

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212008

主动反射面面形实时计算与检测方法研究*

张庆海 刘圣乾 于春雨 赵正旭
(青岛理工大学机械与汽车工程学院 青岛 266520)

摘要:主动反射面技术在射电望远镜发展中具有重要意义,为提高主动反射面技术中面形检测的实时性,减小环境因素造成的检测误差,建设了主动反射面面形监测研究平台,提出一种利用测距传感器的主动反射面面形计算与检测方法。首先确定主动反射面基准面,其次将面板运动看作旋转运动,利用罗德里格旋转公式得到面板的旋转矩阵,最后利用面板的旋转矩阵计算面板当前位姿。仿真结果显示,该方法具有可行性,计算1 625个节点下的面板位姿耗时为5 070 ms,能够提高面形检测的实时性,为提高主动反射面运行精度提供参考,使采用主动反射面技术的射电望远镜达到更好的性能指标。

关键词:大口径射电望远镜;主动反射面;面形检测;测距传感器;实时性

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**510.1010

Research on detection method of active reflector surface

Zhang Qinghai Liu Shengqian Yu Chunyu Zhao Zhengxu

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: Active reflector technology plays an important role in the development of radio telescopes. In order to improve the real-time surface detection in active reflector technology and reduce the detection errors caused by environmental factors, an active reflector surface monitoring research platform is established. A calculation and detection method of active reflector surface using distance measuring sensor is proposed. First, the active reflector datum surface is determined, and secondly, the panel motion is regarded as rotating motion. Rodrigo rotation formula is used to get the rotation matrix of the panel. Finally, the current position and attitude of the panel are calculated by using the rotation matrix of the panel. The simulation results show that the method is feasible, and the time-consuming calculation of panel position and attitude at 1 625 nodes is 5 070 ms, which can improve the real-time performance of surface detection, provide reference for improving the operation accuracy of active reflector and achieve better performance index of radio telescope using active reflector technology.

Keywords: large-bore radio telescope; active reflector; face shape detection; distance measuring sensor; real-time

0 引 言

为保证大口径射电望远镜的精度、覆盖更广的观测范围和波段,越来越多的大口径射电望远镜采用主动反射面技术进行补偿或主动变形^[1],如贵州500 m口径球面射电望远镜(five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST)^[2]、美国的绿岸射电望远镜(green bank telescope, GBT)^[3-4]、美国和墨西哥合作的LMT大型毫米波望远镜(large millimeter telescope, LMT)^[5]、我国上海的65 m天马射电望远镜^[6-9]以及110 m口径全可动射电

望远镜(qitai radio telescope, QTT)^[1]均采用主动反射面技术,而面形检测是主动反射面技术中的重要步骤^[10],但现有的面形检测技术难以满足天线的实时性要求^[11],国内外常用的光学面形检测方法主要有经纬仪法、全站仪法和激光跟踪仪法^[12],但光学检测方法需要大量的辅助设备、检测时间长且无法覆盖天线任意姿态下的面形检测^[11],主要适用于天线投入使用前的面板形状检测和标定。微波全息法在20世纪80年代被应用到天线表面误差测量领域^[13],并衍生出了远场全息测量方法和近场全息测量方法,远场全息测量方法受到人造卫星分布的限制,近场全息测量方

收稿日期:2022-11-09

* 基金项目:装备预先研究领域基金项目(JZX7Y20210144400801)、青岛理工大学高端平台建设112计划“数字孪生大科学中心”项目(10606029)资助

法需设置信号塔和参考天线,并且检测一次需要的时间较长^[14-15]。目前存在的面形检测方法共性是繁琐、检测时间长、无法做到将当前面形信息实时快速地反馈给测控系统,使得环境因素无法被实时反映从而造成检测误差。

1 主动反射面面形检测研究平台

为了解决目前反射面面形检测方法的耗费时间长、步骤繁多、无法做到实时检测的问题,建设如图 1 所示 5 m 口径主动反射面面形检测研究平台,提出一种利用测距传感器得到的数据快速计算反射面面形的方法,将面板运动视为旋转运动,通过旋转矩阵计算面板当前位姿,最终实现了主动反射面的面形快速计算,为提高射电望远镜电性能提供参考。

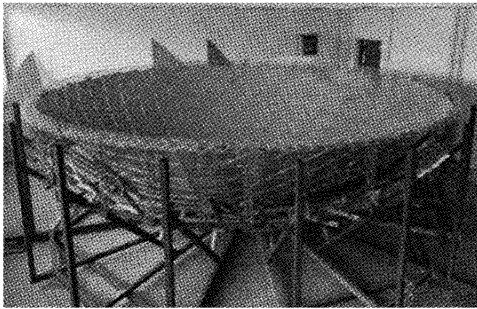


图 1 5 m 口径主动反射面面形检测研究平台

1.1 平台结构

主动反射面面形检测研究平台结构参数如图 2 所示,初始状态为半径 3 m、口径 5 m 的球冠面,球冠张角为 113°。为实现主动反射面面形检测研究平台的主动变形功能,反射面的支撑结构参考 FAST^[1],采用基于柔性基底的预应力整体索网结构,由圈梁、索网、螺杆、三角形反射单元面板和促动器组成。圈梁作为整个反射面的支撑结构^[16],节点处的促动器安装在半径 3.3 m 的支撑面上,促动器由电机、减速器、联轴器和螺杆机构组成,电机动力由减速器

传输至联轴器,联轴器连接减速器和螺杆机构,螺杆机构驱动节点沿球面径向运动。促动器安装在每个节点的下方,驱动节点沿初始球冠面的径向运动,使面板旋转运动。测距传感器安装在促动器支撑面上,测量促动器底端到节点的距离。

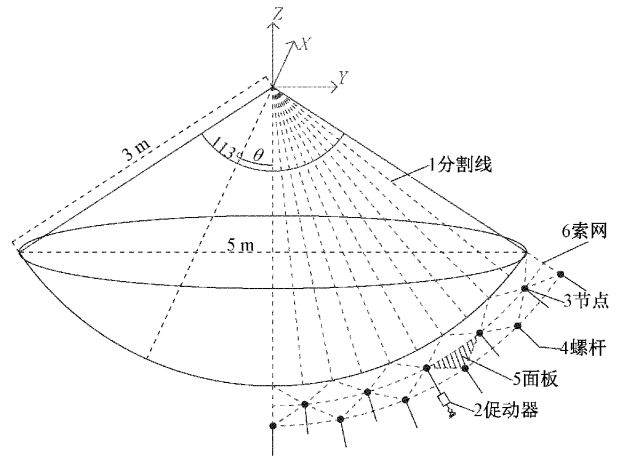


图 2 主动反射面面形检测研究平台结构参数

1.2 节点编号

主动反射面面形检测研究平台的索网安装在环形圈梁上,索网上设有三角形反射面单元面板。其俯视图如图 3(a)所示,495 个三角形面板有 226 个节点。根据面板特点及分割情况,将主动反射面均分为 5 个分区^[17]。因 5 个分区特征相同,以 D 区为例,对 D 区 65 个节点编号,如图 3(b)所示,首先假设节点的编号形式为 (a, b) ,其中, $a \in [1, 10], a \in \mathbb{Z}, b \in a + 1, b \in \mathbb{Z}, a$ 代表环数,编号原则为最靠近球心的的两个点环数均为 1,从球心向外依次增加到 10; b 的编号原则为从右向左依次从 1 正整数递增编号,如第 3 环从右向左数第 4 个节点编号为 $(3, 4)$ 。

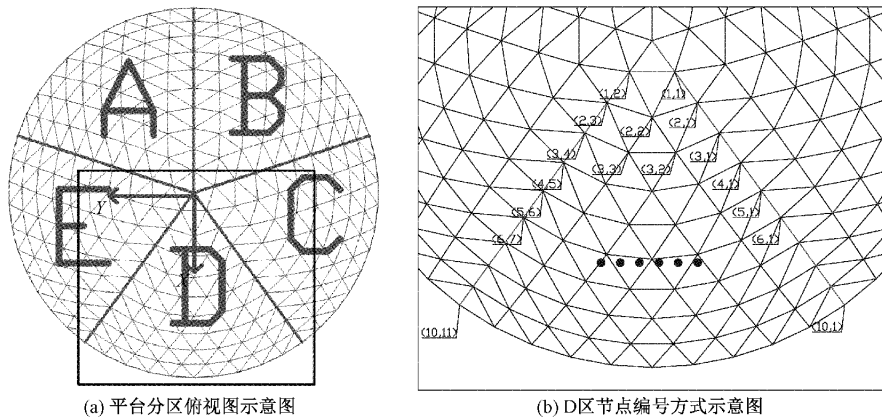


图 3 分区俯视图及 D 区节点编号方式示意图

2 面形计算方法

主动反射面的初始面为半径 3 m、口径 5 m 的球冠面,将此球冠面设置为基准面,反射面变形时可面板运动看为旋转运动^[11],利用旋转矩阵通过测距传感器测得数据求当前面形。

2.1 标定基准面

如图 2、3 所示,以球冠面的球心为坐标原点, X 轴正向沿 D 区对称线指向球外,将正上方作为 Z 轴正向,俯视图中 X 轴正向逆时针旋转 90° 为 Y 轴正向,建立空间三维坐标系,则基准球冠面满足:

$$\begin{cases} \theta_{ab} = \frac{\arcsin(\frac{\phi}{R})a}{H} \\ \varphi_{ab} = \frac{2\pi(b-1)}{5a} \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ_{ab} 为球冠面上节点 (a, b) 与原点连线 OM 与 Z 轴正向的夹角, φ_{ab} 为 OM 在 XOY 平面上的投影与 X 轴正向的夹角, ϕ 为反射面口径, R 为反射面初始球面的直径, H 为分割环数。

根据主动反射面的面板排列,将面板分为若干环形区域,如图 4(a)所示,每个环内面板排列方式规律相同,节点都在分割线环上,而每个分割线环都是球面上的圆,设从内向外分割线环的编号为 1~10,环的半径为 R_a ,为方便计算,将分割线环降为二维,如图 4(b)所示,细直线为分割线环与球心的连线。

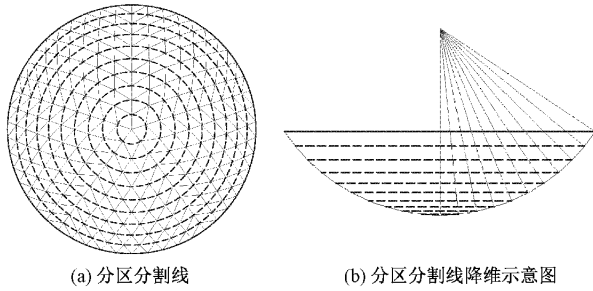


图 4 分割线环及降维示意图

则分割线环的半径:

$$R_a = \sqrt{x_a^2 + y_a^2} \quad (2)$$

式中: x_a, y_a 为节点 (a, b) 降维后在二维空间的坐标。

初始球冠面状态下, D 区每个节点的三维空间坐标:

$$(x_{ab}, y_{ab}, z_{ab}) = (\sin\theta_{ab}\cos\varphi_{ab}, \sin\theta_{ab}\sin\varphi_{ab}, \cos\theta_{ab})R_a \quad (3)$$

式中: φ_{ab} 为编号为 (a, b) 的节点在极坐标中的 φ 值。

根据式(3)可求出 D 区 65 个节点的三维坐标,得到初始球冠面下 D 区节点的位置。基准面的节点坐标全部求出。

2.2 测距传感器测量原理

本文使用激光测距传感器进行数据采集,相对于超声

波测距传感器精度更高、盲区更小、结构更加简单、传感器尺寸更小^[18],而测距传感器的安装位置决定传感器数据的属性,如图 5 所示,测距传感器安装在支撑面上,测量节点连接片到测距传感器的距离。则节点相对于基准面节点的距离,即传感器的有效值为:

$$d_{ab} = L_{ab} - l_{ab} + s$$

其中, L_{ab} 为测距传感器测得数值, l_{ab} 为基准面节点与支撑面的距离, s 为传感器厚度。

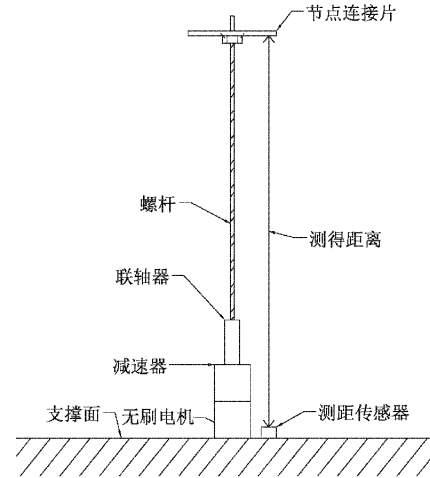


图 5 测距传感器测量原理

2.3 面板旋转矩阵

在三维坐标系中,有罗德里格旋转公式:

$$\mathbf{v}_{rot} = \cos\theta\mathbf{v} + (1 - \cos\theta)(\mathbf{v} \times \mathbf{k})\mathbf{k}_0 + \sin\theta\mathbf{k} \times \mathbf{v} \quad (4)$$

式中: \mathbf{v} 是一个三维空间向量, \mathbf{K}_0 是旋转轴的单位向量, θ 为 \mathbf{v} 在右手螺旋定则意义下绕旋转轴 \mathbf{K}_0 的旋转角度。罗德里格向量旋转公式通常被写为旋转矩阵,将式中向量写为行向量,则可化为矩阵形式,表示为:

$$\mathbf{v}_{rot} = \mathbf{v}\mathbf{R} \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{0y}^2(1 - \cos\theta) - \cos\theta & \mathbf{K}_{0x}\mathbf{K}_{0y}(1 - \cos\theta) + \mathbf{K}_{0z}\sin\theta & \mathbf{K}_{0x}\mathbf{K}_{0z}(1 - \cos\theta) - \mathbf{K}_{0y}\sin\theta \\ \mathbf{K}_{0x}\mathbf{K}_{0y}(1 - \cos\theta) - \mathbf{K}_{0z}\sin\theta & \mathbf{K}_{0y}^2(1 - \cos\theta) - \cos\theta & \mathbf{K}_{0y}\mathbf{K}_{0z}(1 - \cos\theta) + \mathbf{K}_{0x}\sin\theta \\ \mathbf{K}_{0x}\mathbf{K}_{0z}(1 - \cos\theta) + \mathbf{K}_{0y}\sin\theta & \mathbf{K}_{0y}\mathbf{K}_{0z}(1 - \cos\theta) - \mathbf{K}_{0x}\sin\theta & \mathbf{K}_{0z}^2(1 - \cos\theta) - \cos\theta \end{pmatrix}$$

如图 6 所示,设在笛卡尔三维坐标系中,基准面上任意面板上的任意一点的坐标为 $M(x, y, z)$,旋转轴上一点坐标为 $O(a, b, c)$,旋转轴的单位向量为 \mathbf{K}_0 ,旋转角度为 θ ,旋转后的坐标为 $M'(x', y', z')$,则根据罗德里格旋转公式可得 $\overrightarrow{OM'} = \overrightarrow{OM}\mathbf{R}$ 。令 O 为 $(a, b, c, 1)$, M 为 $(x, y, z, 1)$, M' 为 $(x', y', z', 1)$,则 $\overrightarrow{OM'} = \overrightarrow{OM}\mathbf{R}$ 可转化为:

$$(x', y', z', 1) = (x, y, z, 1)\mathbf{TR}'\mathbf{T}^{-1} \quad (6)$$

$$\text{式中: } \mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{R}' = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{pmatrix}, \text{令 } \mathbf{H} = \mathbf{TR}'\mathbf{T}^{-1},$$

则 M 和 M' 的关系可表示为:

$$(x', y', z', 1) = (x, y, z, 1)\mathbf{H} \quad (7)$$

式中: \mathbf{H} 称为面板的旋转矩阵。

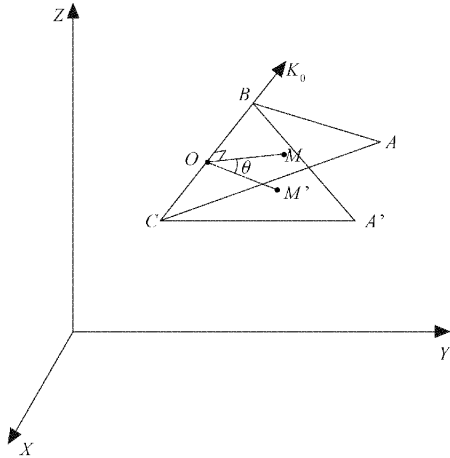


图 6 面板旋转示意图

2.4 计算节点坐标

假设节点位移仅有径向位移,不存在纬向位移,测距传感器测得的数值为参考坐标与实际节点坐标之间的距离,基于此原理有实际节点坐标为:

$$(x'_{ab}, y'_{ab}, z'_{ab}) = (x_{ab}, y_{ab}, z_{ab}) + (\sin\theta_{ab}\cos\varphi_{ab}, \sin\theta_{ab}\sin\varphi_{ab}, \cos\theta_{ab})d_{ab} \quad (8)$$

而实际情况是当促动器驱动节点运动时,节点既产生径向位移,又产生纬向位移,将节点运动看作绕轴旋转,旋转矩阵的应用关键在于旋转轴的确定,当单个节点运动时,旋转轴为此节点的对边,假设 $B(2,2)$ 和 $C(2,1)$ 节点静止, $A(1,1)$ 节点运动时可看作是面板将 BC 边作为旋转轴绕着面板 BC 边旋转,那么可以得到 BC 边的方向向量 \mathbf{K}_{11} , 设测距传感器读取的数值为 d_{ab} , 即旋转位移为 d_{ab} , 根据弦长公式,旋转角度为:

$$\theta_{11} = \arcsin \frac{d_{ab}}{2l}$$

其中, l 为节点到旋转轴的距离,则有:

$$(x'_{11}, y'_{11}, z'_{11}, 1) = (x_{11}, y_{11}, z_{11}, 1)\mathbf{H}_{11} \quad (9)$$

当两个节点运动时,如图 7 所示,假设节点 $A(1,1)$ 和 $C(2,1)$ 运动, $B(1,2)$ 不动,传感器有效值为 d_{11} 和 d_{21} , 设 AC 和 $A'C'$ 的交点为 $O_2(x_2, y_2, z_2)$, 则 BO_2 为旋转轴,几何关系满足:

$$\frac{AA'}{CC'} = \frac{AO_2}{AC + AO_2} \quad (10)$$

同时 A, C, O_2 在同一条直线上,可求得 $O_2(x_2, y_2, z_2)$ 具体坐标,旋转轴的单位向量和任意一点坐标均可求出。

当 3 个节点同时运动时,如图 8 所示,设 AB 和 $A'B'$ 的交点为 $O_3(x_3, y_3, z_3)$, A 点的旋转轴为 O_2O_3 , 同理可求出 B, C 的旋转轴,至此旋转轴上一点和旋转轴方向向量均可确定,代入面板旋转矩阵得到实际节点坐标。

求得当前每个节点的坐标,通过实际的理论曲面与实

际曲面的对比得出修正值,节点 (a, b) 的修正值为:

$$E_{ab} = \sqrt{(x_{ab}^{*2} + y_{ab}^{*2} + z_{ab}^{*2})} - \sqrt{(x_{ab}'^2 + y_{ab}'^2 + z_{ab}'^2)} - d_{ab} \quad (11)$$

式中: $(x_{ab}^*, y_{ab}^*, z_{ab}^*)$ 为理论节点坐标。

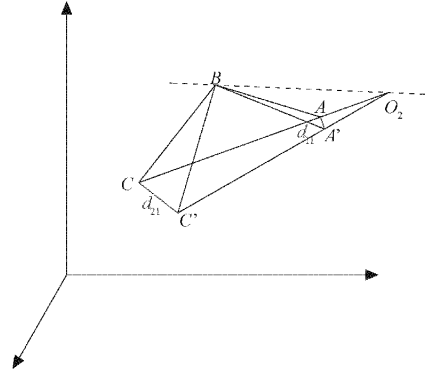


图 7 2 节点位移时旋转轴的确定

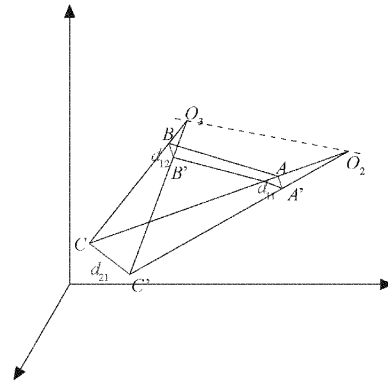


图 8 3 节点位移时旋转轴的确定

修正值是实际节点与理论节点的误差值,可通过促动器运动补偿,以期达到更高的精度。

3 结果分析

主动反射面形检测研究平台反射面口径 $\phi = 5 \text{ m}$, 初始球冠面直径 $R = 3 \text{ m}$ 。如图 3 所示, D 区面板数量为 99, 共有 65 个节点。D 区部分节点的传感器数据如表 1 所示, 基准面对应节点坐标如表 2 所示, 同时也是传感器所在点的理论坐标。计算流程如图 9 所示, 通过 xlrld 模块将已知数据导入^[17], 得到实际 D 区对应部分节点坐标如表 3 所示。面板是刚性的, 因此 3 个节点坐标即可确定一个面板的空间位置姿态。

计算 D 区 65 个节点耗费 16 ms, 为进一步验证此计算方法实时性, 根据 FAST 反射面特征增加节点数量, 逐步增加节点数量至 1 625 个, 并记录计算时间, 如图 10 所示。

面板节点数量增加时, 计算时间随之增加, 当节点数量在 600 以内时, 计算时间可控制在 645 ms 以内, 实时性较强, 而当节点数量大于 1 050 时, 计算时间超过 2 500 ms, 实际情况下, 考虑传感器数据采集时间, 检测时间会进一步增长, 但对于大口径射电望远镜来说, 仍具有一定的实时

性。节点数量达到1 625时,计算时间在5 070 ms,且节点数量在1 050以上时曲线的平均斜率是600个节点以下时的4.9倍,说明节点数量越多时,计算时间增长的越快,针对节点数量较多的大口径射电望远镜时,应考虑通过增强设备计算性能来控制面形计算时间。

表1 部分节点传感器数据

| 节点编号 | L_{ab}/cm | d_{ab}/cm |
|-------|--------------------|--------------------|
| (5,1) | 29.45 | -0.05 |
| (5,2) | 29.44 | -0.06 |
| (5,3) | 29.45 | -0.05 |
| (5,4) | 29.46 | -0.04 |
| (5,5) | 29.46 | -0.04 |
| (5,6) | 29.46 | -0.04 |
| (4,1) | 29.38 | -0.12 |
| (4,2) | 29.39 | -0.11 |
| (4,3) | 29.38 | -0.12 |
| (4,4) | 29.40 | -0.10 |
| (4,5) | 29.40 | -0.10 |
| (3,1) | 29.31 | -0.19 |
| (3,2) | 29.32 | -0.18 |
| (3,3) | 29.32 | -0.18 |
| (3,4) | 29.33 | -0.17 |
| (2,1) | 29.25 | -0.25 |
| (2,2) | 29.26 | -0.24 |
| (2,3) | 29.23 | -0.27 |
| (1,1) | 29.20 | -0.30 |
| (1,2) | 29.22 | -0.28 |

表2 部分基准面节点坐标

| 节点编号 | X_{ab}/m | Y_{ab}/m | Z_{ab}/m |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|
| (5,1) | 0.833 9 | 1.147 7 | -2.643 4 |
| (5,2) | 0.522 2 | 1.319 0 | -2.643 4 |
| (5,3) | 0.177 8 | 1.407 5 | -2.643 4 |
| (5,4) | -0.177 8 | 1.407 5 | -2.643 4 |
| (5,5) | -0.522 2 | 1.319 0 | -2.643 4 |
| (5,6) | -0.833 9 | 1.147 7 | -2.643 4 |
| (4,1) | 0.677 0 | 0.931 8 | -2.770 1 |
| (4,2) | 0.355 9 | 1.095 4 | -2.770 1 |
| (4,3) | 0.000 0 | 1.151 8 | -2.770 1 |
| (4,4) | -0.355 9 | 1.095 4 | -2.770 1 |
| (4,5) | -0.677 0 | 0.931 8 | -2.770 1 |
| (3,1) | 0.513 6 | 0.706 9 | -2.869 9 |
| (3,2) | 0.181 7 | 0.854 7 | -2.869 9 |
| (3,3) | -0.181 7 | 0.854 7 | -2.869 9 |
| (3,4) | -0.513 6 | 0.706 9 | -2.869 9 |
| (2,1) | 0.345 2 | 0.475 1 | -2.942 0 |
| (2,2) | 0.000 0 | 0.587 2 | -2.942 0 |
| (2,3) | -0.345 2 | 0.475 1 | -2.942 0 |
| (1,1) | 0.173 4 | 0.238 7 | -2.985 5 |
| (1,2) | -0.173 4 | 0.238 7 | -2.985 5 |

表3 部分节点面形计算结果

| 节点编号 | X_{ab}/m | Y_{ab}/m | Z_{ab}/m |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|
| (5,1) | 0.834 2 | 1.148 1 | -2.643 7 |
| (5,2) | 0.522 4 | 1.319 3 | -2.643 7 |
| (5,3) | 0.177 9 | 1.407 8 | -2.643 7 |
| (5,4) | -0.177 9 | 1.407 7 | -2.643 6 |
| (5,5) | -0.522 4 | 1.319 2 | -2.643 6 |
| (5,6) | -0.834 1 | 1.147 9 | -2.643 6 |
| (4,1) | 0.677 5 | 0.932 2 | -2.770 7 |
| (4,2) | 0.356 2 | 1.096 0 | -2.770 7 |
| (4,3) | 0.000 0 | 1.152 3 | -2.770 7 |
| (4,4) | -0.356 2 | 1.095 9 | -2.770 6 |
| (4,5) | -0.677 4 | 0.932 4 | -2.770 6 |
| (3,1) | 0.514 0 | 0.707 9 | -2.870 6 |
| (3,2) | 0.181 8 | 0.855 4 | -2.870 6 |
| (3,3) | -0.181 8 | 0.855 3 | -2.870 6 |
| (3,4) | -0.514 1 | 0.707 8 | -2.870 5 |
| (2,1) | 0.346 5 | 0.476 4 | -2.943 6 |
| (2,2) | 0.000 0 | 0.588 3 | -2.943 4 |
| (2,3) | -0.347 1 | 0.476 8 | -2.944 1 |
| (1,1) | -0.175 4 | 0.239 6 | -2.988 6 |
| (1,2) | 0.175 0 | 0.239 3 | -2.988 0 |

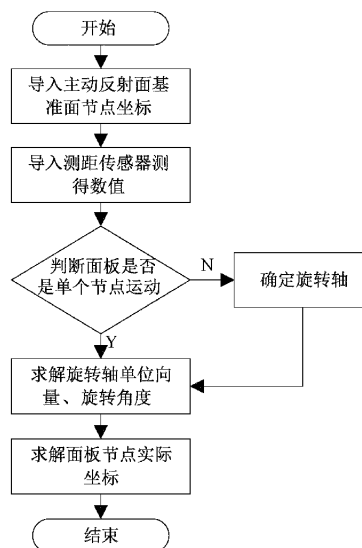


图9 计算实际面板节点流程

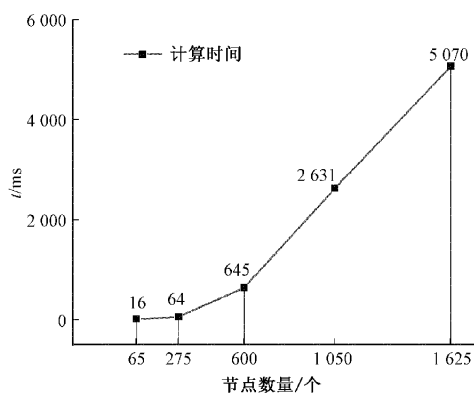


图10 计算时间随节点数量变化

4 结 论

本文为提高主动反射面技术中面形检测的实时性,建设了 5 m 口径主动反射面面形检测研究平台,提出一种基于测距传感器的面板节点坐标实时计算方法,利用基准面的节点坐标和测距传感器数据,将面板运动看作旋转运动,利用旋转矩阵分情况计算出单个节点运动和多个节点同时运动时的面板节点实际坐标,仿真结果显示,该方法能够通过传感器数据快速计算出当前面板节点坐标,随着节点数量的增多,计算时间呈非线性增长,节点数量越多,计算时间增长的越快,1 625 个节点的当前坐标计算用时 5 070 ms,能够快速为面形调整量的计算提供数据,进而提高主动反射面技术的实时性,面对环境因素的影响能够更快的做出调整,从而提高射电望远镜的电补偿性能。

参考文献

- [1] 李旸,叶骞,金惠良. 基于 QTT 促动器的热误差补偿[J]. 天文研究与技术,2021,18(2):240-247.
- [2] 张涛,郭阳,张庆海,等. FAST 反射面单元数字孪生模型的创建[J]. 现代计算机,2020(25):15-21.
- [3] PRESTAGE R M, ANDERSON R, BRANDT J, et al. The green bank telescope: A status update[J]. 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM), Boulder, 2017: 1-2.
- [4] PRESTAGE R M, CONSTANTIKES K T, HUNTER T R, et al. The green bank telescope[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8): 1382-1390.
- [5] SOUCCAR K, WALLACE G, GROSSLEIN R, et al. The architecture of the active surface control system of the large millimeter telescope[C]. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation. SPIE, 2014, 9151: 874-879.
- [6] 沈志强. 上海 65 米射电望远镜[J]. 科学, 2013, 65(3):15-20,2,4.
- [7] 孙正雄. 上海 65 米射电望远镜副面位置建模及性能测试[D]. 上海:上海应用技术大学,2016.
- [8] 董健,李娟,吴亚军,等. 偏焦全息测量技术在上海 65 米射电望远镜中的应用研究[J]. 中国科学院上海天文台年刊,2014:51-56.
- [9] 洪晓瑜. 上海 65 米射电望远镜系统研制[Z]. 上海:中国科学院上海天文台,2013-12-02.
- [10] 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[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2017,47(5):19-34.
- [11] 王从思,雷婷,严粤飞,等. 基于角度传感器的大口径射电望远镜面板实时位置计算方法[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2019,49(9):50-59.
- [12] 张新盼,郭可敬,李建军. 一种固定指向多波束天线安装测量技术研究[J]. 电子测量技术,2022,45(6):99-105.
- [13] 白杨,秦顺友. 大型反射面天线表面精度的全息测量方法[J]. 电子设计工程,2018,26(1):84-88.
- [14] SRIDHARAN T K, SAITO M, PATEL N A, et al. Holographic surface setting of the sub-millimeter array antennas [C]. Astronomical Structures and Mechanisms Technology. International Society for Optics and Photonics, 2004, 5495: 441-446.
- [15] 张晓玲,左营喜,娄铮,等. 斜轴式太赫兹天线的卡焦近场全息测量研究[J]. 天文学报,2020,61(6):128-138.
- [16] 栾骏. 面向 FAST 工程主动反射面系统的液压促动器研制及性能分析[D]. 天津:天津大学,2016.
- [17] 赵正旭,赵士伟,王威,等. 利用国产建模平台自动创建 FAST 索网数字化模型[J]. 现代计算机,2019(29):10-15,25.
- [18] 张宝国,赵建伟,张东亮,等. 基于激光测距原理的注浆高度监测系统[J]. 电子测量技术,2018,41(7):110-113.

作者简介

张庆海(通信作者),本科,副教授,主要研究方向为测控系统数字化和智能化等。

E-mail: zhangqinghai@qut.edu.cn

刘圣乾,硕士研究生,主要研究方向为主动反射面技术。

E-mail: liushengqian1998@qq.com

于春雨,博士,副教授,主要研究方向为复杂机电系统可靠性综合及预测、复杂系统可用性综合及预测、计量设备可靠性。

赵正旭,博士,教授,主要研究方向为虚拟现实技术、数字孪生技术等。