0254-6124/2011/31(5)-618–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Ma Guanglin, Hu Xiong, Xu Qingchen, Xiao Cunying. Investigation and application of FCA method for Langfang MF radar wind retrievals. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 618-626

廊坊中频雷达风场 FCA 算法的研究及应用*

马广林[1,2] 胡 雄[1] 徐轻尘[1] 肖存英[1]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 中频雷达是获得临近空间 60∼100 km 范围内大气风场的重要探测设备之一. 全相关分析方法是空分天线模式中频雷达的一种重要风场反演方法. 通过介绍全相关分析方法算法的一般理论, 根据廊坊中频雷达的天线配置, 分别研究了利用三副天线数据与四副天线数据的风场反演算法 FCA-3A 和 FCA-4A, 讨论给出了全相关分析方法的剔除标准. 用廊坊中频雷达实测的回波相位和振幅, 得到由该算法反演的大气风场. 为验证算法的可靠性, 将其结果与 ATRAD 公司的反演结果进行比较. 结果显示大气纬向风和经向风随时间和高度的变化特性基本一致. FCA-3A 与 FCA-4A 的风场反演结果基本一致, FCA-4A 略好于 FCA-3A.

关键词 临近空间, 中频雷达, 全相关分析方法

中图法分类号 P 353

Investigation and Application of FCA Method for Langfang MF Radar Wind Retrievals

MA Guanglin[1,2] HU Xiong[1] XU Qingchen[1] XIAO Cunying[1]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Medium Frequency (MF) radar is one of the significant ground-based instruments for the horizontal wind measurements over the height range of 60∼100 km in the near-space. The Full Correlation Analysis (FCA) is the mainly used method to get wind velocity for MF radars with the Space Antenna Mode (SAM), which was introduced in details in this paper. Based on the antenna configuration of Langfang MF radar, the FCA algorithms with 3 antenna and 4 antenna called FCA-3A and FCA-4A respectively, were developed. The rejection criteria for FCA algorithm were also discussed and given. The algorithms were applied in the processing of the raw data of Langfang MF radar to compute wind velocity. The wind results were compared with those calculated by the ATRAD FCA software which was used in many MF radar sites in the world and it was shown that they are consistent with each other. The wind velocities estimated with the FCA-3A method agreed very well with those with the FCA-4A method. Results show that the algorithms of FCA-3A and

* 国家自然科学基金项目 (40774087) 和国家航天领域高技术课题共同资助

2010-02-26 收到原稿, 2010-10-14 收到修定稿

E-mail: maguanglin409@163.com

FCA-4A are reliable for Langfang MF radar data processing.

Key words Near-space, MF radar, Full correlation analysis method

1 引言

大气风场是中高层大气的重要物理量, 中频雷达是探测中高层大气风场的主要地基遥感设备之一 [1]. 国际上已经建立起近 30 部中频雷达, 如, Yamagawa, Wakkanai, Poker Flat, Urbana, Buckland Park 等. 利用这些中频雷达的观测资料, 已进行了大量的研究和统计工作, 例如, Igarashi 等 [2] 分析了 Yamagawa 和 Wakkanai 地区中层与低热层潮汐的结构和变化, Hedin 等 [3] 发展了 HWM93 风场经验模式, Holdsworth 和 Reid[4] 建立了雷达后向散射模式等.

中国武汉中频雷达于 2000 年开始进行观测实验 [5], 昆明中频雷达于 2007 年开始观测实验, 廊坊中频雷达自 2009 年 6 月安装完成和运行以来, 获得了大量的探测数据. 这些数据对于中高层大气动力学研究具有重要意义. 中国学者利用中频雷达数据开展了许多研究工作, 如胡雄等利用中频雷达数据研究了中间层/低热层大气对电波散射的角谱 [6], 并将武汉中频雷达数据与日本中频雷达进行对比研究 [7]; 张东娅等 [8] 获得了北纬 30° 中间层/低层大气风场结构特征; 张绍东等 [9] 利用武汉中频雷达资料分析得到了大气潮汐波的活动特点; 刘仁强等 [10−11] 深入分析了潮汐波之间的相互作用及其相位之间的关系; 肖存英等 [12] 采用中高层大气物理模拟结果对北纬 30° 大气风场结构特征进行了理论解释.

目前国际上的中频雷达广泛采用空分天线阵体制 (Space Antenna Mode, SAM). 全相关分析方法 (Full Correlation Analysis, FCA)[4,13−15] 是空分天线阵体制雷达的常用风场分析方法. 这种方法自提出以来, 经过与其他方法和技术得到的风速进行比对发现, 其得到的风场数据比较可靠. 舒卫平等 [16] 建立了 FCA 仿真模型, 并利用武汉中频雷达的数据进行对比验证.

廊坊中频雷达的天线配置与武汉中频雷达不同, 根据廊坊中频雷达新的天线配置情况开展 FCA 风场反演算法研究是很有必要的. 本文根据廊坊中频雷达的具体配置参数, 研究了三副天线和四副天线的 FCA 算法, 并利用廊坊中频雷达实测回波的振幅和相位进行风场反演, 进而将反演结果与 ATRAD 公司 FCA 风场分析软件的结果进行比较和统计分析.

2 廊坊中频雷达空分天线体制

中国科学院空间科学与应用研究中心于 2009 年在廊坊临近空间环境野外科学综合观测研究站安装了新型中频雷达. 该中频雷达自 2009 年 5 月底完成安装, 2009 年 6 月开始观测. 它实现全天候观测, 每 4 min 开展一次风场观测试验; 探测高度范围为 60∼100 km, 高度距离分辨率为 2 km.

武汉中频雷达天线 [5] 为一发三收, 发射天线由四个半波偶极子组成正方形天线阵, 每个接收天线子阵由正交半波偶极子组成, 分别位于边长为 185 m 的等边三角形的顶点上. 与武汉中频雷达天线配置不同, 廊坊中频雷达天线为四发四收, 采用四副正交半波偶极子天线组成 Y 型空分天线阵, 其中三副天线分布在边长为 181 m 等边三角形的顶点, 其余一副分布在等边三角形的中心, 如图 1 所示.

3 全相关分析方法

3.1 全相关分析方法理论

空分天线阵体制主要利用地面天线接收信号的相关性来反演大气风场, 如 FCA 和 FSA (Full Spe-

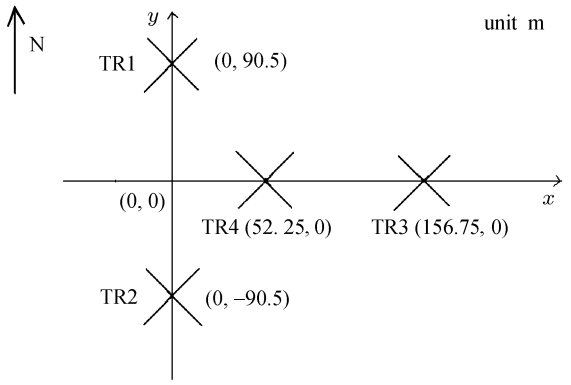

图 1 廊坊中频雷达天线阵

Fig. 1 Sketch map of Langfang MF radar antenna arrays

ctrum Analysis). FCA 利用天线接收信号的空间与时间的相关性来得到大气风场.

FCA 的基本假设是, 由散射体产生的雷达回波在地面上形成的衍射图的时间和空间相关函数可以用椭球函数来表示. 通过测量地面衍射图的运动速度可以得到散射体的运动速度. 有关 FCA 的详细理论和算法请参考文献 [4, 14]. 下面对该文献的方法进行简要介绍. 地面衍射图相距为 (ξ,η)、延迟时间为 τ 的相关函数可通过下式计算:

$$\rho(\xi,\eta,\tau)=\frac{\langle f(x,y,t)^* f(x+\xi,y+\eta,t+\tau)'\rangle}{\sqrt{\langle|f(x,y,t)|^2\rangle\langle|f(x+\xi,y+\eta,t)|^2\rangle}}. \tag{1}$$

其中, $f(x,y,t)$ 是位于地面位置 (x,y) 在 t 时刻接收到的复信号, $f(x+\xi,\,y+\eta,\,t+\tau)'$ 为 $f(x+\xi,\,y+\eta,\,t+\tau)$ 的复共轭, 如果 $f(x,y,t)$ 的平均值不为 0, 假设 $f(x,y,t)=a_0+g(x,y,t)$, 其中 $a_0=\langle f(x,y,t)\rangle$, 则相关函数的表达式可改写为 [18]

$$\rho(\xi,\eta,\tau)=\frac{\langle g(x,y,t)^* g(x+\xi,y+\eta,t+\tau)'\rangle}{\sqrt{\langle|g(x,y,t)|^2\rangle\langle|g(x+\xi,y+\eta,t)|^2\rangle}}. \tag{2}$$

设地面衍射图样运动速度为 (v_x,v_y) 时的相关函数表示为 [14,18]

$$\begin{aligned}\rho(\xi,\eta,\tau)=\rho[&A(\xi-v_x\tau)^2+B(\eta-v_y\tau)^2+\\&K\tau^2+2H(\xi-v_x\tau)(\eta-v_y\tau)].\end{aligned} \tag{3}$$

设

$$\begin{aligned}&Av_x^2+Bv_y^2+2Hv_xv_y+K=C,\\&a=A/C,\quad b=B/C,\quad h=H/C,\end{aligned}$$

有

$$\begin{aligned}\rho(\xi,\eta,\tau)=\rho[&a\xi^2+b\eta^2+(-2av_x-2hv_y)\xi\tau+\\&(-2hv_x-2bv_y)\eta\tau+2h\xi\eta].\end{aligned} \tag{4}$$

相关函数的一般表达式为

$$\begin{aligned}\rho(\xi,\eta,\tau)=\rho(&a\xi^2+b\eta^2+\tau^2+\\&2f\xi\tau+2g\eta\tau+2h\xi\eta).\end{aligned} \tag{5}$$

比较式 (4) 和式 (5) 的系数可得

$$\begin{cases}av_x+hv_y=-f,\\bv_y+hv_x=-g.\end{cases} \tag{6}$$

解方程得到

$$\begin{cases}v_x=(hg-bf)/(ab-h^2),\\v_y=(hf-ag)/(ab-h^2).\end{cases} \tag{7}$$

解出椭球参数 (a,b,f,g,h) 后, 利用式 (7) 得到衍射图运动速度. 散射体的真实速度 $v_{\rm t}(v_z,v_{\rm m})$ (大气风速) 为衍射图速度的一半. 即

$$\begin{cases}v_z=\dfrac{1}{2}v_x,\\[2mm]v_{\rm m}=\dfrac{1}{2}v_y.\end{cases} \tag{8}$$

在应用 FCA 技术之前, 人们采用时间位移技术 (time-displacement) 计算风速. 由于它没有考虑衍射图的随机扰动及衍射的各向异性, 所以该方法得出的速度有较大的误差. 在 FCA 算法中该速度被称为视速度 $v_{\rm a}$ (apparent velocity), 其结果可以作为应用 FCA 计算得到的实际风场速度是否合理的判断参考依据之一. 具体的求解方法请参考文献 [18], 计算公式为

$$\begin{cases}v_{\rm a}=\dfrac{1}{\sqrt{f^2+g^2}},\\[2mm]\theta_{\rm a}=\arctan(f/g).\end{cases} \tag{9}$$

对于空分天线体制雷达, 地面衍射图相关函数的椭球参数可采用下述方法获得. 天线 i 和天线 j 时间序列互相关函数的最大值及其延迟时间为 $\rho_{ij,\max}$ 和 τ'_{ij}, 有如下关系式:

$$\tau'_{ij}=-f\xi_{ij}-g\eta_{ij}. \tag{10}$$

由于互相关函数在零延迟的值与自相关函数在延迟 τ_{ij} 处的值相等, 故可得如下关系式:

$$\tau_{ij}^2=a\xi_{ij}^2+b\eta_{ij}^2+2h\xi_{ij}\eta_{ij}. \tag{11}$$

设在 τ''_{ij} 处自相关函数等于互相关函数的最大值, 得到如下关系式:

$$\tau_{ij}^2=\tau_{ij}'^2+\tau_{ij}''^2. \tag{12}$$

假设相关函数在最大值附近可以用高斯函数近似, 自相关函数和互相关函数具有相同的宽度, 则

$$\tau''_{ij}=\sqrt{\frac{-\ln(\rho_{ij,\max})}{\ln 2}}\,\tau_{0.5}\,. \tag{13}$$

其中, $\tau_{0.5}$ 为衰落时间 (fading time), 其是平均自相关函数等于 0.5 时的时间延迟, 是表征散射体不规则结构的重要物理量.

一般 SAM 雷达需要三副以上的天线, 需要首先利用式 (2) 计算相关函数, 然后利用式 (10)~(13) 求出椭球参数, 进而利用式 (7) 和式 (8) 得到衍射图的运动速度及真实速度.

根据廊坊中频雷达的天线配置情况, 利用 FCA 计算互相关函数以获得大气风场时有两种选择, 即仅利用分布在三角形顶点的三幅天线 (TR1, TR2, TR3) 和利用所有四副天线 (TR1, TR2, TR3, TR4) 的数据. 本文用 FCA-3A 和 FCA-4A 分别表示这两套算法.

3.2 FCA-3A 算法

利用 TR1, TR2, TR3 三副天线数据进行 FCA 分析, 具体的算法过程如下.

①利用式 (2) 计算三副天线自相关与互相关函数.

②计算信噪比 (SNR) 并进行消噪处理. 接收到的数据既有散射体回波信号也有干扰噪声, 而 FCA 是在无噪声的基础上进行的, 所以在进行 FCA 分析之前先要进行消噪处理. 具体过程可参见文献 [18].

③对自相关函数进行高斯拟合得到衰减时间 $\tau_{0.5}$, 利用互相关函数 ρ_{12}, ρ_{23}, ρ_{31} 的最大值进行高斯拟合, 得到互相关函数最大值 $\rho_{ij,\max}$ 及时间延迟 τ'_{ij}.

④列方程, 解椭球参数. 由式 (12) 和式 (13) 求出 τ_{ij}. 利用式 (10) 有

$$\begin{cases} \tau'_{12} = -f\xi_{12} - g\eta_{12}, \\ \tau'_{23} = -f\xi_{23} - g\eta_{23}, \\ \tau'_{31} = -f\xi_{31} - g\eta_{31}. \end{cases} \tag{14}$$

利用公式 (11) 有

$$\begin{cases} \tau_{12}^2 = a\xi_{12}^2 + b\eta_{12}^2 + 2h\xi_{12}\eta_{12}, \\ \tau_{23}^2 = a\xi_{23}^2 + b\eta_{23}^2 + 2h\xi_{23}\eta_{23}, \\ \tau_{31}^2 = a\xi_{31}^2 + b\eta_{31}^2 + 2h\xi_{31}\eta_{31}. \end{cases} \tag{15}$$

由式 (14) 利用最小二乘法求出 f 和 g. 由式 (15) 求出椭球参数 a, b, h. 代入式 (7) 和式 (8) 即可得到散射体真实速度.

FCA 是建立在一定的假设基础之上的, 对不符合假设的结果要予以剔除, 剔除的标准可参考文献 [14]. 这里采用如下剔除标准:

① SNR$< -3\,$dB;

② $\tau_{0.5} > 6\,$s;

③ 至少有一个互相关最大值落在所选取时间端点以外;

④ 至少有一个互相关最大值小于 0.2;

⑤ 至少有一个互相关函数高斯拟合的最大值大于 1;

⑥ 没有足够的点进行自相关函数高斯拟合, 进行高斯拟合时要求拟合点大于 0.5, 如果自相关函数零延时附近没有大于 0.5 的点, 则不适合进行 FCA 分析;

⑦ 平均自相关函数次级极大值大于 0.5;

⑧ $\dfrac{|\tau'_{12} + \tau'_{23} + \tau'_{31}|}{|\tau'_{12}| + |\tau'_{23}| + |\tau'_{31}|} > 0.35$;

⑨ $v_\mathrm{a} > 250\,\mathrm{m/s}$, $v_\mathrm{t} > 200\,\mathrm{m/s}$;

⑩ $v_\mathrm{a} > 5v_\mathrm{t}$;

⑪ $v_\mathrm{t} > 1.5v_\mathrm{a}$;

⑫ v_a 与 v_t 的夹角大于 40°.

3.3 FCA-4A 算法

因为廊坊中频雷达是 Y 型天线阵, 所以还进行了所有四副天线 FCA 算法的探索, 此算法命名为 FCA-4A. 主要步骤与 FCA-3A 基本相同, 同时利用 TR4 数据计算了互相关函数 ρ_{14}, ρ_{24}, ρ_{34}, 所有椭球参数通过最小二乘法求解超定方程组得到.

由如下方程组利用最小二乘法求出 f 和 g.

$$\begin{cases} \tau'_{12} = -f\xi_{12} - g\eta_{12}, \\ \tau'_{23} = -f\xi_{23} - g\eta_{23}, \\ \tau'_{31} = -f\xi_{31} - g\eta_{31}, \\ \tau'_{14} = -f\xi_{14} - g\eta_{14}, \\ \tau'_{24} = -f\xi_{24} - g\eta_{24}, \\ \tau'_{34} = -f\xi_{34} - g\mu_{34}. \end{cases} \tag{16}$$

由如下方程组利用最小二乘法求出 a, b, h.

$$\begin{cases} \tau_{12}^2 = a\xi_{12}^2 + b\eta_{12}^2 + 2h\xi_{12}\eta_{12}, \\ \tau_{23}^2 = a\xi_{23}^2 + b\eta_{23}^2 + 2h\xi_{23}\eta_{23}, \\ \tau_{31}^2 = a\xi_{31}^2 + b\eta_{31}^2 + 2h\xi_{31}\eta_{31}, \\ \tau_{14}^2 = a\xi_{14}^2 + b\eta_{14}^2 + 2h\xi_{14}\eta_{14}, \\ \tau_{24}^2 = a\xi_{24}^2 + b\eta_{24}^2 + 2h\xi_{24}\eta_{24}, \\ \tau_{34}^2 = a\xi_{34}^2 + b\eta_{34}^2 + 2h\xi_{34}\eta_{34}. \end{cases} \tag{17}$$

由式 (16) 和式 (17) 求出椭球参数后, 将其代入式 (7) 和式 (8) 即可求出真实速度, 同样利用 3.2 节所列出的剔除标准, 对不符合假设的结果予以剔除.

4 FCA 算法结果分析

4.1 FCA-3A 算法结果

选取 2009 年 7 月 1 日 00:00–23:59 (UTC) (世界

协议时) 的雷达接收的回波相位和振幅, 利用 FCA-3A 进行风场反演, 反演结果与澳大利亚 ATRAD 的全相关分析软件计算的风场结果进行比较. 在 00:00–12:16 (UTC) 和 20:16–23:59 (UTC) 时间段, 雷达处于白天工作模式, 探测范围为 60∼100 km; 在 12:16–20:16 (UTC) 时间段, 雷达处于夜间工作模式, 探测的范围为 70∼100 km.

图 2 为 FCA-3A 与 ATRAD 反演所得纬向风和经向风随世界时及高度的分布. 从图 2 可以看出, 这两种算法反演的风场在总体特性上是一致的. 在夜间工作模式时, 80 km 以下没有观测数据. 纬向风在约 86 km 以下盛行东风, 在约 86 km 以上主要盛行西风. 经向风在 00:00–12:00 (UTC) 时间段盛行南风, 在 12:00–18:00 (UTC) 盛行北风, 在 18:00–23:59 (UTC) 时间段约 92 km 以下盛行北风, 在约 92 km 以上盛行南风. 然而, 由于 FCA 反演具体算法及所采用的判据不同, FCA-3A 反演结果和 ATRAD 的反演结果在某些时刻也有差别, 表现在数据点的有无及风场的数值一些小的差异上.

为进一步对比两种方法反演结果, 又分别进行了一天的风场统计分析和某高度上速度分布的分析, 选取的高度为 92 km, 结果如图 3 和图 4 所示.

图 3 为 2009 年 07 月 01 日风场数据统计结果的比较. 对每个高度上的风场数据进行统计得到平均值和标准偏差. 从图 3 可以看出二者分布较为一致, 某些高度处略有差别, 在 80 km 以下符合 FCA 要求的数据较少.

图 4 为 92 km 处, ATRAD 与 FCA-3A 风场的散点图, 横坐标为 FCA-3A 的结果, 纵坐标为 ATRAD 的结果, 实线的斜率为 1, 虚线为最小二乘法线性拟合的结果, 纬向风拟合的直线斜率是 0.935, 经向风拟合的结果为 0.88. 从图 4 中可以看出散点集中分布在实线的两侧, 经向风中, FCA-3A 的结果在小于 −30 m/s 时与 ATRAD 相比偏小 (绝对值偏大).

4.2 FCA-4A 算法结果

同样选择 2009 年 07 月 01 日 00:00–23:59 (UTC) 一天雷达回波的相位和幅度, 利用 FCA-4A 进行风场反演. 将结果与澳大利亚 ATRAD 的全相关分析软件计算的风场结果及 FCA-3A 的结果进行比较.

图 5 为 FCA-4A 与 ATRAD 风速随世界时及高度的变化, 和 FCA-3A 与 ATRAD 比较的结果一致, FCA-4A 与 ATRAD 的风场具有相同的变化特性. 在夜间工作模式时, 80 km 以下基本没有观测数据. 纬向风在约 86 km 以下盛行东风, 约 86 km 以上主要盛行西风. 经向风在 00:00–12:00 (UTC) 时间段盛行南风, 在 12:00–18:00 (UTC) 盛行北风, 在 18:00–23:59 (UTC) 时间段约 92 km 以下盛行北风, 约 92 km 以上盛行南风. 同样, 由于 FCA 反演具体算法及所采用的判据不同, FCA-4A 反演结果和 ATRAD 的反演结果在某些时刻也有差别, 表现在数据点的有无及

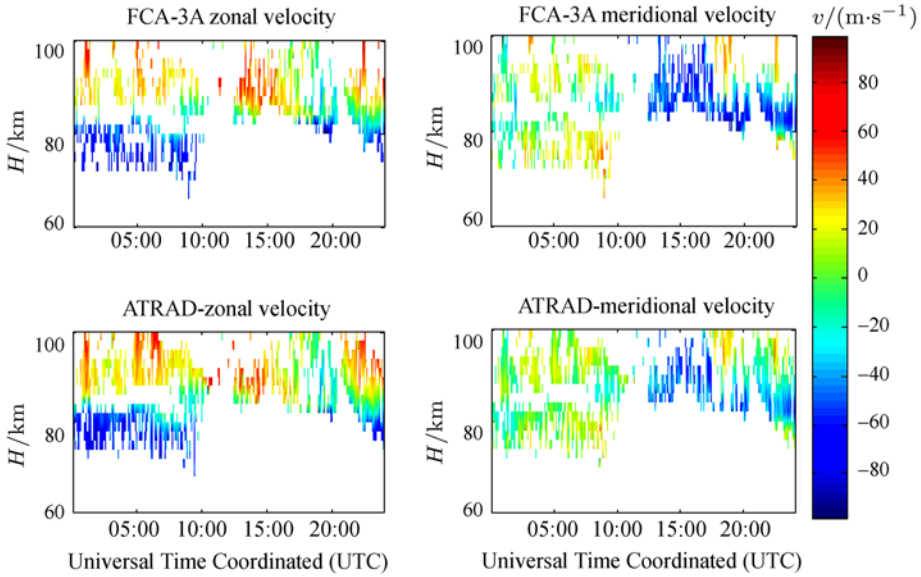

图 2 FCA-3A 与 ATRAD 风速随时间的变化

Fig. 2 Variation of wind velocities by FCA-3A and ATRAD FCA

风场的数值一些小的差异上.

图 6 为 70~100 km 高度处风场的统计分布. 从图 6 可以看出, 二者的统计分布较为一致, 但在某些高度略有差别, 在 90 km 处统计的点数最多. 图 7 给出了 92 km 处 FCA-4A 风场结果与 ATRAD 风场结果散点的比较. 实线的斜率为 1, 虚线是由最小二乘

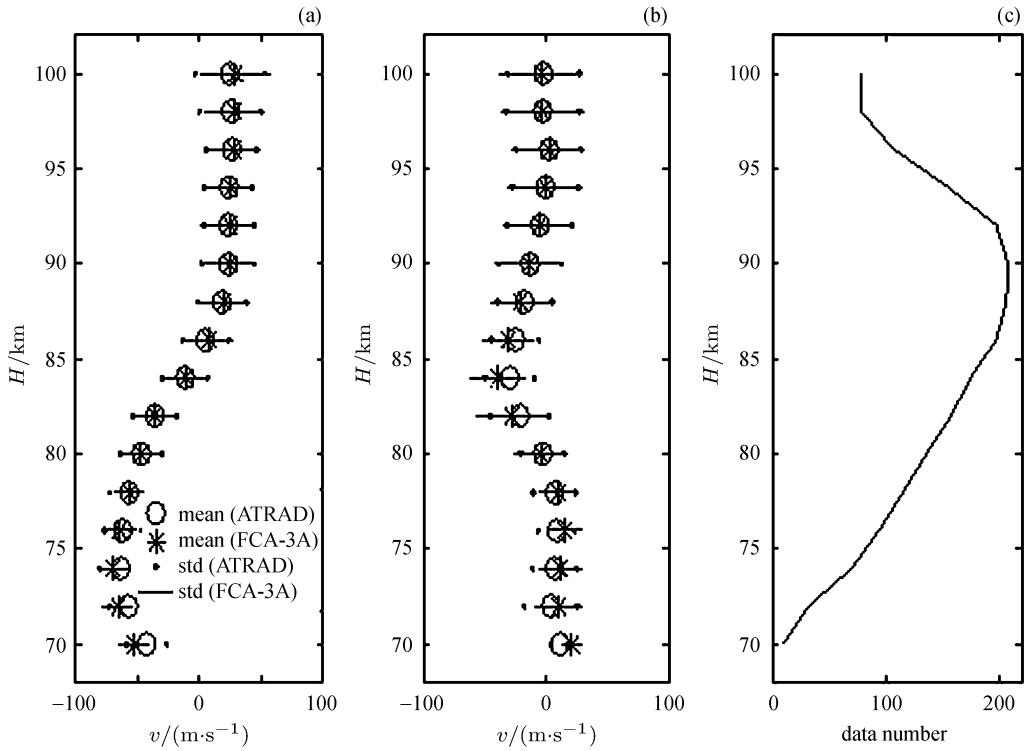

图 3 70~100 km 风场统计结果. (a) 纬向风速, (b) 经向风速, (c) 统计的点数

Fig. 3 Statistical results from 70 km to 100 km. (a) zonal velocity, (b) meridional velocity, (c) the data number

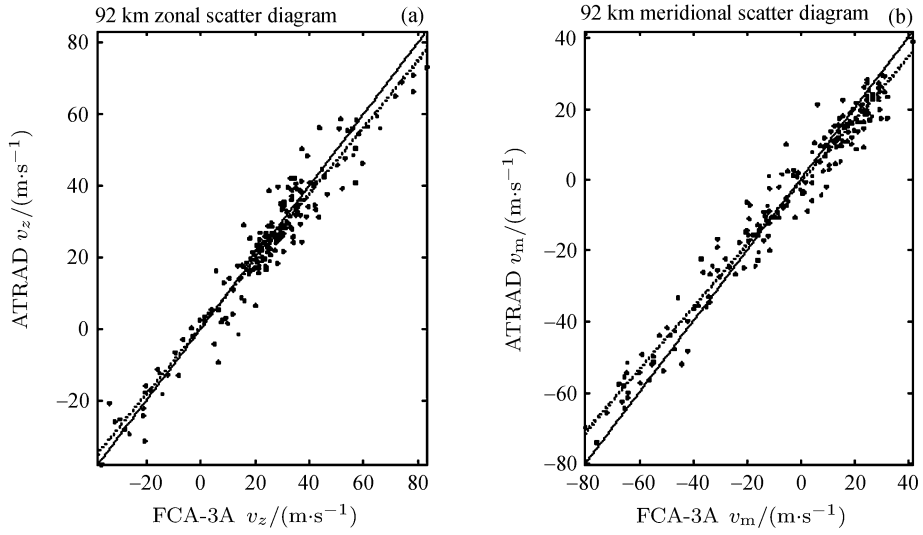

图 4 92 km 处 FCA-3A 与 ATRAD 风场散点图 (实线的斜率为 1, 虚线为最小二乘法线性拟合的结果)

Fig. 4 Scatter diagram at the height of 92 km (FCA-3A versus ATRAD FCA) (solid line has a slope of 1, and the dashed line is the least-square-fit line)

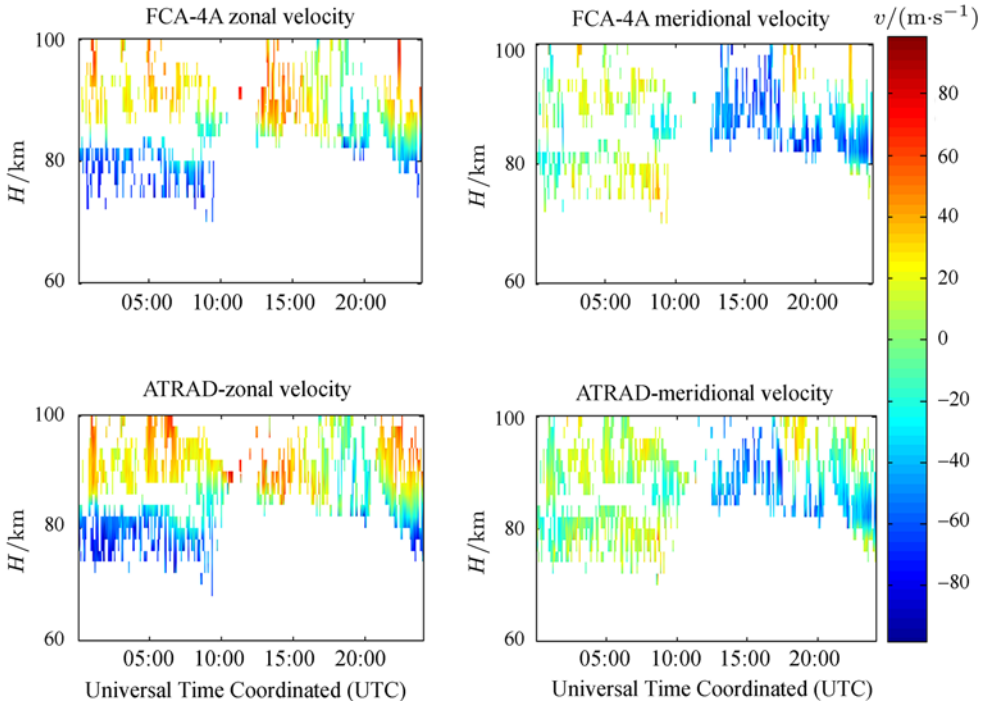

图 5 FCA-4A 和 ATRAD 风速随时间的变化

Fig. 5 Variation of wind velocities with FCA-4A and ATRAD

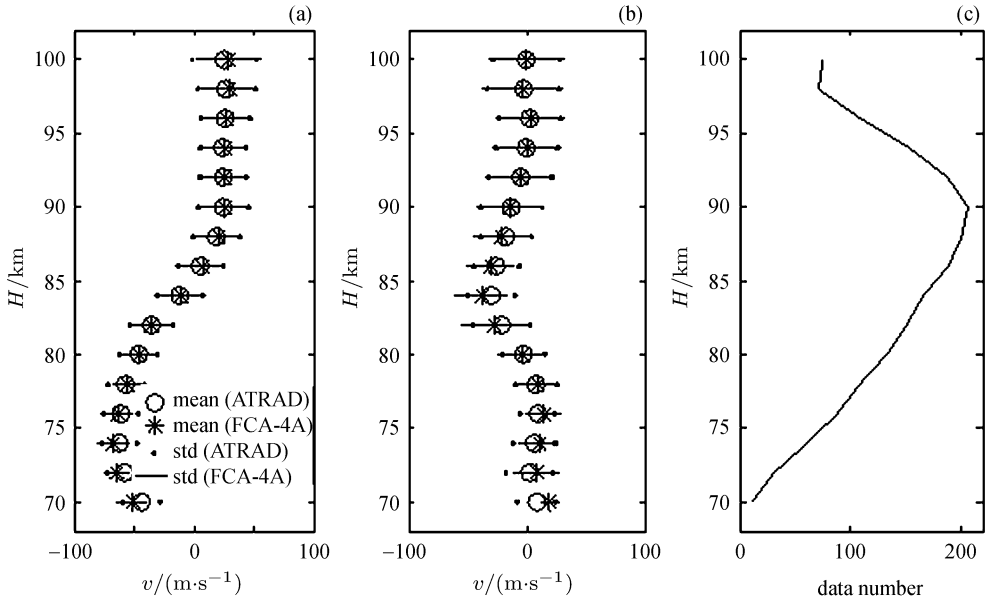

图 6 70~100 km 风场统计结果. (a) 纬向风速, (b) 经向风速, (c) 统计的点数

Fig. 6 Statistical wind velocities from 70 km to 100 km. (a) zonal velocity, (b) meridional velocity, (c) the data number

法线性拟合得到的结果, 纬向风拟合的直线斜率为 0.95, 经向风拟合的直线斜率为 0.898, 斜率接近于 1 , 略好于 FCA-3A 的结果. 散点集中分布在斜率为 1 的实线两侧. 经向风在小于 −30 m/s 的情况下比 ATRAD 的结果偏小 (绝对值偏大).

图 8 为 FCA-3A 与 FCA-4A 在 92 km 的风速散

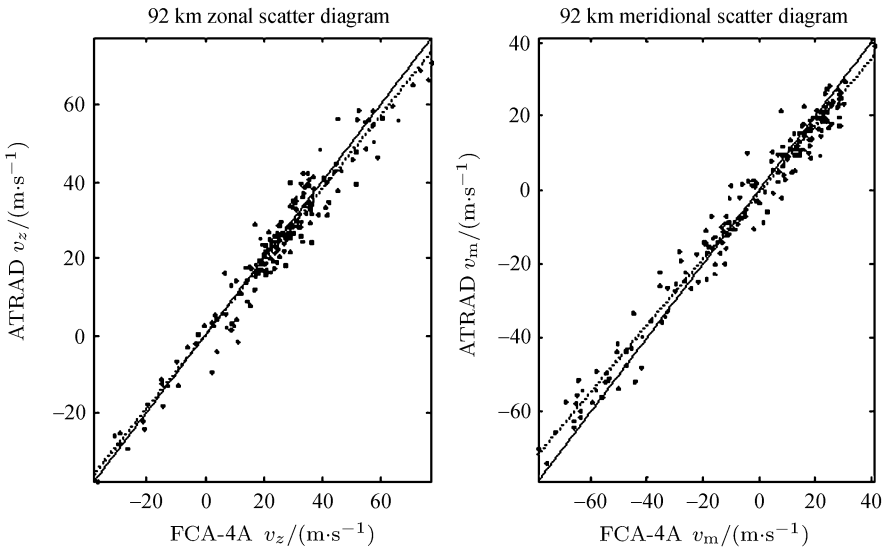

图 7 92 km FCA-4A 与 ATRAD 速度散点图 (实线的斜率为 1, 虚线是由最小二乘法线性拟合的结果)

Fig. 7 Velocities' scatter diagram FCA-4A with ATRAD at the height of 92 km (solid line has a slope of 1, and dashed line is the least-square-fit line)

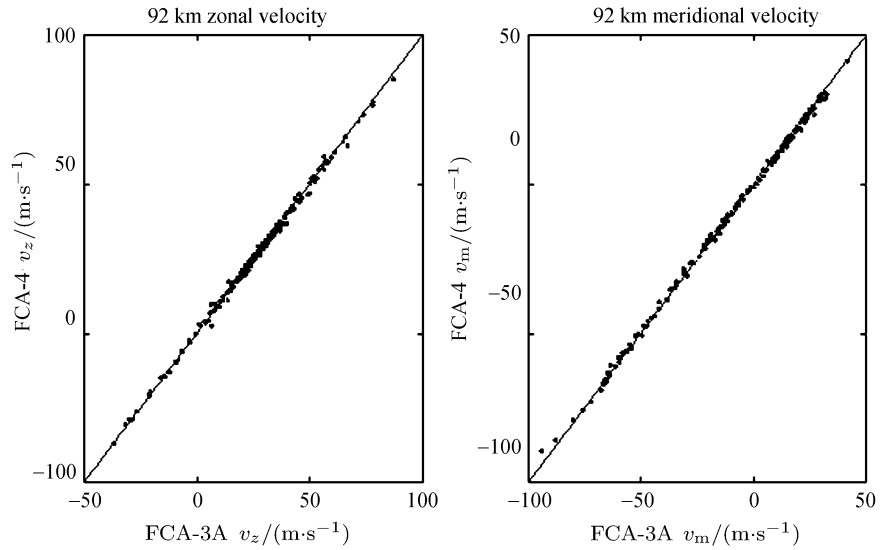

图 8 92 km FCA-3A 与 FCA-4A 风速散点图 (实线的斜率为 1)

Fig. 8 Scatter diagram FCA-3A with FCA-4A at the height of 92 km (solid line has a slope of 1)

点图. 从图 8 中可以看出散点集中分布在斜率为 1 的直线两侧, 表明两种方法得到的速度较为一致, 说明利用 FCA 原理, 由三副天线算出的结果与由四副天线算出的结果比较吻合, FCA 算法比较稳定.

4.3 FCA 算法讨论

从以上结果可以看出, 开发的 FCA-3A 与 FCA-4A 的风场结果比较一致, 它们与 ATRAD 的结果能较好地符合, 但在某些时刻它们仍然可能与 ATRAD 有较大的差别. 进一步的研究发现当相关函数的衰减时间大于 3 s 或小于 1 s 时, 二者差别增大. 衰减时间较大及较多的出现在全反射的情况, 衰减时间小于 1 s 主要出现在信噪比较小的情况. 在这两种情况下, 对相关函数进行拟合时, 选取拟合数据点不同就可能出现较大的速度差别. 因此, 还需要进一步研

究 FCA 剔除条件, 设置更合理的剔除标准, 以获得更可靠的风场数据.

5 结论

通过对 FCA 算法的一般原理的介绍, 根据廊坊中频雷达的配置研究了 FCA 的反演算法, 包括三副天线和四副天线的算法. 把廊坊中频雷达的回波相位和幅度作为输入反演得到 60~100 km 的大气风场, 与 ATRAD 分析软件得到的结果进行比较. 从结果中发现, FCA-3A 和 FCA-4A 反演的纬向风和经向风都与 ATRAD 的反演结果基本一致, FCA-4A 的结果略好于 FCA-3A.

参考文献

[1] Hu Xiong. Sounding and researches of the near space atmosphere [J]. *Meteor. Hyd. Equp.*, 2009, **20**(3):1-4. In Chinese (胡雄. 临近空间大气探测与应用研究 [J]. 气象水文装备, 2009, **20**(3):1-4)

[2] Igarashi K, Namboothiri S P, Kishore P. Tidal structure and variability in the mesosphere and lower thermosphere over Yamagawa and Wakkanai [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2002, **64**:1037-1053

[3] Hedin A E, Fleming E L, Manson A H, *et al.* Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **58**:1421-1447

[4] Holdsworth D A, Reid I M. A simple model of atmospheric radar backscatter: Description and application to the full correlation analysis of spaced antenna data [J]. *Radio Sci.*, 1995, **30**(4):1263-1280

[5] Li Fengqin, Hu Xiong, Zhang Dongya, *et al.* Mesospheric MF radar in Wuhan and its preliminary observation result [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **20**(1):65-71. In Chinese (李凤琴, 胡雄, 张冬娅, 等. 武汉中层大气中频雷达及其初步探测结果 [J]. 空间科学学报, 2002, **12**(1):65-71)

[6] Hu Xiong, Zeng Zhen, Zhang Dongya, *et al.* Observations of the mesosphere and lower thermosphere angular spectrum with MF radar at Wuhan [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(4):256-261. In Chinese (胡雄, 曾桢, 张冬娅, 等. 武汉中层、低热层大气角谱中频雷达观测 [J]. 空间科学学报, 2003, **23**(4):256-261)

[7] Hu Xiong, Zhang Xunxie, Igarashi Kiyoshi, *et al.* A preliminary comparison of observations with MF radars in Wuhan and Yamagawa at 30–31°N [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2006, **68**:1245-1259

[8] Zhang Dongya, Hu Xiong, Zhang Xunxie, *et al.* Observations of the Mesospheric and Lower Thermospheric Mean Winds at 30°N [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(4):267-272. In Chinese (张冬娅, 胡雄, 张训械, 等. 北纬 30°N 中间层和低热层大气平均风中频雷达观测 [J]. 空间科学学报, **25**(4):267-272)

[9] Zhang Shaodong, Yi Fan, Hu Xiong. MF radar observations of tides and their interactions over Wuhan (30°N, 114°E) [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(6):430-435. In Chinese (张绍东, 易帆, 胡雄. 武汉上空 30°N, 114°E 潮汐及其相互作用的 MF 雷达观测 [J]. 空间科学学报, **23**(6):430-435)

[10] Liu Renqiang, Lü Daren, Yi Fan, *et al.* Quadratic nonlinear interactions between atmospheric tides and in the mid-latitude winter lower thermosphere [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2006, **68**(11):1245-1259

[11] Liu Renqiang, Lü Daren, Xu Jiyao, *et al.* Phase relationships between tidal horizontal wind components observed in the mid-latitude winter upper mesosphere [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2008, **70**(1):1-12

[12] Xiao Cunying, Hu Xiong, Zhang Xunxie, *et al.* Interpretation of the mesospheric and lower thermospheric mean winds observed by MF radar at about 30°N with the 2D-SOCRATES model [J]. *Adv. Space Res.*, 2007, **39**(8):1267-1277

[13] Briggs B H, Phillips G J, Shinn D H. The analysis of observations on spaced receivers of the fading of radio signals [J]. *Proc. Phys. Soc.*, 1950, **B63**(2):106-121

[14] Briggs B H. The Analysis of Spaced Sensor Records by correlation techniques [M]. Handbook for MAP, 1984, **13**:166-186

[15] Meek C E. An efficient method for analyzing ionospheric drift data [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1980, **40**:835-839

[16] Shu Weiping, Zhao Zhengyu. Model of atmospheric backscatter on wind measurements using far-field approximation method [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2005, **20**(6):795-801. In Chinese (舒卫平, 赵正予. 基于远场近似法建立的大气风场测量散射模型 [J]. 电波科学学报, 2005, **20**(6):795-801)

[17] Ratcliffe J A. Some aspects of diffraction theory and their application to the ionosphere [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 1956, **19**:188-267

[18] Holdsworth D A. Thesis, Analysis with application to atmospheric radar [D]. Australia:University of Adelaide, 1995