

三角尺度效应对中频雷达风场探测的影响分析

赵 军,赵正予

(武汉大学电子信息学院,湖北武汉 430079)

摘 要: 采用空分天线测风模式的中频雷达在使用全相关分析算法时,天线阵尺度的变化会带来风速风向的计算偏差,称为三角尺度效应.由于三角尺度效应的存在,中频雷达天线设计必须考虑天线阵尺度的影响因素.本文主要从两个方面分析天线阵尺度对 MF 雷达风场探测的影响:(1)天线阵尺度对互相关函数最大值校正误差的影响;(2)天线阵尺度对数据采信率的影响.分析结果表明:为保证较高的数据采信率,天线阵尺度应小于衍射图尺度.而在满足天线阵尺度小于衍射图尺度的范围内,选择较大的天线尺度将有助于提高平均测风精度.最后提出了中频雷达天线阵尺度选择建议.

关键词: 中频雷达;三角尺度效应;全相关分析

中图分类号: TN957.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1389-05

The Effect of Triangle Size Effect on Wind Velocity Estimation for MF Radar

ZHAO Jun, ZHAO Zheng-yu

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract: Triangle Size Effect (TSE) is one of the major sources of wind estimate bias in SA mode for MF radar. So the size of antenna arrays must be considered in the design of MF radar. The effect of TSE on MF radar is analyzed from the following two aspects: (1) How the size of antenna arrays influence the error of cross-correlation function maximum; (2) How the size of antenna arrays influence the acceptance rate. The results show that the size of antenna arrays should be smaller than the patterns size to ensure the high acceptance rate. When the above condition is satisfied, the larger size of antenna arrays, the lower wind estimates bias. Finally, how to choose the appropriate size of antenna arrays is discussed.

Key words: medium frequency radar; triangle size effect; full correlation analysis

1 引言

部分反射 MF 雷达(Partial reflection MF radar)对 MLT (mesosphere-lower thermosphere)区域的探测是 MLT 区域风场及电子密度数据的重要来源^[1~5]. MF 雷达测量大气风场通常采用空分天线(Spaced Antenna, SA)和多普勒波束扫描(Doppler Beam Swinging, DBS)两种模式.在 SA 探测模式下,计算大气风场主要使用全相关分析(Full Correlation Analysis, FCA)算法.这种算法最早由 Briggs 提出^[1],主要用于分析随机运动的模式,例如无线电实验中常见的电离层漂移.后来,Fraser 将 FCA 技术应用在部分反射 MF 雷达上^[2].在 FCA 算法与 DBS、流星尾漂移、火箭等探测技术的对比试验中,计算结果表现出了较好的一致性^[3~6].雷达软硬件技术的进步推动了 MF 雷达的高速发展^[7].例如:Vincent 和 Reid 领导的澳大利亚小组在 Buckland Park 建造了世界上最大的 MF 雷达站^[8].Manson 和 Meek 领导的加拿大小组研发了先进的 MF 雷达接收机和数据分析方法用于 MLT 区域大

气动力学研究^[9,10].2000 年底,我国从澳大利亚引进了首台 MF 雷达并进行了相关的研究^[11~15].

目前,使用 MF 雷达进行大气风场探测主要存在以下几个方面的问题:(1)采用 SA 测风模式的 MF 雷达在使用 FCA 算法时,天线阵尺度的变化会带来风速风向计算的偏差,称为三角尺度效应(Triangle Size Effect, TSE);(2)70km 以下常因为信噪比过低而无法进行风场计算;(3)100km 附近会出现因接收机饱和而导致的风场速度计算误差.其中,TSE 是进行 MF 雷达天线设计时必须考虑的因素.

第一个对 TSE 作详细分析的是 Golley 和 Rossiter,他们利用 Buckland Park 中频雷达大型天线阵配置了多组不同尺度的三角形阵用来进行对比试验^[16].后来,Meek 通过理论分析认为接收机噪声是导致 TSE 的主要原因^[17].而 Fedora 则将 TSE 归因于天线间的耦合^[18].Holdsworth 在其论文中分析了 4 种可能导致 TSE 的因素:接收机噪声、接收通道不均衡、信号量化和接收机饱和^[19].

本文将从两个方面分析天线阵尺度对 MF 雷达风

场探测的影响:(1)天线阵尺度对互相关函数最大值校正误差的影响;(2)天线阵尺度对数据采信率的影响。

根据文献[20]可知,风场速度出现计算误差的一个重要原因是相关函数最大值存在校正误差.在经典 FCA 理论中,天线阵尺度、天线间相关函数、大气特征参数三者满足 Briggs 时间-空间相关函数假设.也即是,天线阵尺度 R 、互相关曲线最大值 ρ_{\max} 、风场速度 (V_x, V_y) 可通过时间-空间相关函数联系在一起.为了分析天线阵尺度对互相关函数最大值校正误差的影响,本文定义了互相关函数最大值的校正误差允许窗口宽度 W_ρ ,并分析了不同风速、风向条件下,天线阵尺度 R 与互相关曲线最大值校正误差允许窗口宽度 W_ρ 的关系.

数据采信率和天线阵尺度 R 之间的关系与天线间互相关函数波形有关.理想情况下,天线间的互相关函数常假设为高斯函数^[1].但在实际观测中,互相关函数常存在一定的波动,其“主峰”旁常存在较多“侧峰”.随着 R 的增大,互相关函数的“主峰”会逐渐减小.当“主峰”最大值接近“侧峰”最大值或者更小时,就会出现因无法正确识别“主峰”而导致的 FCA 计算失败,相关数据被拒绝采信.因此, R 过大将导致数据采信率的降低.

本文最后依据以上两方面的分析结果,提出 MF 雷达天线阵尺度 R 选择建议.

2 天线阵尺度与风场计算误差

在经典 FCA 理论中,天线阵尺度、天线间相关函数、大气特征参数三者满足 Briggs 时间-空间相关函数假设.这里采用高斯形式^[19,21],即:

$$\rho(\xi, \eta, \tau) = \exp[-(a\xi^2 + b\eta^2 + \tau^2 + 2f\xi\tau + 2g\eta\tau + 2h\xi\eta)] \quad (1)$$

其中: (ξ, η) 为天线间距.

时间-空间相关函数的特征椭圆定义为:

$$\rho(\xi, \eta, 0) = 0.5 \quad (2)$$

当天线间距位于特征椭圆时,其互相关函数零延迟相关度等于 0.5.

为了方便表示大气特征参数,我们将式(1)改写成如下形式:

$$\rho(\xi, \eta, \tau) = \exp\left\{-\left(\frac{(\xi - V_x\tau)\cos\theta + (\eta - V_y\tau)\sin\theta}{A}\right)^2 + \left(\frac{-(\xi - V_x\tau)\sin\theta + (\eta - V_y\tau)\cos\theta}{B}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{K}\right)^2\right\} \quad (3)$$

其中: (V_x, V_y) 为风场速度在 x 轴和 y 轴上的分量; A 为特征椭圆长半轴长度; B 为特征椭圆短半轴长度; θ 为特征椭圆长轴与 x 轴夹角; K 为时间轴衰减尺度.

另外,特征椭圆的轴比 R_{ax} 和衍射图的尺度 $S_{0.5}$ 分

别定义为:

$$R_{ax} = A/B \quad (4)$$

$$S_{0.5} = \sqrt{AB} \quad (5)$$

在 SA 测风模式下,天线阵通常使用正三角形布局,当天线配置如图 1 所示时,天线 a 、 b 、 c 之间的距离分别为:

$$(\xi_{ab}, \eta_{ab}) = (R\cos(0^\circ), R\sin(0^\circ)) = (R, 0) \quad (6)$$

$$(\xi_{bc}, \eta_{bc}) = (R\cos(120^\circ), R\sin(120^\circ)) = (-0.5R, 0.866R) \quad (7)$$

$$(\xi_{ac}, \eta_{ac}) = (R\cos(240^\circ), R\sin(240^\circ)) = (-0.5R, -0.866R) \quad (8)$$

其中, R 为天线阵尺度.将式(6)~(8)带入式(3)可得天线 a 、 b 、 c 间的互相关函数和平均自相关函数分别为:

$$\rho_{ab}(\tau) = \rho(\xi_{ab}, \eta_{ab}, \tau) = \exp\left\{-\left(\frac{(R - V_x\tau)\cos\theta + (-V_y\tau)\sin\theta}{A}\right)^2 + \left(\frac{-(R - V_x\tau)\sin\theta + (-V_y\tau)\cos\theta}{B}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{K}\right)^2\right\} \quad (9)$$

$$\rho_{bc}(\tau) = \rho(\xi_{bc}, \eta_{bc}, \tau) = \exp\left\{-\left(\frac{(-0.5R - V_x\tau)\cos\theta + (0.866R - V_y\tau)\sin\theta}{A}\right)^2 + \left(\frac{-(-0.5R - V_x\tau)\sin\theta + (0.866R - V_y\tau)\cos\theta}{B}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{K}\right)^2\right\} \quad (10)$$

$$\rho_{ac}(\tau) = \rho(\xi_{ac}, \eta_{ac}, \tau) = \exp\left\{-\left(\frac{(-0.5R - V_x\tau)\cos\theta + (-0.866R - V_y\tau)\sin\theta}{A}\right)^2 + \left(\frac{-(-0.5R - V_x\tau)\sin\theta + (-0.866R - V_y\tau)\cos\theta}{B}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{K}\right)^2\right\} \quad (11)$$

$$\rho_0(\tau) = \rho(0, 0, \tau) = \exp\left\{-\left(\frac{(V_x\tau)\cos\theta + (V_y\tau)\sin\theta}{A}\right)^2 + \left(\frac{-(V_x\tau)\sin\theta + (V_y\tau)\cos\theta}{B}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{K}\right)^2\right\} \quad (12)$$

其中: $\rho_{ab}(\tau)$ 、 $\rho_{bc}(\tau)$ 、 $\rho_{ac}(\tau)$ 为互相关函数, $\rho_0(\tau)$ 为平均自相关函数.

在 SA 模式三天线测风系统下,天线阵尺度、天线间相关函数、大气特征参数三者即满足式(9)~(12)的关系.

由于正三角形天线阵为对称分布,所以每对天线间的互相关函数校正误差对 FCA 计算的影响也是对称的.为简化仿真计算过程,特指定 ρ_{\max} 的校正误差 $\Delta\rho$ 为天线 a 、 b 间互相关函数的校正误差,并假设天线 a 、 c 和天线 b 、 c 间的互相关函数校正误差为零.

定义 V 和 θ 分别为风场速度矢量 (V_x, V_y) 的模和与 x 轴正向的夹角(如图 1 所示),并且定义风场速度计算误差 ΔV 和风场方向计算误差 $\Delta\theta$ 分别为:

$$\Delta V = \sqrt{(V'_x)^2 + (V'_y)^2} - \sqrt{(V_x)^2 + (V_y)^2} \quad (13)$$

$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{V'_y - V_y}{V'_x - V_x}\right) \quad (14)$$

其中: (V'_x, V'_y) 为 ρ_{\max} 校正误差等于 $\Delta\rho$ 时的 FCA 风场计算结果.

为分析天线阵尺度对互相关函数最大值校正误差的影响,本文对互相关函数最大值的校正误差允许窗口宽度 W_ρ 进行定义.当设定风场计算误差限制条件为: $|\Delta V| \leq 10\text{m/s}$; $|\Delta\theta| \leq 20^\circ$.我们可通过搜索计算得到满足条件的 $\Delta\rho$ 最大值 $\Delta\rho_+$ 和最小值 $\Delta\rho_-$.定义 $\Delta\rho$ 的误差允许窗口为 $[\Delta\rho_-, \Delta\rho_+]$,窗口宽度 $W_\rho = \Delta\rho_+ - \Delta\rho_-$.误差允许窗口宽度越宽,平均风场计算误差越小.

仿真计算的主要参数在表 1 中列出.不同天线阵尺度 R 所对应的互相关函数可通过式(9)~(12)计算得到.仿真计算中,衍射图尺度为 200m 或 300m 时, R 值域设定为 $[100, 400]$;衍射图尺度为 500m 时, R 值域为 $[100, 700]$.另外, FCA 算法是利用地面衍射图漂移间接

探测大气风场,而地面衍射图漂移速度仅与目标水平运动速度有关,而与目标高度无关.因此,仿真计算中不再考虑目标的高度.

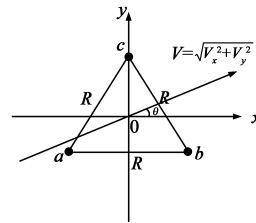


图1 天线配置

表 1 仿真参数	
参数	取值
V	20m/s, 50m/s, 80m/s
θ	$0^\circ \sim 360^\circ$
衍射图尺度	200m, 300m, 500m
时间轴衰减尺度	4s
轴比	1
轴倾角	0°

图 2 所示为三种风速和三种衍射图尺度条件下 W_ρ 随 R 的变化情况.由于仿真结果中, θ 值域为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 和 $[90^\circ, 180^\circ]$ 时,仿真结果完全对称; θ 值域为 $[0^\circ, 180^\circ]$ 和 $[180^\circ, 360^\circ]$ 时,仿真结果也完全对称.因此,图中仅显示了 θ 值域为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 时的结果.

由仿真结果可知:

(1)当 $R < S_{0.5}$ 时, W_ρ 随着 R 的增大而增大.当 $R > S_{0.5}$ 时, W_ρ 等高线分布较为复杂.因此,在天线阵尺度 R 小于衍射图尺度的范围内,选择较大的天线阵尺度 R 将有助于提高测风精度;

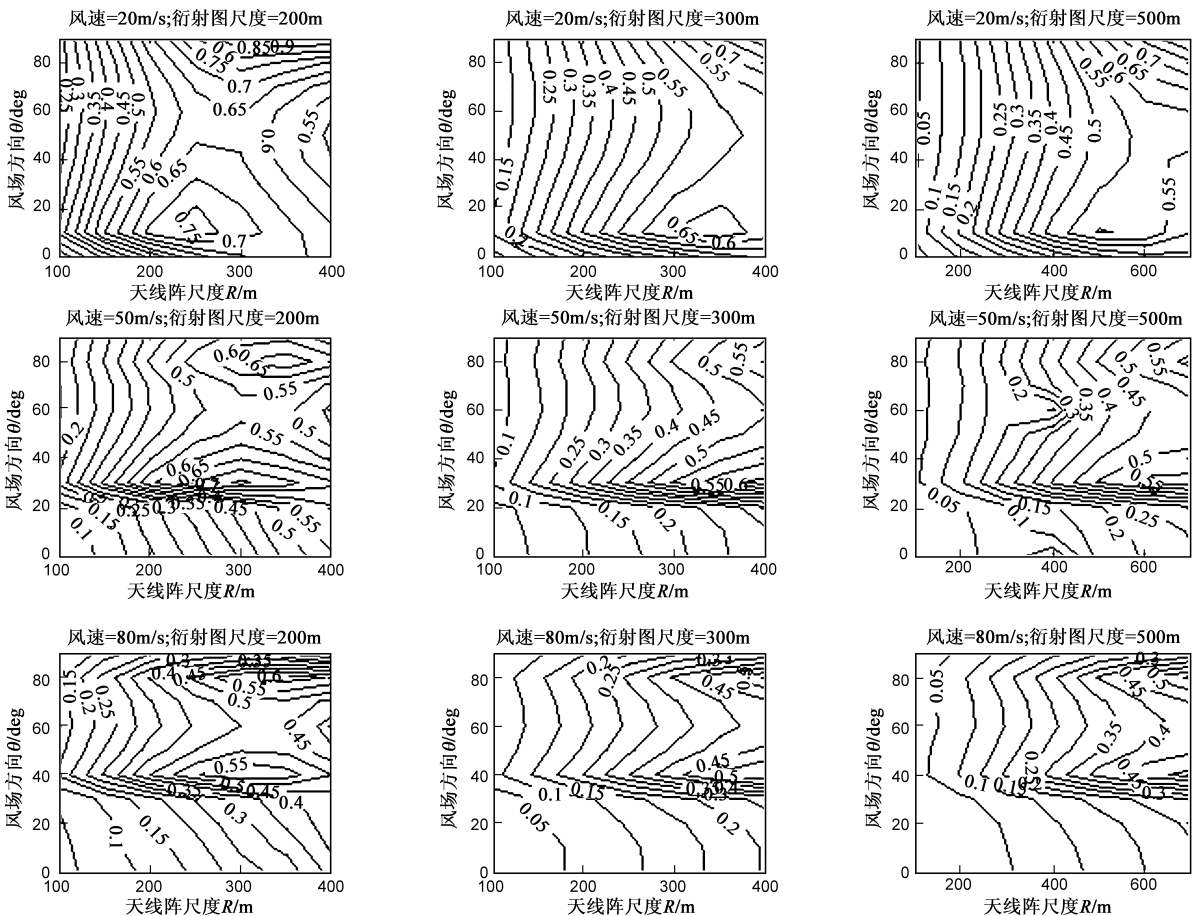


图2 W_ρ 等高线

(2) $S_{0.5}$ 相同并且 R 相同的条件下, 低风速比高风速时的 W_p 数值要大. 因此, 风场探测结果中的低风速实例比高风速实例可信度要高;

(3) W_p 的数值会随着 θ 的变化而变化, 并且, θ 较小时相应的 W_p 较小. 因此, 当天线对与风场方向近似平行时, 其误差对 FCA 计算影响最大.

3 天线阵尺度与数据采信率

理想情况下, 天线间信号互相关函数常假设为高斯函数^[1]. 但是, 实际观测信号的互相关函数常存在一定的波动, “主峰”旁会出现很多“侧峰”(如图 3 所示). 由 Briggs 时间-空间相关函数假设可知, 随着天线间距的增大, 天线间互相关函数“主峰”逐渐减小. 当“主峰”减小到与“侧峰”幅度相近或更低时, 就会出现因无法正确识别“主峰”而导致的 FCA 计算失败, 相关数据被拒绝采信. 因此, 天线阵尺度过大会导致数据采信率的降低.

图 3 所示的是不同天线间距下互相关函数的对比. 其数据源于 Holdsworth 散射模型^[22] 仿真结果. 仿真模型参数在表 2 中列出.

图 3 中 5 条曲线分别为天线间距等于 0m、80m、160m、

240m、320m 时的互相关函数. 由于模型中风场速度较小, “主峰”都位于零延迟附近. 天线间距为 0m 时, 互相关函数等于自相关函数, 最大值为 1. 随着天线间距的增加, 互相关“主峰”逐渐降低. 当“主峰”最大值降低到 0.5 以下, “主峰”与“侧峰”的区别逐渐模糊. 为了保证数据有较高的采信率, 互相关“主峰”最大值被要求大于 0.5. 根据式(2)、(5)可知, 特征椭圆为互相关函数零延迟等于 0.5 的天线间距集合. 而衍射图尺度等于特征椭圆的平均半径. 因此, 衍射图尺度可近似作为天线阵尺度最大值的设定依据.

图 4 为衍射图尺度统计结果. 数据时间为 2002 年 5 月至 2002 年 11 月. 图 4 中, 上部分为衍射图尺度分布统计图; 下部分为满足衍射图尺度大于天线阵尺度的百分比统计图. 图 4 由衍射图尺度统计结果可知:

- (1) 衍射图尺度主要分布在 260m 附近.
- (2) 超过 90% 的衍射图尺度处于 170m ~ 600m 之间;

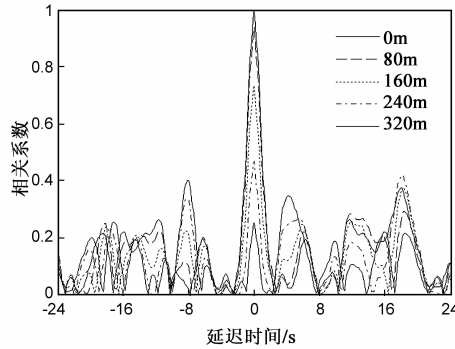


图3 不同天线间距的互相关曲线对比

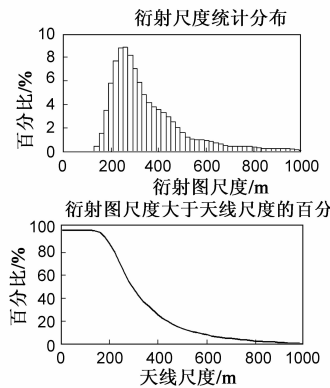


图4 衍射图尺度统计结果

(3) 当天线阵尺度为 190m 时, 超过 95% 的实例满足衍射图尺度大于天线阵尺度的条件.

4 结论

本文主要从两个方面分析天线阵尺度对 MF 雷达风场探测的影响: (1) 天线阵尺度对互相关函数最大值校正误差的影响; (2) 天线阵尺度对数据采信率的影响. 通过两方面的分析可得到以下结论:

- (1) 在天线阵尺度 R 小于衍射图尺度的范围内, 因为 W_p 随着 R 的增大而增大, 所以选择较大的天线阵尺度 R 将有助于提高平均测风精度;
- (2) 风场探测结果中的低风速实例比高风速实例可信度要高;
- (3) 当天线对与风场方向近似平行时, 其误差对 FCA 计算影响最大;
- (4) 天线阵尺度 R 过大会导致数据采信率的降低;
- (5) 根据统计结果, 衍射图尺度主要分布在 260m 附近. 其中, 超过 90% 的衍射图尺度处于 170m ~ 600m 之间. 当天线阵尺度为 190m 时, 超过 95% 的实例满足衍射图尺度大于天线阵尺度的条件.

综合上述分析结果, 推荐 MF 雷达天线阵尺度为 190m.

致谢 感谢中国人民解放军理工大学为本文提供了部分中频雷达探测数据.

参考文献:

- [1] Briggs B H. The analysis of spaced sensor records by correlation techniques[A]. Handbook for MAP 13[C]. Urbana: University of Illinois, 1984. 166 - 186.
- [2] Fraser G J. The measurement of atmospheric winds at altitudes of 64 - 120 km using ground-based radio equipment[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1965, 22(2): 217 - 218.
- [3] Stubbs T J. The measurement of winds in the D-region of the ionosphere by the use of partially reflected radio waves[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1973, 35(5):

909 - 919.

- [4] Vincent R A, Stubbs T J, et al. A comparison of partial reflection drifts with winds determined by rocket techniques[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1977, 39(7): 813 - 821.
- [5] Labitzke K, Manson A H, et al. Comparison of geostrophic and observed winds in the upper mesosphere over Saskatoon, Canada[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1987 (10), 49: 987 - 997.
- [6] Cervera M A, Reid I M. Comparison of simultaneous wind measurements using colocated VHF meteor radar and MF spaced antenna radar systems[J]. *Radio Science*, 1995, 30(4): 1245 - 1261.
- [7] 丁定浩. 雷达固态发射机可靠性评估和失效判别的定量方法[J]. *电子学报*, 1997, 25(9): 92 - 94.
Ding Ding-hao. A quantitative method of the reliability evaluation and failure criteria on radar solid transmitter[J]. *Acta Electronic Sinica*, 1997, 25(9): 92 - 94. (in Chinese)
- [8] Reid I M, Vandepier B G, et al. The new adelaide medium frequency doppler radar[J]. *Radio Science*, 1995, 30(4): 1177 - 1189.
- [9] Manson A H, Gregory J B, et al. Winds and wave motions to 110 km at mid-latitudes I. partial reflection radiowave soundings, 1972 - 73[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1974, 31 (8): 2207 - 2215.
- [10] Manson A H, Meek C, et al. Winter warmings, tides and planetary waves: Comparisons between CMAM (with interactive chemistry) and MFR-MetO observations and data[J]. *Annales Geophysicae*, 2006, 24(10): 2493 - 2518.
- [11] 李凤琴, 胡雄, 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, 22(1): 65 - 71.
Li Fengqin, Hu Xiong, et al. Mesospheric MF radar in Wuhan and its preliminary observation results[J]. *China Journal of Space Science*, 2002, 22(1): 65 - 71. (in Chinese)
- [12] 胡雄, 曾桢, 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.
Hu Xiong, Zeng Zhen, et al. Observations of the mesosphere and lower thermosphere angular spectrum with an MF radar at Wuhan[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2003, 23(4): 256 - 261. (in Chinese)
- [13] 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.
Shu Weiping, Zhao Zhengyu. Model of atmospheric backscatter on wind measurements using far-field approximation method[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2005, 20(6): 795 - 801. (in Chinese)
- [14] 杨涛, 周莹莉, 等. 利用全相关分析方法确定大气风场[J]. *电波科学学报*, 2003, 18(3): 324 - 326.
Yang Tao, Zhou Ying-li, et al. Wind field measurement by

the full correlation analysis method[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2003, 18(3): 324 - 326. (in Chinese)

- [15] 赵军, 赵正予. 武汉部分反射中频雷达天线设计[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(6): 1068 - 1073.
Zhao Jun, Zhao Zheng-yu. Antenna design of Wuhan partial reflection MF radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(6): 1068 - 1073. (in Chinese)
- [16] Golley M G, Rossiter D E. Some tests of methods of analysis of ionospheric drift records using an array of 89 aerials[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1970, 32(7): 1215 - 1233.
- [17] Meek C E. Triangle size effect in spaced antenna wind measurements[J]. *Radio Science*, 1990, 25(4): 641 - 648.
- [18] Fedor L S, Plywaski W. The interpretation of ionospheric radio drift measurements-IV. the effects of signal coupling among spaced sensor channels[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1972, 34(7): 1285 - 1303.
- [19] Holdsworth D A. Signal analysis with application to atmospheric radars[D]. Adelaide: University of Adelaide, 1995.
- [20] 赵军, 赵正予. 数据长度和信噪比对 MF 雷达风场计算的影响分析[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(1): 22 - 28.
Zhao Jun, Zhao Zheng-yu. Effect of data length and SNR on wind velocity estimation for MF radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(1): 22 - 28. (in Chinese)
- [21] Briggs B H, Vincent R A. Spaced-antenna analysis in the frequency domain[J]. *Radio Science*, 1992, 27(2): 117 - 129.
- [22] 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 Science*, 1995, 30(4): 1263 - 1280.

作者简介:



赵 军 男, 1978 年生于河南新乡. 武汉大学空间物理系博士生. 主要从事大气探测雷达方面的研究.

E-mail: zhaojunxinxiang@sohu.com



赵正予 男, 1952 年生于吉林. 武汉大学电子工程系教授, 博士生导师. 现主要从事电离层电波传播、电离层人工变态和电离层斜向返回探测雷达、大气探测雷达方面的研究.

