基于反射面板间角度反馈的主动面补偿技术研究

张惠^{1,2,3}, 李国平^{1,2*}, 张勇^{1,2}

1. 中国科学院国家天文台, 南京天文光学技术研究所, 南京 210042;

2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 南京 210042;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人: E-mail: gpli@niaot.ac.cn

收稿日期: 2018-12-24; 接受日期: 2019-01-18; 网络出版日期: 2019-05-22

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857100)和国家自然科学基金(编号: U1331204)资助项目

摘要 鉴于大型射电望远镜对主动面补偿技术的需求, 本文提出了一种新的主动面补偿方法, 该方法是建立在已完成面型标定的射电望远镜基础上. 在此方法中, 任意相邻的两块反射面板的背面都安装有一个角度传感器; 当望远镜的反射面完成定标时, 此时所有角度传感器被设置成零位; 当望远镜正常运行时, 角度传感器监测相邻面板间的角度变化量; 促动器根据角度传感器的反馈信号完成面型的补偿. 文中, 首先介绍本文的补偿方法, 然后根据此方法完成数学模型的建立, 最后以新疆奇台110 m射电望远镜(QTT)为例说明本文方法所能达到的精度. 本文方法的优势是补偿系统简单、响应速度快、可对任意时刻面型进行估计和补偿.

关键词 主动面, 面型补偿, 面型精度, 射电望远镜, QTT

PACS: 84.40.Ba, 95.45.+i, 95.55.Jz, 95.90.+v

1 引言

射电望远镜的天线增益是其性能的保证, 也就是说为了让射电望远镜的性能达到良好的使用要求, 就必须让其主反射面的面型精度足够高. 在主动面技术出现以前, 大型的射电望远镜只能在特定的方向上进行调节定标, 即在此特定的方位上可以保证其增益达到使用要求. 但是当其姿态发生变化时, 即背架在重力、风载、温载等作用力下发生变形时, 射电望远镜的主反射面将失去其面型精度, 相应地, 天线增益下降, 望远镜性能变差. 而主动面技术的概念就是通过

面板背后支撑着的促动器对射电望远镜的主反射面进行补偿, 从而让变形后的主反射面的面型进行恢复的技术.

王从思等人^[1]对大型射电望远镜的主动面补偿技术进行综述性的介绍, 从中可知无论是已经完成建设的或是正在筹建的大型射电望远镜都采用了或将要采用主动面技术. 比如早期的采用主动面技术的大型全可动的射电望远镜的典型代表有Green Bank Telescope (GBT)和Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano (LMT), 近期射电望远镜中采用主动面技术的有意大利2011年完成的Sardinia Radio Telescope (SRT)和中

引用格式: 张惠, 李国平, 张勇. 基于反射面板间角度反馈的主动面补偿技术研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 099507

Zhang H, Li G P, Zhang Y. Research on active surface based on angle feedback between adjacent reflector panels (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 099507, doi: [10.1360/SSPMA2018-00416](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00416)

国上海在2012年完成的天马望远镜. 而正在筹建的QTT也将全面采用主动面技术^[2].

在GBT中, 每个促动器被设置用来支撑相邻四个面板的角点, 起初对反射面板的粗调是通过促动器上的螺母进行的, 后期则采用激光测距系统给促动器提供反馈信号以便完成主动面型的调节, 最终调节后的面型精度优于 $220\text{ }\mu\text{m}$ ^[3,4]. 对于LMT来说促动器的安装方式则不同, LMT的主反射面被分割成180个小的反射面单元, 即反射面先被安装在一个子骨架上, 然后再将这个子骨架单元通过促动器安装在主体骨架上, 每个子骨架单元通过四个单独的促动器进行支撑. LMT所采用的安装方式可以保证主体骨架的变形不会传递到反射面板上, 这样通过促动器调整后可以保证一个高精度的面型($50\text{ }\mu\text{m}$). LMT采用的是全息法在一个特定指向上进行定标, 在运行过程中通过有限元查找表和提前分析温度模型作为反馈信号进行主动面调节^[5,6]. 在SRT中, 除了采用全息法、有限元查找表方法以外, 还采用了温度传感器和光电线性传感器来测量骨架温度敏感区域的温度和主反射面的变形^[7-9].

上海天马望远镜是亚洲最大、全方位可转动的大型射电望远镜. 主反射面由1008块面型精度优于 0.1 mm 的面板组成, 每四个面板相交的角点安装有一个促动器, 共安装了1104台促动器从而实现面板的主动调节补偿^[10]. 上海的天马望远镜也成功地采用了离焦全息测量和相位相干全息测量方法对主反射面进行标定, 运行过程中再通过有限元模型进行补偿的策略. 首先在 53° 这个仰角上通过全息法可以将面型精度由 0.6 mm 提升到 0.3 mm , 在运行过程中通过有限元查找表进行补偿^[11].

针对已有的主动面调整技术中的不足, 即全息法中无法实时地(一次全息测量时间得半小时以上)对任意角度进行测量, 且全息法的成本较高、技术难度大; 而有限元查找表或温度查找表则无法反映骨架的真实变形, 激光测距的精度无法达到要求等. 本文提出了一种新的主动面补偿方法, 即通过测量任意相邻的两个反射面间的夹角, 并以此作为促动的地反馈信号, 从而实现主动面补偿. 本文提出的方法有三个主要的优势: (1) 相比于有限元查找表和温度查找表, 本文方法可以真实地反映反射面板间的相对变化; (2) 相对于全息法本文方法更加简洁, 且响应速度快; (3) 本文方法可以时刻计算整体的面型精度.

2 方法的原理

下文中截取了射电望远镜主反射面中最典型的单元来对促动器和角度传感器安装进行说明, 同时用来对本文方法原理进行说明. 图1中, 面板⑤表示主体反射面的最内一圈, 面板③和④为第二圈, 面板①和②则为第三圈; 促动器和角度传感器都安装在反射面板的背面; 角度传感器横跨在相邻两个面的交线上; 每个反射面板的四个角点都有促动器支撑; 其中四个面相连接的角度用同一个促动器支撑, 即一个促动器同时支撑相邻四个面的角点; 对于三个相邻的面, 则促动器同时支撑三个面, 如面板③、④和⑤; 在此算法中面⑤内侧的两个安装点在整体的主动面补偿中不作调整; 而在周向上, 面板②会相对于面板①进行调整, 面板④相对于面板③进行调整; 在径向上, 第二圈相对于第一圈进行调整, 第三圈相对于第二圈进行调整.

角度传感器用于相邻面板间相对角度变化的测量. 相邻两个反射面之间的角度发生变化的示意图如图2所示, 当相邻的两个面板沿着其交线发生变形时, 即理想情况下面板②的A点由于变形移动到了A'点. 这时角度传感器会检测到此变动的角度量, 并将检测的值传递给促动器. 促动器根据此反馈信号, 把A'拉回到

图1 促动器与角度传感器安装示意图

Figure 1 Diagrammatic sketch of installation of angle sensors and actuators.

图2 面板间角度变化的示意图

Figure 2 Schematic diagram of the changing angle between two panels.

4点, 从而实现面板②回来原来的位置达到主动面补偿的目的.

本文提出的主动面补偿算法, 即上述通过角度传感器作为反馈信号进而通过促动器进行面型调整和修正的方法, 该方法是建立在已经完成射电望远镜主反射面定标的基础之上的. 图3给出本文所提出的主动面补偿方法的流程图, 其中虚线内部的工作并不是每次流程都会进行, 这部分工作会定期地进行一次. 在补偿开始前, 通过人工调整和射电全息定标让主反射面达到一个很高的精度; 只要是望远镜在工作状态, 补偿过程就一直在进行; 定标后把所有的角度传感器设置成零位; 运行过程中当反射面板间的角度发生变化时, 角度传感器检测到此变化量; 我们根据此变化量可以反推出此时的面型精度; 接下来, 比较此时的面型精度与技术要求的精度; 若此时的面型精度优于技术指标, 那么促动器不需要进行工作; 若此时的面型精度差于技术指标, 那么则反推出每个促动器所需要的补偿量, 进而通过促动器完成完面型补偿; 通过这样的闭环过程, 直到主反射面被补偿达到所需要的技术指标为止.

3 数学模型

根据算法原理, 下面来进行数学模型的建立. 实际上, 射电望远镜中相邻的反射面板之间是有间隙的, 此间隙在3 mm以内. 下面简要分析间隙对总体数学模型的影响: 假设反射面板边长为1 m, 任意两个反射面板间都发生 10° 的变化, 那么此时考虑缝隙与不考虑缝隙的总体面型差距才为1.5%, 由于这种任意面板间角度变化都为 10° 在实际中是不可能存在的, 即使存在, 这总体面型变化1.5%也是完全可以接受的, 所以在数学模型推导时没有考虑面板之间的缝隙. 在建立数学模型前, 需要建立如图4所示的坐标系. 由于数学建模中会用到两个安装点之间的直线距离, 所以在建立如图4中的坐标系只显示了相邻安装点之间的直线, 而忽略了扇形反射面的圆弧; 其中 o 点为主反射面抛物线的顶点, z 轴由此顶点指向焦点; y 轴方向为主反射面在垂直于 z 轴且过 o 点的投影平面上的 NA_1 方向; 根据坐标系右手定则确定 x 轴的方向; 对于同一促动器支撑的四个点, 用同一个字母表示, 但是用下标作为区别, 如 E_1 , E_2 , E_3 和 E_4 ; 相邻两个反射面板之间的角度变化量用两

图3 主动面补偿方法流程图

Figure 3 The flow chart of active surface compensation.

图4 数学模型的坐标系

Figure 4 The coordinate system of mathematical model.

个面板的面号作为下标, 如 θ_{35} 则表示面板③和⑤之间的角度, 而 θ_5 则表示面板⑤相对于直线 NM 的变化量.

对于面板⑤来说, 一个角度传感器被安装在 N 和 M 之间, 由于本文算法的前提是 N 和 M 点不作调整, 所以面板⑤只能通过调节 G_5 , H_5 和 L_5 , 让面板⑤绕直线 NM 旋转来补偿面板⑤相对直线 NM 的角度变化量. 此时对应的面板⑤各个点的变化量与角度传感器之间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} \delta_N \\ \delta_M \\ \delta_{G_5} \\ \delta_{H_5} \\ \delta_{L_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 + \frac{l_1}{l_{NM}} \sin \alpha & -\frac{l_1}{l_{NM}} \sin \alpha \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{l_1}{l_{NM}} \sin \alpha & 1 + \frac{l_1}{l_{NM}} \sin \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_N \\ \delta_M \end{bmatrix} + \tan \theta_5 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \cos \alpha \\ l_1 \cos \frac{\alpha}{2} \\ l_1 \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, l_1 代表 N 和 G_5 , M 和 L_5 的长度, l_{NM} 表示点 N 和 M 之间的距离, α 表示面板⑤的圆心角. δ_N 和 δ_M 的变化量为零, 这是本文算法设定的前提, 即所有调节都是相对于此时的 N 和 M 点的. 这直接导致最终我们可以调节出一个很好的面型, 但是却无法得到调节后的主反射面姿态的变化. 而为了能得到此时的主反射面相对于全局坐标系的姿态, 则只需要测量出此时 N 和 M 点相对于绝对坐标系的变化量即可.

对于面板③来说, 此时测量得到的 θ_{35} 是面板③相对于已发生角度变化面板⑤的基础上的测量得到的, 同样的道理, 面板①和面板③之间的夹角也是在面板③变形之后测量得到的. 这样一来, 必然导致了外侧的面板角度的变化矩阵中总会带有前面面板的变化信息. 相应的面板③和面板①的变化量矩阵为

$$\begin{bmatrix} \delta_{D_3} \\ \delta_{E_3} \\ \delta_{G_3} \\ \delta_{H_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{l_2}{l_{G_3H_3}} \sin \frac{\alpha}{2} & -\frac{l_2}{l_{G_3H_3}} \sin \frac{\alpha}{2} \\ -\frac{l_2}{l_{G_3H_3}} \sin \frac{\alpha}{2} & 1 + \frac{l_2}{l_{G_3H_3}} \sin \frac{\alpha}{2} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{G_5} \\ \delta_{H_5} \end{bmatrix} + \tan \theta_{35} \begin{bmatrix} l_2 \cos \frac{\alpha}{2} \\ l_2 \cos \frac{\alpha}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_{A_1} \\ \delta_{B_1} \\ \delta_{D_1} \\ \delta_{E_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{l_3}{l_{D_1E_1}} \sin \frac{\alpha}{2} & -\frac{l_3}{l_{D_1E_1}} \sin \frac{\alpha}{2} \\ -\frac{l_3}{l_{D_1E_1}} \sin \frac{\alpha}{2} & 1 + \frac{l_3}{l_{D_1E_1}} \sin \frac{\alpha}{2} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{D_3} \\ \delta_{E_3} \end{bmatrix} + \tan \theta_{13} \begin{bmatrix} l_3 \cos \frac{\alpha}{2} \\ l_3 \cos \frac{\alpha}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, l_2 代表的面板③和面板④中扇形面板的径向长度, l_3 则代表面板①和面板②扇形面板径向长度而 $l_{G_3H_3}$ 和 $l_{D_1E_1}$ 则代表着相应两点间的距离. 从式(2)和(3)中可以看出, 公式右边第一项即是与前一个面板的相关量, 后一项则是此时的角度传感器的相关量.

而对于面板②和面板④, 与其相连的角度传感器, 既会检测到其相对于径向方向的角度变化, 又会检测到其相对于周向角度的变化. 这些角度信息同样是在已经发生角度变化的基础之上测量得到的. 所以面板②和④的变形矩阵中必然会携带径向和周向前面的面板的变化量信息. 面板②和④的安装角点变形矩阵为

$$\begin{bmatrix} \delta_{B_2} \\ \delta_{C_2} \\ \delta_{E_2} \\ \delta_{F_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{l_3}{l_{E_2F_2}} s \frac{\alpha}{2} & -\frac{l_3}{l_{E_2F_2}} s \frac{\alpha}{2} \\ 1 - \frac{l_{B_2C_2}}{l_{E_2F_2}} s^2 \frac{\alpha}{2} & 1 + \frac{l_{B_2C_2}}{l_{E_2F_2}} s^2 \frac{\alpha}{2} \\ 1 & 0 \\ 1 - s^2 \frac{\alpha}{2} & 1 + s^2 \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{E_4} \\ \delta_{F_4} \end{bmatrix} + t \theta_{24} \cdot \begin{bmatrix} l_3 c \frac{\alpha}{2} \\ 2l_3 c \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} l_{B_2C_2} s \alpha \\ 0 \\ -l_{E_2F_2} c \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} + t \theta_{12} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ l_{B_2C_2} c \frac{\alpha}{2} \\ 0 \\ l_{E_2F_2} c \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_{E_4} \\ \delta_{F_4} \\ \delta_{H_4} \\ \delta_{L_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{l_2}{l_{H_4L_4}} s \frac{\alpha}{2} & -\frac{l_2}{l_{H_4L_4}} s \frac{\alpha}{2} \\ 1 - \frac{l_{E_4F_4}}{l_{H_4L_4}} s^2 \frac{\alpha}{2} & 1 + \frac{l_{E_4F_4}}{l_{H_4L_4}} s^2 \frac{\alpha}{2} \\ 1 & 0 \\ 1 - s^2 \frac{\alpha}{2} & 1 + s^2 \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{H_5} \\ \delta_{L_5} \end{bmatrix} + t \theta_{45} \cdot \begin{bmatrix} l_2 c \frac{\alpha}{2} \\ 2l_2 c \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} l_{E_4F_4} s \alpha \\ 0 \\ -l_{H_4L_4} c \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} + t \theta_{34} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ l_{E_4F_4} c \frac{\alpha}{2} \\ 0 \\ l_{H_4L_4} c \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

在式(4)和(5)中, 为了使公式能在书写在同一行, 对公式内的一些内容作了缩写, 如 $s \frac{\alpha}{2}$ 代表的是 $\sin \frac{\alpha}{2}$, $c \frac{\alpha}{2}$ 代

表的是 $\cos \frac{\alpha}{2}$, $s^2 \frac{\alpha}{2}$ 表示 $\sin^2 \frac{\alpha}{2}$, $t \theta_{12}$ 表示 $\tan \theta_{12}$ 等.

至此, 我们完成了这五个面板模型的变形矩阵的

推导. 由于面板的几何位置不同、运行过程中的外部载荷不同, 所以导致相邻四个面板相交的安装角点 (E_1, E_2, E_3, E_4) 的变形量是不同的, 但是这四个安装角点又同时采用同一促动器进行支撑, 这也必然导致无法通过一个促动器同时完成这相交的四个角点的变形补偿. 在此取这四个角点的平均值作为促动器的补偿量,

$$\delta_E = -\frac{1}{4}(\delta_{E_1} + \delta_{E_2} + \delta_{E_3} + \delta_{E_4}), \quad (6)$$

其中的“-”表示的是促动器的补偿量是与角点变形量相反的.

在前面的原理介绍中已经说明, 所有的调整都是

以 N 和 M 点为基准点, 即此两点在调整过程中不做任何调整, 也就是说在推导的过程中将基准点的变形量定义为 0, 这样对于面⑤中的 G, H, L 处三点的调整就是相同的. 结合式(1)–(6)可得到最终这五个面板的促动器调整量与角度传感器的检测量之间的关系

$$\begin{bmatrix} \delta_A \\ \delta_B \\ \delta_C \\ \delta_D \\ \delta_E \\ \delta_F \\ \delta_G \end{bmatrix} = -T \begin{bmatrix} \tan\theta_{12} \\ \tan\theta_{13} \\ \tan\theta_{24} \\ \tan\theta_{34} \\ \tan\theta_{35} \\ \tan\theta_{45} \\ \tan\theta_5 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$T = \begin{bmatrix} 0 & l_2 \frac{\alpha}{2} & 0 & 0 & l_2 c \frac{\alpha}{2} & 0 & l_1 c \alpha \\ 0 & \frac{1}{2} l_3 c \frac{\alpha}{2} & 0 & \frac{1}{2} l_3 c \frac{\alpha}{2} & \frac{1}{2} l_2 c \frac{\alpha}{2} & \frac{1}{2} l_2 c \frac{\alpha}{2} & l_1 c \alpha \\ \frac{1}{2} l_{B_2 C_2} \frac{\alpha}{2} & 0 & \frac{1}{2} l_3 c \alpha - \frac{1}{4} l_{B_2 C_2} s \alpha & \frac{1}{2} l_3 c \frac{\alpha}{2} & 0 & l_2 c \frac{\alpha}{2} & l_1 c \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l_2 c \alpha & 0 & l_1 c \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} l_2 c \frac{\alpha}{2} & \frac{1}{2} l_2 c \frac{\alpha}{2} & l_1 c \alpha \\ \frac{1}{2} l_{E_2 F_2} \frac{\alpha}{2} & 0 & \frac{1}{4} l_{E_2 F_2} c \frac{\alpha}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} l_2 c \frac{\alpha}{2} & l_1 c \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_1 c \alpha \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式(7)和(8)给出了促动器调整量与角度传感器检测角度之间的关系, 从中可以看出调整矩阵是一个 7×7 的满秩矩阵, 对应于角度传感器的所检测的角度值, 促动器有唯一组解. 即文中建立的数学模型是合理的, 所提出的主动面补偿算法也是可行的.

4 仿真模拟

上文中介绍了我们所提出的主动面补偿原理, 并完成了数学模型的推导. 由于本文所提出的补偿方法与以往的补偿方法的区别就是引入了角度传感器, 并以角度传感器对相邻面板间的角度检测量作为促动器的反馈信号. 所以接下来的仿真模拟就是验证引入角度传感器之后, 需要这个角度传感器的精度为多少才可以保证最终射电望远镜主反射面的面型达到技术指标中的精度.

我们以 QTT 为例进行仿真说明. 根据文献[12]的

研究, QTT 的最内圈被均分成 32 份, 根据此研究的模型, 我们完成 QTT 模型的建立(图5).

根据主反射面精度要求, 即不开启主动面时面型精度优于 $600 \mu\text{m}$; 开启主动面时面型精度优于 $300 \mu\text{m}$; 在长期的运行校准后面型精度可达到 $200 \mu\text{m}$ ^[2,12]. 而本文的补偿方法是建立在全息定标的基准上, 即在定标后的运行过程中, 采用文本方法进行主动面补偿, 此时总的面型精度应该包括三个部分: 定标时的总体面精度、促动器的精度和角度传感器的精度. 那么总体面型精度用数学表示为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_a^2 + \sigma_s^2}, \quad (9)$$

其中 σ_h 表示全息定标后的面型精度, σ_a 表示促动器的对面型精度的影响, σ_s 表示角度传感器对面型的影响. 其中促动的精度为 $5 \mu\text{m}$ 是已知的, 其沿着反射面的法线方向, 可以认为促动器对总体面型精度的影响也是 $5 \mu\text{m}$. 下面就以长期校准的面型精度为 $200 \mu\text{m}$ 、促动

图 5 QTT 1/32模型

Figure 5 The 1/32th model of QTT.

器所带来的面型误差为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 为例来分析和探讨全息定标精度、角度传感器精度和最终的总体面型精度的关系。

图6中, 点线表示的是传感器所造成的面型误差和定标后的面型精度的关系; 点线与坐标轴围绕起来的部分是可以保证总体的面型误差和在 $200\text{ }\mu\text{m}$ 以内; 点划线表示的是由于传感器的误差所带来的面型误差; 这两个曲线相交于传感器精度为 $0.6''$, 传感器面型误差为 $88\text{ }\mu\text{m}$, 定标面型误差为 $180\text{ }\mu\text{m}$; QTT要求在长期校准后面型精度优于 $200\text{ }\mu\text{m}$, 所以定标的误差应该是小于 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的; 在此我们取角度传感器的精度为 $0.5''$, 只要定标的精度优于 $190\text{ }\mu\text{m}$, 则可以保证最终的精度小于 $200\text{ }\mu\text{m}$; 如果定标的精度已经达到了 $200\text{ }\mu\text{m}$, 则此时的总体面型精度将会达到 $210\text{ }\mu\text{m}$, 即此时角度传感器对总体面型精度的贡献仅为技术指标的5%, 因此把角度传感器的精度设定成 $0.5''$ 是合理的。

根据图6的分析, 得到当传感器的精度均方差优于 $0.5''$ 时, 可以保证最终的总体面型精度达到面型 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的技术指标. 通过李国平等人^[13]提出的传感器装置以及Zhang等人^[14]提出的检测算法, 可以得知把角度传感器的精度做到 $0.1''$ 已是一种成熟的技术. 因此, 我们提出把角度传感器的精度设定为 $0.5''$ 是满足QTT的面型指标的, 同时也是完全可以实现的。

角度传感器设定的技术指标为 $0.5''$, 而实际工程可以达到的精度为 $0.1''$, 那么对于QTT的总体面型来说就有了5倍的安全系数. 由于本方案的调整过程是相对的, 即都是后一个面板相对于前一个面板. 那么就会存在一个极限的条件即所有角度传感器的误差都是向同方向偏差, 我们需要确定出在这种极限条件下角度传感器带来的面型误差和定标的误差的总和是否仍可以满足最终的面型精度指标。

接下来, 我们仿真了角度传感器精度为 $0.1''$, 面板偏差方向为同一方向, 且面型定标的精度为最差, 即刚满足长期校准的面型精度要求 $200\text{ }\mu\text{m}$, 考察此时的总体面型精度跟技术指标的差距. 从图7(a)可以看出, 面

图 6 (网络版彩图)传感器精度与定标精度的关系

Figure 6 (Color online) Relationship between sensor accuracy and holographic calibration accuracy.

图 7 (网络版彩图)(a) 极限条件下角度传感器造成的面型误差; (b) 精度为 $0.1''$ 的角度传感器和精度为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的全息定标时的总体面型误差分布Figure 7 (Color online) (a) The surface error caused by angle sensors under extreme condition; (b) the overall surface error distribution under the angle sensors accuracy of $0.1''$ and holographic calibration accuracy of $200\text{ }\mu\text{m}$.

型的偏差沿着径向和周向逐渐增大, 最终由于角度传感器所造成的面型极限偏差的精度约为 $67\text{ }\mu\text{m}$; 结合

此时的面型定标精度 $200\ \mu\text{m}$, 那么此时的总体面型精度为仅为 $210\ \mu\text{m}$. 根据技术传感器的需要将其定标为 $0.5''$, 而实际其精度可达到 $0.1''$, 这样5倍的安全系数可以有效地避免实际使用过程中的不确定因素.

最后, 我们评估下文中所提取的补偿方法的收敛性, 及对于已经通过角度传感器检测到了面板间的角度变化, 通过促动器进行补偿多少次后才可以保证面型精度稳定下来. 此时我们设定的参数还是定标后的面型精度为 $200\ \mu\text{m}$, 角度传感器的精度为 $0.5''$. 这时施加扰动, 使扰动后的面型误差为 $600\ \mu\text{m}$, 然后通过本文方法进行补偿.

根据所提取的方法, 对总体面型进行补偿. 从式(6)和(8)可知, 采用本文的方法, 肯定是可以找到唯一的一组解, 但是鉴于采用的促动器支撑模型是“一顶四”, 即一个促器同时支撑相邻四个面的角点, 即促动器的调整一次无法完成此四个角点的调整, 所以必然是需要通过多次的调整才可以达到想要的面型. 从图8中可以看出, 前三次的调整会使面型迅速改善, 可以使总体的面型精度基本下降到 $300\ \mu\text{m}$; 接下来调整的过程面型的改善会变得缓慢; 通过大概14次的调整后, 总体的面型会稳定下来; 最终的总体面型稳定在 $213\ \mu\text{m}$.

可以看出, 最终面型稳定在 $213\ \mu\text{m}$, 这与我们所希望的 $200\ \mu\text{m}$ 还有差不多6.5%的差距. 造成这种差距的原因是角度传感器误差的客观存在和采用的促动器是“一顶四”的结构, 使得同一促动器支撑的四个点很难同时调整到合适的位置. 而实际上根据QTT的技术指标要求, 在长期校准后面型精度优于 $200\ \mu\text{m}$, 通过计算发现当定标的精度为 $190\ \mu\text{m}$ 时, 可以保证最终主动面调整后的总体面型精度收敛于 $200\ \mu\text{m}$ 以内.

5 总结

本文从已有的大型射电望远镜主动面补偿技术出发, 提出了一种以反射面板间角度信号作为促动器的反馈信号的主动面补偿技术. 该技术建立在已完成全息定标的面型基础之上, 在射电望远镜运行过程中,

图 8 (网络版彩图)总体面型与调整次数的关系

Figure 8 (Color online) The relationship between overall surface accuracy and the number of adjustments.

修正反射面板间的相对角度变化量, 从而对射电望远镜的面型进行维持.

文中首先对所提出的方法进行了原理说明和建模, 接着以QTT作为对象来对此方法进行仿真. 由于本文所提的主动面补偿方法中引用了角度传感器, 所以在仿真部分先对传感器的精度进行了推导. 通过仿真可知, 在已有的射电望远镜全息定标技术之上, 当角度传感器的精度为 $0.5''$ 时, 可以保证QTT最终采用主动面时的面型精度为 $200\ \mu\text{m}$, 且有足够的安全系数. 在确定了所用传感器的精度后, 进而分析此种主动面补偿方法的收敛性. 通过分析可知, 采用文中提出的方法来进行面型修正时, 通过大约14次的调整就可以让面型完全稳定下来. 当然要使最终稳定下来的面型达到 $200\ \mu\text{m}$ 的要求, 就要求总体面型在长期校准后优于 $190\ \mu\text{m}$. 即使长期校准的面型刚达到 $200\ \mu\text{m}$, 通过我们的补偿后, 可以把面型一直维持在 $210\ \mu\text{m}$, 我们认为这样的误差在工程中是可以接受的. 因此文中提出的主动面补偿算法是完全合理可行的.

本文所提出的大型射电望远镜主动面补偿的方法, 是对已有的主动面补偿方法的一种拓展和补充. 该方法的合理性和可行性都通过了仿真进行验证. 在正在筹建的或者是未来的大型射电望远镜中建设中, 文中提出的主动面补偿方法都将作为一个有力的参考.

参考文献

- 1 Wang C S, Xiao L, Xiang B B, et al. Development of active surface technology of large radio telescope antennas (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech*

- [Astron](#), 2017, 47: 059503 [王从思, 肖岚, 项斌斌, 等. 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: 059504]
- 2 Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2014, 44: 783–794 [王娜. 新疆奇台110米射电望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 783–794]
- 3 Lacasse R J. The green bank telescope active surface system. In: Proceedings of SPIE, the international Society for Optical Engineering. 1998, 3351: 310–319
- 4 Nikolic B, Prestage R M, Balser D S, et al. Out-of-focus holography at the Green Bank Telescope. [Astron Astrophys](#), 2007, 465: 685–693
- 5 Kamal S, Gary W, Ron G, et al. The architecture of the active surface control system of the Large Millimeter Telescope. In: Proceedings of SPIE, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation. Montreal, 2014. 9151
- 6 Schloerb F P, Erickson N, Souccar K, et al. Calibration and operation of the active surface of the Large Millimeter Telescope. In: Proceedings of SPIE, Astronomical Telescope and Instrumentation. Montréal, 2016. 9906
- 7 Prandoni I, Murgia M, Tarchi A, et al. The sardinia radio telescope. [Astron Astrophys](#), 2017, 608: A40, arXiv: [1703.09673](#)
- 8 Bolli P, Orlati A, Stringhetti A, et al. Sardinia Radio Telescope: General description, technical commissioning and first light. *J Astron Telesc Inst*, 2015, 4: 1550008
- 9 Serra G, Bolli P, Busonera G, et al. The microwave holography system for the Sardinia Radio Telescope. In: Proceedings of SPIE, Groud-based and Airbone Telescope IV. Amsterdam, 2012. 8444
- 10 Shen Z Q. Shanghai 65 m radio telescope (in Chinese). *Science (Shanghai)*, 2013, 65: 15–20 [沈志强. 上海65米射电望远镜. 科学(上海), 2013, 65: 15–20]
- 11 Wang J Q, Zuo X T, Michael K, et al. TM65 m radio telescope microwave holography (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2017, 47: 099502 [王锦清, 左秀婷, Michael K, 等. TM 65 m射电望远镜面形微波全息测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 099502]
- 12 Wang B. On Surface Segmentation of the Active Main Reflector of Full Steerable High Precision Antenna QTT 110 m (in Chinese). Dissertation for the Master's Degree. Xi'an: Xidian Unversity, 2016. 3 [王博. QTT 110 m全可动高精度反射面天线主动主反射面面板分块问题研究. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2016. 3]
- 13 Zhang H, Li G P, Zhang Y, et al. Photoelectric Dynamic Angle Measuring Device and Method for Reducing Random Error (in Chinese). Chinese Patent, 201810101416.0 [李国平, 张惠, 张勇, 等. 可降低随机误差的光电动态角度测量装置及其方法, 中国发明专利, 201810101416.0]
- 14 Zhang H, Li G P, Zhang Y, et al. Extracting the centroid of the light spot by two-dimensional sigmoid fitting. [Opt Eng](#), 2018, 57: 1

Research on active surface based on angle feedback between adjacent reflector panels

ZHANG Hui^{1,2,3}, LI GuoPing^{1,2*} & ZHANG Yong^{1,2}

¹ National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;

² Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

In view of the demand for active surface compensation technology for the large radio telescopes, we proposed a new active surface compensation algorithm based on the radio telescope that has been calibrated. In this algorithm, the angle sensors are disposed between any two adjacent panels back of the primary reflector; the angle sensors are set to zero after calibration; the angle sensors detect the angle between adjacent panels during the radio telescope operation; the actuators adjust the panels and compensate the surface according to the feedback signals by angle sensors. In this paper, the principle of this method is introduced firstly, and then the mathematical model is established. Finally, the Xinjiang Qitai 110 m Radio Telescope (QTT) is taken as an example to illustrate the effect of the angle sensor actuator error on the total surface accuracy. The main advantage of this algorithm is: the simple system, the fast response, estimate the surface accuracy and compensated the surface at any time and at any elevation.

active surface, surface compensation, surface accuracy, radio telescope, QTT

PACS: 84.40.Ba, 95.45.+i, 95.55.Jz, 95.90.+v

doi: [10.1360/SSPMA2018-00416](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00416)