

(全可动射电望远镜专辑) QTT台址风场分布调控技术

王从思, 王雪晴 and 许谦

Citation: 中国科学: 物理学 力学 天文学; doi: 10.1360/SSPMA2018-00422

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSPMA2018-00422>

Published by the 《中国科学》杂志社

Articles you may be interested in

[\(全可动射电望远镜专辑\) QTT台址自动化电波环境监测系统](#)
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica

[\(全可动射电望远镜专辑\) 大口径射电望远镜台址电磁干扰预测方法](#)
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica

[\(全可动射电望远镜专辑\) 脉冲星数字终端技术综述](#)
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica

[\(全可动射电望远镜专辑\) 大口径射电望远镜电磁兼容控制方法](#)
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica

[\(全可动射电望远镜专辑\) QTT高精度位移促动器设计与测试](#)
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica



基于等效风场试验的 QTT 台址风场分布调控技术方案初探

王从思^{①②*}, 王雪晴^①, 许谦^{②*}, 王娜^②, 郑元鹏^③, 杜彪^③, 连培园^①, 薛松^①, 严粤飞^①, 段玉虎^④, Yu Shi^⑤, Yu Jia^⑤

① 西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西西安 710071;

② 中国科学院新疆天文台, 新疆乌鲁木齐 830011;

③ 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北石家庄 050081;

④ 中国电子科技集团公司第三十九研究所, 陕西西安 710065;

⑤ Department of Mechanical Engineering, University of Chester, Chester CH1 4BJ, UK

*通讯作者 E-mail: congsiwang@163.com, xuqian@xao.ac.cn

收稿日期: 2018-12-31

国家 973 计划(2015CB857100); 陕西省自然科学基金项目(2018JZ5001); 天山创新团队计划(2018D14008); 国家自然科学基金项目(U1737211); 中科院西部之光计划(2017-XBQNXZ-B-024)

摘要 针对高频段大口径全可动射电望远镜 QTT 对电性能的高要求, 必须降低风扰动对天线的影响. 本文分析了 QTT 台址地形地貌以及风场分布的特点, 提出了一种主动降低天线所在区域风速的 QTT 台址风场分布调控技术方案, 进一步搭建了用于 QTT 台址风场分布调控微缩模型的等效风场试验, 通过试验数据分析, 确定了 QTT 风场分布调控技术方案的可行性, 并初步给出了经风场调控后, 风速显著降低的区域范围以及风速降低的幅度, 为 QTT 台址风场分布的调控提供了技术依据, 从而可大大增加射电望远镜的有效观测时间.

关键词 射电望远镜, 反射面天线, 风场分布, 风场调控

PACS: 95.55.Jz, 84.40.Ba, 92.60.Fm, 89.20.Bb

1 引言

伴随着人类历史的发展和科学技术的进步, 射电望远镜观测技术的发展, 极大的推动了天文学的发展, 成为其发展的主要动力之一. 望远镜结构的反射面面积是射电望远镜性能的重要指标之一, 大口径的射电望远镜可以观测更多、更远的天体^[1-2]. 世界上目前已建成的最大口径全可动射电望远镜是美国 2000 年建成的绿岸射电望远镜 (GBT, 口径

100x110m). 我国目前最大口径全可动射电望远镜为上海天文台的 65 米口径射电望远镜, 并拟在新疆奇台县建设 110 米口径全可动射电望远镜 (QTT).

为满足国际天文学发展需求, 大口全可动射电望远镜的研究及建设问题已成为当前天文学领域关注的热点之一. 对于巨型射电望远镜结构, 由于其反射面面积巨大, 重力、风扰、温差等因素会引起望远镜反射面的形状变化^[3-6], 降低反射面的形状拟合精度, 引起偏焦和指向误差, 降低望远镜的灵敏度及分辨率, 影响其工作性能, 其中重力、温差等

为慢变环境因素,所产生的结构变形对天线指向精度的影响可通过提前对其估算并建立表格进行补偿,而风扰动则由于其随机性和时变性,已成天线观测环境载荷中最复杂也是最难以解决的问题^[7-8].

在以往,大多数天线都是通过三种方法来减少风扰动对天线性能的影响^[9-11].一是采用闭环控制系统实现指向控制,其实质是根据指向要求方位和俯仰方向分别控制其转轴旋转到指定位置,转角位置由多极旋转变压器或高精度编码器检测.为提高跟踪性能和可靠性,目前普遍采用基于PID的位置环、速度环和电流环三闭环控制方式^[12-13].但这种方法对于大口径、高频段、高指向精度的反射面天线而言,已不能满足要求;二是从鲁棒控制和最优控制理论出发,提出了相应的抗风载控制补偿方法,但据此提出的种种补偿方法,其补偿能力均非常有限;三是在天线外部修建一个天线罩来隔绝外部环境因素对天线的影响^[14],虽然天线罩对减小风荷载有很明显的作用,但天线罩是天线前面的障碍物,对天线辐射波会产生吸收和反射,改变天线的自由空间能量分布^[15],并在一定程度上影响天线性能.而且天线罩大大增加了工程造价,对大型天线来说是不现实的.

为此,本文提出了一种 QTT 台址风场分布调控技术,与原有的被动的对天线进行抗风扰控制和补偿不同,该技术方案思路为通过研究台址地形地貌特点、风场分布规律,在台址区域内合理的布置林带、林网,来调控台址的风场分布,可以降低天线所在区域风场的风速,减少系统对天线抗风扰控制和补偿的工作量,增加天线的在极限环境条件下的工作时长,从而主动地减少风扰动对天线的影 响,以增加射电望远镜的有效观测时间.

2 风场分布调控技术方案

如图 1 所示 QTT 台址距奇台县城以南直线距离约 46km,位于北纬东天山北麓,是一处东西约 1.5km、南北约 2km 四面环山的矩形盆地,周围山梁海拔从 1860-2250m 不等,与周围区域形成较好的隔离,盆地内海拔约 1730-1830m.其东北部和西南部山梁较高,台址区域风向常年为自西北向东南方向,即图中自右下到左上方向.其地形地貌和环境风场条件适合通过在台址区域内合理布置林带、林网来进

行风场分布调控,如图 2 所示为 QTT 台址风场调控技术方案.

2.1 建立环境风场的分布数据库

根据已有的大气边界层风特性,天线台址处的地形地貌特征以及天线台址处多年的风场观测资料,其中包括在不同时刻下各观测位置处的风场情况.合理简化 QTT 台址地形地貌、获知环境风场分布规律,建立环境风场数据库.

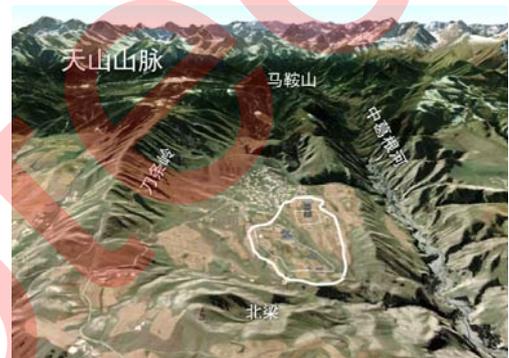


图 1 QTT 台址示意图

Figure 1 The site for QiTai Telescope.

2.2 微缩模型等效风场试验方法

风洞试验源自美国,起初是建立大气边界层风洞,随后这项研究手段发展起来,目前国内的风洞技术也逐渐完备起来.风洞试验是一种以空气动力学理论为基础的试验方法,在模拟的风洞中安放要研究的实体模型,一般试验模型是按照实物缩小一定的比例,给模型一个相对速度值,来研究气体流动对结构产生的影响,从试验获得数据,来进一步来对结构进行分析和计算.由于风洞试验是在较稳定的室内环境中进行,可避免由于天气等偶然因素对结果产生的偏差,这也使得对速度和温度的控制更加精准.

本方案根据风洞试验原理,拟设计等效风场试验,设计搭建台址地理环境的微缩模型、用于风场分布调控的林带的微缩模型以及射电望远镜的微缩模型,在等效风洞中,对整体模型进行等效风场试验,探索望远镜台址的风场分布调节规律.

风洞试验方法虽然已经日渐成熟,但仍存在一定的局限性.第一,由于模型是按一定比例做成的微缩模型,所以对于细微处和突变处流动特性的描述存

在弊端,而且实物上较小结构处的流场情况信息较难获取;第二,由于自然界中大多数实际工程情况,都将风作为大气边界层内的近地风探讨,模拟的流场对于大气边界层的风的流动会有差别,也会对结果有影响;第三,微缩模型的制作很有考究,从开始就要精致周到的设计好各种条件,模型的制作成本较高;第四,风洞试验不能模拟强风,对一定因素下出现的罕遇情况下风场变化的分析无能为力,得不到强风的作用效应,就无法开展相应的研究.

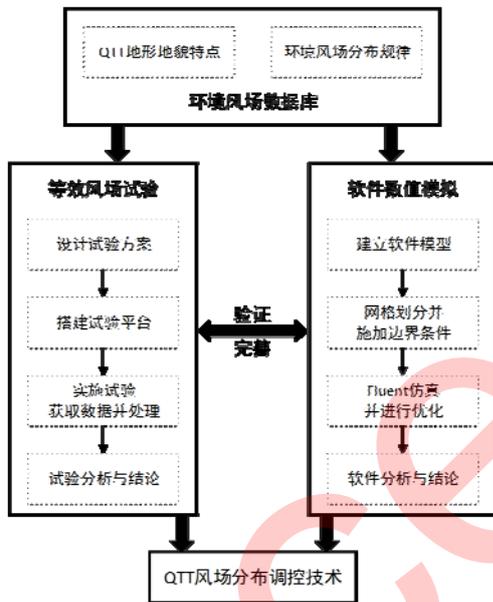


图2 QTT台址风场分布调控技术方案
Figure 2 The regulation scheme for wind distribution.

2.3 计算机数值模拟方法

实测方法的缺陷和风洞试验的限制,从一定程度上推进了计算风工程的发展.计算机数值模拟方法避开了上述的问题,该法以计算流体力学为基础,借助于先进的计算机技术,能得到更准确全面的数据,还可以通过更加直观的图形来观察变化趋势,这种方法既节省人力,经济投入也不会太大,可行性大.并且很突出的优势是可以模拟多种情况下的风载效应,如风速改变、尺寸改变、材料改变、湍流模型改变等,这大大降低了人员的工作量和资金投入,周期短,还可以得到不同条件下的计算结果用以比较分析,信息完整性和精确度更高,具有现实意义,因而渐渐被应用于实践工程中.

本研究方案在等效风场试验基础上,进行计算机数值模拟分析.计算机数值模拟分析拟基于GIS数据来拟合得出天线台址地形地貌曲面^[16],然后利用Fluent进行风场数值求解,通过数值模拟结果与试验实测结果进行对比分析,验证和完善风场调控技术.

3 风场分布调控技术方案可行性分析

为分析QTT台址风场分布调控技术方案的可行性,首先搭建了一个简单的等效风场试验平台,进行了微缩模型等效风场试验,该试验平台如图3所示.

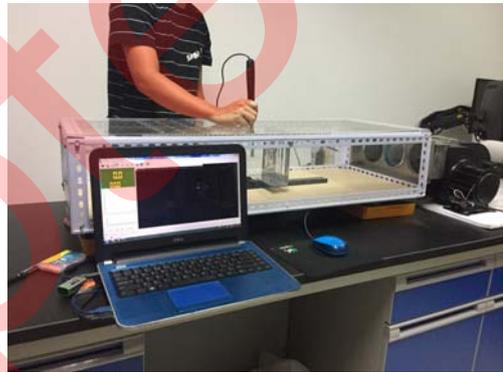


图3 微缩模型等效风场试验平台
Figure 3 The experimental facility for miniature model of antenna.

3.1 搭建等效风场试验平台

该试验平台基于相似理论设计,主要由三部分组成,由等效风场部分、风场调控板部分和风速测试装置部分.等效风场部分用于模拟天线台址处的风场,风场调控板部分是用于模拟林带对环境风场的调控作用,风速测试装置则是用于对试验风场风速数据的获取.该平台基本上具备了本文所提调控技术方案的必要条件.

等效风场部分由风道和风机组成,风道用来模拟望远镜台址区域部分的风场,结合试验目标和等效风场试验条件,制作了缩尺比为1:4000的试验风道,其俯视图如图4所示,风道内风向从左至右,其顶部开测试孔以方便传感器伸入测试风速,测试孔间距50mm,呈7行10列阵列分布,风机作为提供风道内所需的风场的风源,如图3中最右侧部分所示,根据QTT台址区域的风场特性资料,可按大气边界层的平均风速剖面的指数率来描述,即

$$U(z) = U_r (z/z_r)^\alpha \quad (1)$$

式中 z 为任意高度, $U(z)$ 为 z 处的平均风速, z_r 为某一参考高度, U_r 为参考高度处的平均风速, α 为地面粗糙度指数, 其数值与地面粗糙度类别有关, QTT 台址区域的风场特性参数基本与 B 类场地风剖面参数相符, 本试验中风道内风场情况与其也基本相符.

风场调控板为铝板所制, 如图 5 所示, 风场调控板 1 为开了阵列孔洞的铝板, 风场调控板 2 为在其左

右两侧各开了 3 个约 45 度角导流缝的铝板, 以作为对环境风场进行调控的林带的等效微缩模型. 试验时将其底部固定在风道底板上, 安装位置在测试孔第 2 列和第 3 列中间, 横跨 3、4、5 行, 风场调控板俯视安装位置如图 4 中绿色宽线所示, 在试验风道内的空间位置见图 5, 这样可以测量板前后的风速, 且满足其前方风场改变区域小、其后风场改变区域大的合理性.

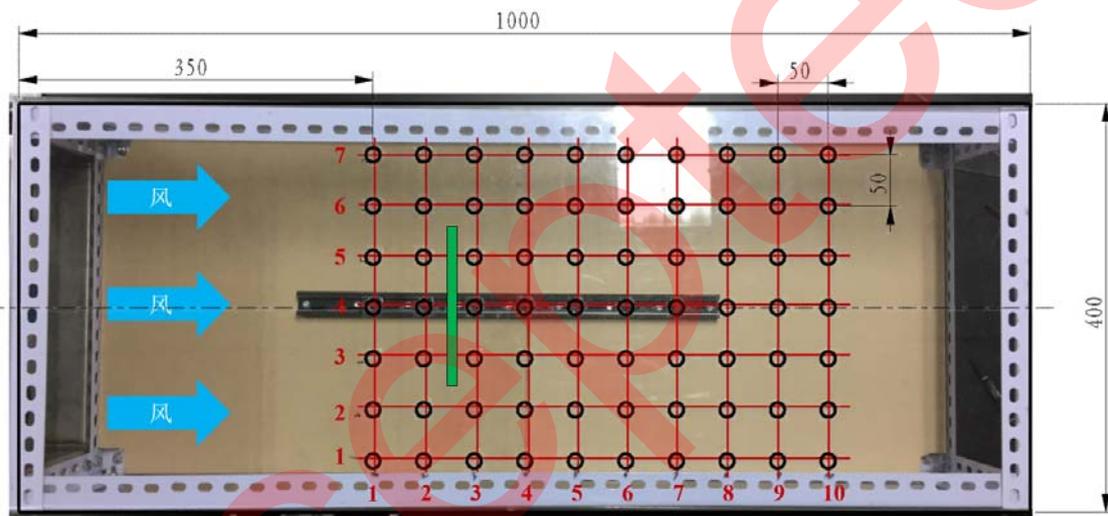


图 4 试验风道及测试孔俯视图
Figure 4 The wind channel and test hole.

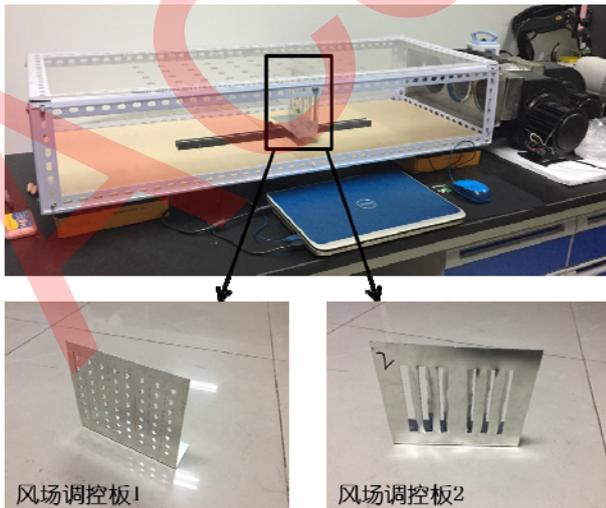


图 5 风场调控板
Figure 5 Regulation plane with different holes and diversion slots

表 1 AR866 主要性能参数表

Table 1 AR866 Main Performance Parameter Table

技术指标	AR866
风速测量范围	0~30m/s
风速测量误差	±1%
风温测量范围	0~45℃
温度误差	±1℃
风速分辨率	0.01m/s
USB 外接电脑功能	有

风速测试装置是型号为希玛 AR866 的热敏式风速仪, 其主要参数如表 1 所示, 进行试验时如图 3 所示手持握杆竖直伸入如图 4 所示的测试孔中不同长度, 来使传感器探头位于风场内的不同高度, 测得 70 个测试孔在 3 个高度, 即距离试验风道底部 125mm、75mm 和 25mm 位置处的风速, 连接计算机,

使用风速仪配套 Anemometer 计算机软件记录数据, 每个测试点测得并保存连续时间内的 10 个风速数据, 导出 Excel 文件以便后期处理.

3.2 试验风场测量与结果

在本次等效风洞试验中, 首先控制试验风道内的风速, 使其较符合台址真实风场环境, 利用传感器测试, 得出未调控前的环境风场分布情况, 然后安装风场调控板改变试验风道内风场分布, 再测试得出经风场调控后的风场分布.

通过对不安装风场调控板的环境风场、使用风场调控板 1 的工况 1 和使用风场调控板 2 的工况 2 这 3 个情况下在 3 个高度处的风速测试, 共得到 630 个风场风速数据. 我们对这些数据进行分析, 用测试点的 2 个属性分 2 种方式来处理数据, 数据处理方法详见表 2.

图 6 为风场分布折线图, 横坐标为风速测试点所在的列数, 纵坐标为风速大小(m/s), 高度 1 为距离试验风道底部 125mm 的高度, 高度 2 为距离试验风道

底部 75mm 的高度, 高度 3 为距离试验风道底部 25mm 的高度, 图例为蓝色三角形的线型代表的是环境风场风速, 图例为橙色矩形的线型代表的是工况 1 风场风速, 图例为灰色 x 形的线型代表的是工况 2 风场风速, 其中试验风道内的风向是向横坐标正向, 即每幅折线图表示在两种调控情况下同一高度处同一行不同列的测试点的风速情况. 可以看出在所有的 3 个高度以及 3 行的 9 个风速折线图中, 未经调控的环境风场与调控后的工况 1、工况 2 的风速有较大差异, 在调控板前的 1、2 两列风速差异很小, 在调控板后的 3 至 10 列风速差异较大, 可明显看出风场风速经调控后风速显著降低.

表 2 试验数据处理方法表

Table 2 Experimental Data Processing Method Table

技术指标	属性 1	属性 2
折线图	不同工况	同一高度
侧剖云图	同一工况	不同高度

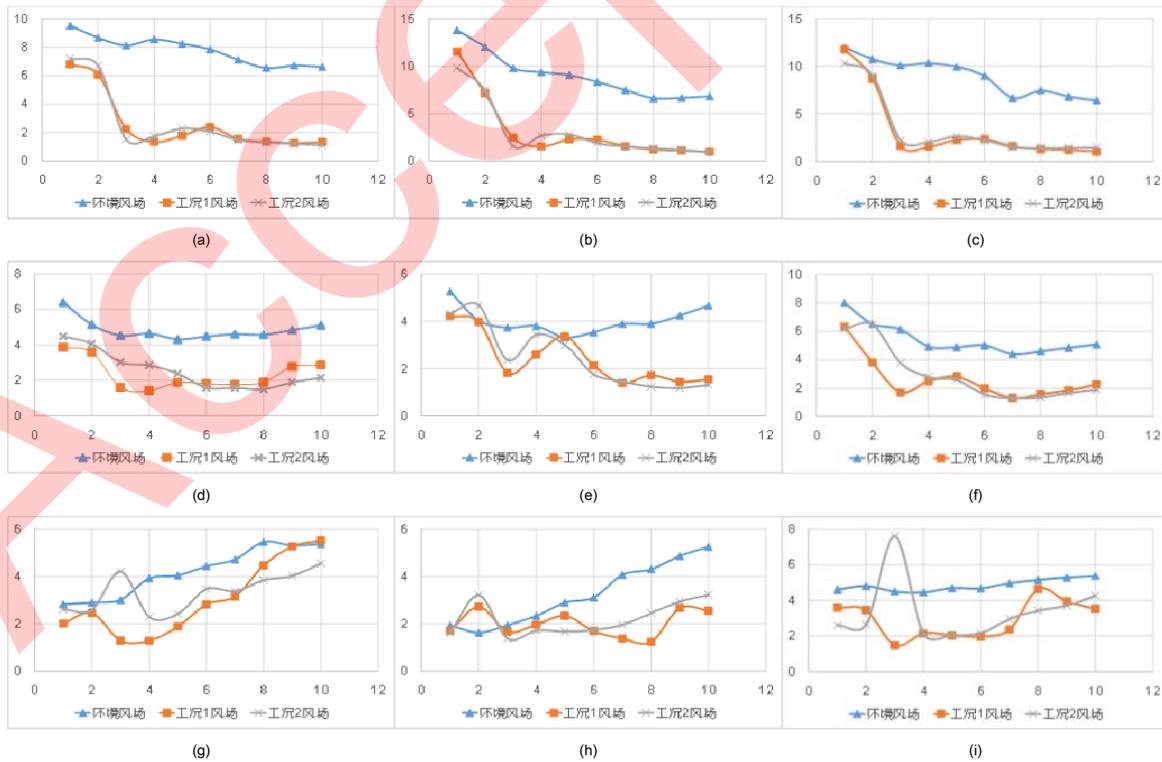


图 6 风场分布折线图. (a) 1 高度第 3 行; (b) 1 高度第 4 行; (c) 1 高度第 5 行; (d) 2 高度第 3 行; (e) 2 高度第 4 行; (f) 2 高度第 5 行; (g) 3 高度第 3 行; (h) 3 高度第 4 行; (i) 3 高度第 5 行.

Figure 6 The polygonal line map for wind speed distribution. (a) Height 1 line 3; (b) Height 1 line 4; (c) Height 1 line 5; (d) Height 2 line 3; (e) Height 2 line 4; (f) Height 2 line 5; (g) Height 3 line 3; (h) Height 3 line 4; (i) Height 3 line 5.

图7为风场分布侧剖面云图,是使用实测数据经过插值得到的风场风速云图.横坐标为风速测试点所在的列数,纵坐标为测试点高度,实测了高度1、高度2和高度3这3个高度,右侧图例为各颜色所代表的风速(m/s)的大小,颜色越偏红代表风速越高,颜色越偏蓝色代表风速越低,即每幅侧剖面云图表示的是同一调控情况下不同高度同一行不同列的测

试点风速情况.可以看出未加调控时的环境风场是在较低高度上风速较小,较高高度上风速较大,这是符合大气边界层平均风速剖面的指数律的,通过对工况1和工况2风场分布侧剖面图的观察可以发现,经调控后风速显著降低的区域在高度1至2和第5至9列的这一区域范围内.

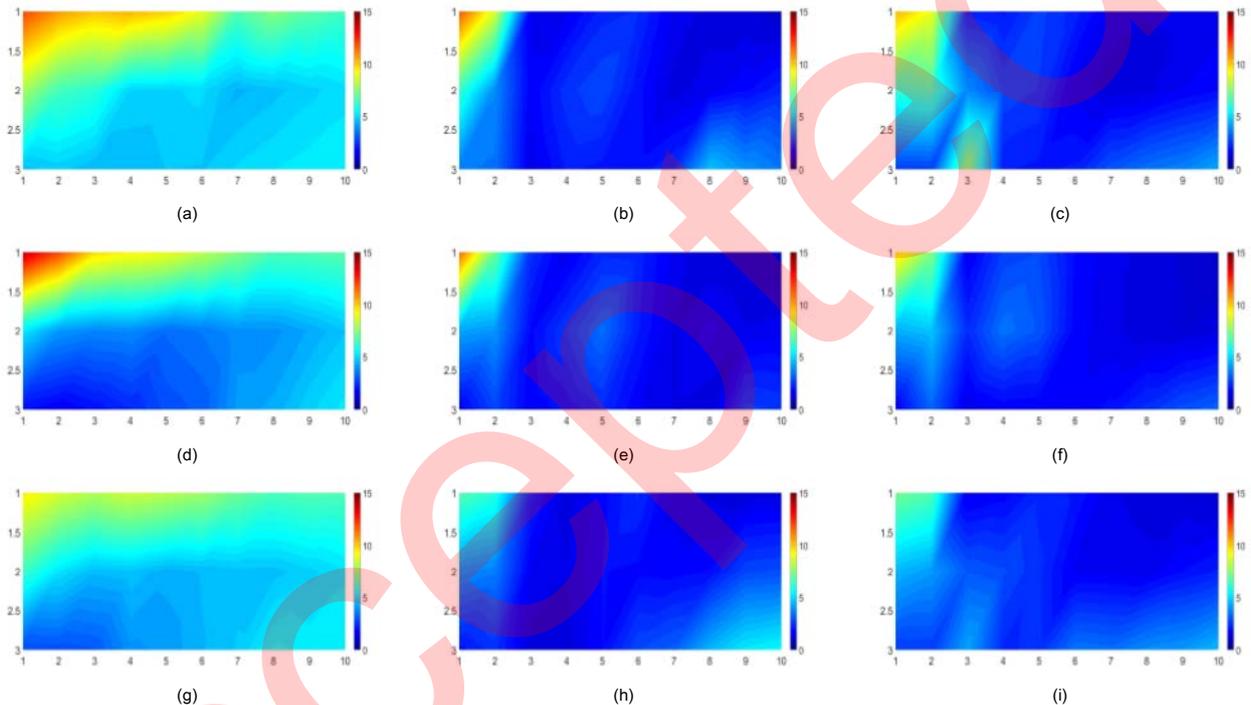


图7 风场分布侧剖面云图.(a)环境风场第5行;(b)工况1风场第5行;(c)工况2风场第5行;(d)环境风场第4行;(e)工况1风场第4行;(f)工况2风场第4行;(g)环境风场第3行;(h)工况1风场第3行;(i)工况2风场第3行.

Figure 7 The wind speed distribution nephogram in side view. (a) Environmental wind field line 5; (b) Case 1 line 5; (c) Case 2 line 5; (d) Environmental wind field line 4; (e) Case 1 line 4; (f) Case 2 line 4; (g) Environmental wind field line 3; (h) Case 1 line 3; (i) Case 2 line 3.

通过综合以上分析试验获得的数据,以及后处理中得到的风场风速分布折线图和插值云图,可得出如下结论:

(1)风场分布调控技术方案对改变风场情况、降低区域风速确实有明显作用;

(2)风场调控板对其后方风场的主要作用区域为3至5行、5至9列、以及1和2高度所围成的这一空间区域;

(3)从测得的数据中可以看出,风场风速从原始的5-8m/s左右,变为风场调控板后方区域在1-2m/s左右,风速降低约75%.

4 结论

本文针对 QTT 台址风场分布调控技术展开研究,首先介绍了射电望远镜受风扰动影响的传统解决方法,然后根据 QTT 台址的地理位置和风场情况,提出了一种全新的主动地风场分布调控技术方案,并通过微缩模型的等效风洞试验,确定了风场分布调控技术方案的可行性,为进一步的计算机软件仿真、优化和试验等方法的研究与实施提供依据.

参考文献

- 1 Y. Rahmat-Samii and R. Haupt, Reflector antenna developments: a perspective on the past, present and future, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 2, pp. 85–95, 2015.
- 2 S. von Hoerner, Design of large steerable antennas, *The Astronomical Journal*, vol. 72, p. 35, 1967.
- 3 A. Greve, D. Morris, Repetitive radio reflector surface deformations, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(6)2005, pp. 2123–2126
- 4 A. Greve and H. J. Karcher, Performance improvement of a flexible telescope through metrology and active control, *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 8, pp. 1412–1420, 2009.
- 5 B. Y. Duan, C. S. Wang, Reflector antenna distortion analysis using MEFCM, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(10) 2009, pp. 3409–3413.
- 6 C. S. Wang, B. Y. Duan, Y. Y. Qiu, On distorted surface analysis and multidisciplinary structural optimization of large reflector antennas, *Structural Multidisciplinary Optimization.*, 33(6) 2007, pp. 519–528.
- 7 Gawronski W. Control and pointing challenges of large antennas and telescopes. *IEEE Transact Control Syst Technol* 2007; 15: 276–289.
- 8 王从思, 肖岚, 项斌斌, 王伟, 许谦, 蒋力, 王娜, 段宝岩. 大型射电望远镜天线主动面补偿研究进展. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(5): 059503, Page 1-16
- 9 Gawronski W. Modeling wind-gust disturbances for the analysis of antenna pointing accuracy. *IEEE Antennas Propagat Magazine* 2004; 46: 50–58.
- 10 N. Ukita, H. Ezawa, B. Ikenoue, et al., Thermal and wind effects on the azimuth axis tilt of the ASTE 10-m antenna. *Nobeyama Radio Observatory*, 10(1-4) 2007, pp. 25–33.
- 11 王从思, 王娜, 连培园, 许谦. 高频段大型反射面天线热变形补偿技术. 北京: 科学出版社, 2018年9月
- 12 Jie Zhang, Jin Huang, Jun Zhou, Congsi Wang, Yao Zhu, A compensator for large antennas based on pointing error estimation under a wind load. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(5):1912–1920.
- 13 Zhang Jie, Huang Jin, Wang Shuangfei, Wang Congsi. An active pointing compensator for large beam waveguide antenna under wind disturbance. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(2): 860–871.
- 14 C. S. Wang, L. Xiao, W. Wang, Q. Xu, B. B. Xiang, J. F. Zhong, L. Jiang, H. Bao, N. Wang, An adjustment method for active reflector of large high-frequency antennas considering gain and boresight, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 17(5)2017, pp. 4301–4312.
- 15 Haddadi A and Ghorbani A. Distorted reflector antennas: analysis of radiation pattern and polarization performance. *IEEE Transact Antennas Propagat* 2016; 64: 4159–4167.
- 16 D. H. Parker, J. M. Payne, J. W. Shelton, and T. L. Weadon, Instrument for setting radio telescope surfaces, in *Proceedings of ASPE 2000 Annual Meeting*, pp. 21–24, Green Bank, WV, USA, October 2000.

Preliminary Study of Regulation Technology of Wind Field Distribution on QTT Site Based on Test of Equivalent Wind Field

Congsi Wang^{①②*}, Xueqing Wang^①, Qian Xu^②, Na Wang^②, Yuanpeng Zheng^③, Biao Du^③, Peiyuan Lian^①, Song Xue^①, Yuhu Duan^④, Yuefei Yan^①, Yu Shi^⑤, Yu Jia^⑤

① Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China

② XinJiang Astronomical Observatory, China Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

③ CETC No.54 Research Institute, Shijiazhuang 050081, China

④ CETC No.39 Research Institute, Xi'an, 710065, China

⑤ Department of Mechanical Engineering, University of Chester, Chester CH1 4BJ, UK

Reducing the effect of wind interference on large reflector antennas is one of the important means to achieve high requirements for the electrical of the antennas with high operating frequency. This paper analyzes the characteristics of the topography and the wind field distribution of the QTT site, a wind field distribution regulate technology of the QTT site with actively to reduce wind speed of the wind field in the area where the antenna is located is proposed, further, an equivalent wind field test for the miniature model of the wind field distribution regulate technology of the QTT site was built, by analyzing test data, the feasibility of the wind field distribution regulate technology of QTT site is determined, and the area where wind speed is significantly reduced and the rate of wind speed reduction is initially given after the wind field regulation, which can provide a technical basis for the regulation of the wind field distribution of the QTT site.

Radio telescope, reflector antenna, wind field distribution, wind field regulation

PACS: 95.55.Jz, 84.40.Ba, 92.60.Fm, 89.20.Bb

Accepted