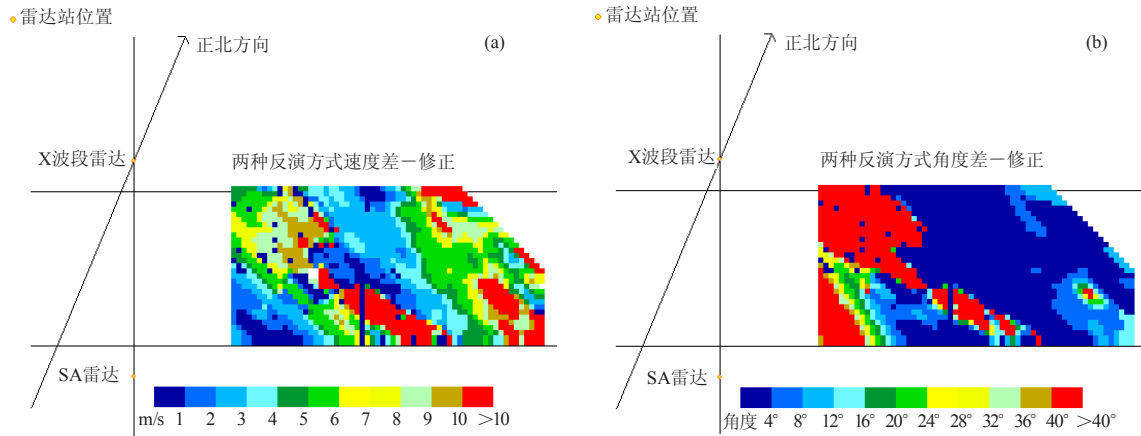


图14 对应点风速差异信息 (a) 和对应点风向差异信息 (b)

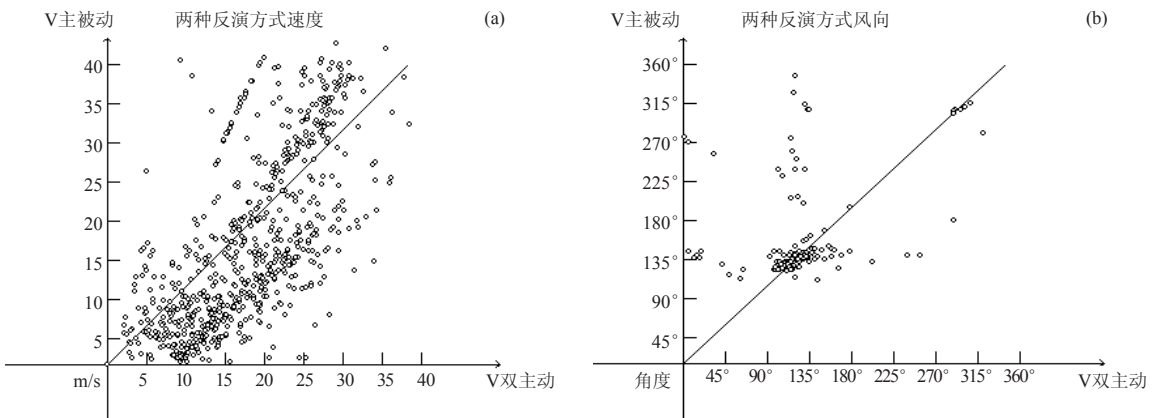


图15 风速散点信息 (a) 和风向散点信息 (b)

表2 数理统计结果

		速度					
高度/km	平均离差	均方差	相对离差	<10%	<20%	<25%	<30%
1.2	-0.332	7.176		35.28%	46.74%	51.66%	60.56%
		风向 (角度)					
高度/km	平均离差	均方差	相对离差	<10°	<20°	<25°	<30°
1.2	27.881	52.615		65.28%	71.33%	75.72%	77.44%

表3 所有实例数理统计结果

		速度					
高度/km	平均离差	均方差	相对离差	<10%	<20%	<25%	<30%
1.2	-1.982	9.084		40.66%	49.20%	54.51%	60.02%
		风向 (角度)					
高度/km	平均离差	均方差	相对离差	<10°	<20°	<25°	<30°
1.2	30.212	57.015		60.23%	71.63%	75.92%	77.77%

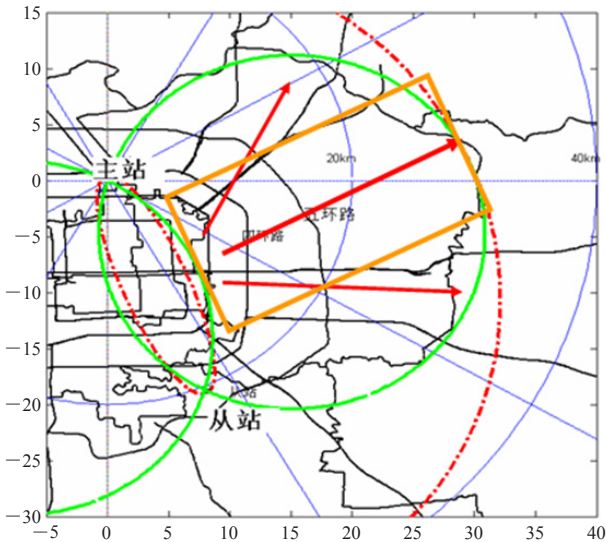


图16 反演区域与双基地角变化关系示意。橙色框为双主、双基地公共反演最佳区域（本文选择的反演区域），两个绿色框的非公共区域为双基地反演最佳区域（绿色圆圈包围区域，除开红色虚线框包围区域），三个红色箭头标示方向为双基地角递减方向

### 3 结论

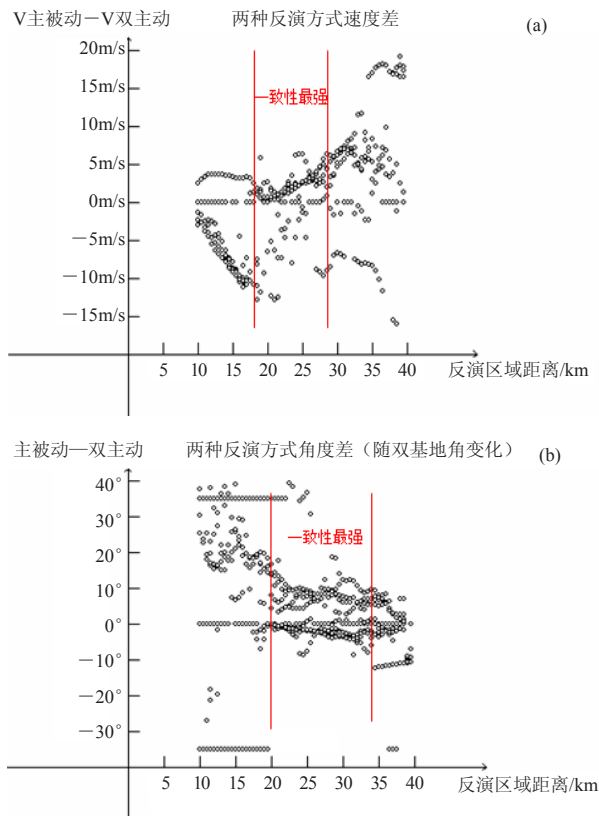
1) 本文利用实测X/S波段双多普勒天气雷达与双基地（X波段主、从）雷达数据，进行了风场反演方法的对比分析。结果发现，双主动与双基地雷达在公共的反演最佳区域内，降水过程中获得的风场信息有较好的一致性，表明了应用成本低廉的双基地雷达替代双主动多普勒雷达是可行的。

2) 双基地雷达反演精度与双基地角有很大关系，双基地角在 $90^\circ$ 附近时反演精度最高。

3) 本试验虽然证明了双基地雷达替代双主动雷达进行风场反演的可行性，但反演风场一致性的范围有限。为弥补这一缺陷，可以考虑增加从站的数量，以实现更大范围风场数据的获取，同时加强从站数据资料的质量控制，解决时间同步性等问题，从而实现范围更大、实用性更强的风场反演。

#### 参考文献

- [1] Armijo L. A theory for the determination of wind and precipitation velocities with Doppler radar. *J Atmos Sci*, 1969, 26: 570-573.
- [2] Bousquet O, Chong M. A multiple- Doppler synthesis and continuity adjustment technique (MUSCAT) to recover wind



(a) 双基地角由左到右逐渐减小。两种反演方式的风速差异随双基地角的变化情况（在 $18\sim 28\text{km}$ 区间内，相对误差在10%以下的占了总量的76%，相对误差在20%以下的占了总量的83%）

(b) 两种反演方式的风向差异随双基地角的变化情况（在 $20\sim 35\text{km}$ 区间内，相差在 $10^\circ$ 以下的占了总量的86%，相差在 $20^\circ$ 以下的占了总量的93%）

图17 差异分析图：(a) 速度；(b) 角度

- components from Doppler radar measurement. *J Atmos Oceanic Tech*, 1998, 13: 343-359.
- [3] Atlas D, Natio K, Carbone R E. Bistatic microwave probing of a refractively perturbed clear atmosphere. *J Atmos Sci*, 1968, 25: 257-268.
- [4] Wurman J. Vector winds from a single-transmitter bistatic dual-Doppler radar network. *Bull Amer Meteor Soc*, 1994, 75: 983-994.
- [5] Protat A, Zawadzki I. A variational method for real-time retrieval of three-dimensional wind field from multiple-Doppler bistatic radar network data. *J Atmos Oceanic Tech*, 1999, 16 (4): 432-449.
- [6] Satoh S, Wurman J. Accuracy of wind fields observed by a bistatic Doppler radar network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(8): 1077-1091.
- [7] Friedrich K, Hagen M. Evaluation of wind vectors measured by a bistatic Doppler radar network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21: 1840-1854.
- [8] 蔡亲波, 颜琼丹. 二维多路多普勒雷达风场自动退模糊算法应用研究. *气象科学*, 2009, 29(5): 625-632.
- [9] 周海光, 张冲源. 笛卡儿坐标系的双多普勒天气雷达三维风场反演技术. *气象学报*, 2002, 10(4): 485-496.