

研究文章 | 2022年2月14日

一种新型3-DOF并联天线机构的优化设计与轨迹跟踪实验

✉张最初、夏新禄、侯、郭金伟、何建良、冲力



AIP进步12025321 (2022年)

<https://doi.org/10.1063/5.0079915>



看法
在线



出口引
文



APL Energy
Latest Articles Online!
Read Now



优化设计和轨迹跟踪 一种新型3-DOF并联天线的实验研究 机制

引用如下: AIP进展12, 025321 (2022年); doi:
10.1063/5.0079915

提交日期: 2021年11月25日接受日期: 2022年1月27日
在线发布时间: 2022年2月14日



张国星,¹ 夏新露,¹ Yulei Hou,² 郭金伟,¹ a) 建良

他¹和李冲¹

附属机构

¹ 江苏科技大学机械工程学院, 中国, 镇江212100

² 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛066004 a) 应联系的作者: 1473733099@qq.com

摘要

天线的跟踪范围和指向性能是测量天线系统的重要指标。首先, 提出了作为天线支撑机构的3自由度并联机构。基于反位置求解模型, 分析了天线机构的轨迹跟踪原理。同时, 推导出了具有特定运动轨迹的天线机构的运动学模型。此外, 还基于驱动力矩和运动范围指标进行了结构优化设计。此外, 还根据轨迹跟踪要求进行了轨迹规划研究。在关节空间中进行了轨迹规划仿真。然后, 通过仿真得到了天线的运动范围。完成了该天线的具体轨迹跟踪仿真。此外, 基于所开发的天线机构原型, 进行了俯仰和方位运动性能实验。最后, 通过实验验证了五角星星的轨迹跟踪性能。本研究为天线的设计和工程应用提供了参考。

©2022作者(s)。除另有说明外, 所有文章内容均根据知识共享署名 (CC BY) 许可

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). <https://doi.org/10.1063/5.0079915>

I. 介绍

天线被广泛应用于信号通信和军事研究中。天线机构是天线系统稳定可靠运行的载体。该并联机构由多支腿和闭链组成, 具有结构紧凑、承载性能优异、惯性小、误差积累小等特点。¹ 并行天线在避免检测盲区、提高系统运行的稳定性、拓宽天线机构的新配置等方面具有重要的研究价值和应用潜力。

AMiBA射电望远镜采用斯图尔特平行机构作为该望远镜的支撑机构。射电望远镜的支撑机构有13组1.2 m孔径天线阵列。² 采用斯图尔特平行机构, 用于天线望远镜二次反射器的姿态调整。

^{3, 4} 500米孔径的球形射电望远镜 (FAST)

系统包括主动反射器、进给舱、进给舱姿态调节装置、测控装置, 成为世界上最大、最灵敏的射电望远镜。⁵ 邓等人。⁶ 设计了一种划分环桁架天线反射面的测地线网格方法。

轨迹跟踪任务需要实现方位角和俯仰运动。另外, 考虑到天线系统的存储要求, 较少的自由度 (DOF) 并行机构也能满足天线系统的移动要求。李等人。⁷ 设计了一个2-DOF冗余驱动的并联天线机构。基于运动学模型, 研究了该机构的工作空间和奇异性。劳伦等人。⁸ 设计了一个3-DOF的天线指向机构, 并分析了其指向精度。徐等人。⁹ 将具有两个连续旋转轴的2RPU-UPR平行机构应用于天线场, 完成了优化设计, 并制作出了原型。张¹⁰ 进行了调试和调试等方面的研究

极轴天线支撑机构的校准方法。阿尔图扎拉等人。¹¹设计了一个平行的指向机构。Abid等人。¹²研究了一种新型的2-DOF快速指向静态机构的刚度性能。阿希和哈耶里¹³研究了俯仰和偏航导向机构的动态建模和控制。库马尔和纳塔拉扬用激光跟踪器测量了天线系统的指向精度。¹⁴科里纳尔迪等人。¹⁵研究了3-CPU (C和U分别表示圆柱体和万向节) 平行指向机构的奇异自由路径规划问题。邵等人。¹⁶完成了天线反射器压电驱动定向站的结构和控制器设计。张等人。¹⁷研究了一个4-DOF并行天线的运动学和动力学。郭等人。¹⁸提出了一种新型的模块化桁架可展开天线机构, 并进行了组合方法和性能分析。邹等人。¹⁹研制了一种无旋转能力的3-DOF并行机械手。楚等人。²⁰提出了一种由平面多链路可展开单元组成的平面天线机构。冯刘²¹提出了一种基于图论的可展开式天线反射器的设计方法。宋等人。²²研究了基于位移子群和位移流形的并行天线机构的合成, 并提出了两种新的具有双旋转自由度的并行天线机构。韩等人。²³研究了基于螺旋理论的空间天线环桁架可展开机构的结构合成。郭等人。²⁴提出了一种基于对称六角形划分的新方法及其相应的模块化桁架可展开天线机制。Majeed等。^{25, 26}提出了一种新的具有两个形状参数的二次三角b样条 (QTBS) 函数, 并已成功应用于飞机设计中。

目前, 并联机构在天线领域的应用还处于理论研究和探索阶段。天线系统的轨迹跟踪能力和指向性能有待进一步改进和优化。设计一种跟踪范围宽、指向性能好的天线机构是天线领域的一个重要研究课题。因此, 提出了一种连续运动的3 DOF并行机构。在秒。二、构建了天线机构的指向原理。建立了轨迹跟踪指向模型。在秒。三, 研究了天线机构的轨迹规划。根据驱动力矩和运动范围指标对结构进行了优化。在秒。四、对天线的指向范围进行了模拟和分析。在实验原型的基础上, 开发了天线的运动性能和轨迹跟踪技术。主要结论在第Sec. V.

微光并联天线机构的指向性原理分析

A. 平行天线的逆运动学

机制

如图所示。1、并联天线机构由移动平台、固定平台和三个分支组成。三个分支通过旋转接头与固定平台和移动平台连接。与固定平台连接的旋转接头的驱动角记录为 β_i ($i=1, 2, 3$)。固定平台 $P_1P_2P_3$ 和移动平台 $Q_1Q_2Q_3$ 是等边三角形。坐标系 $O-xyz$ 和

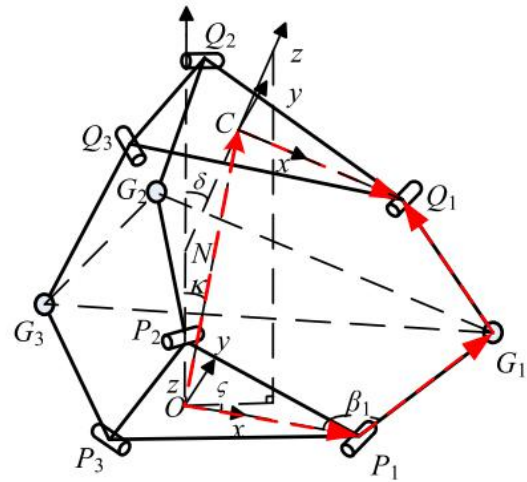


图1. 并联天线机构示意图。

$C-xyz$ 分别建立在固定/移动平台上。 O 的方向 x 轴与 OP_1 一致, O 的方向 z 轴垂直于固定的平台, 正向上, 是 C 的方向 x 轴与 CQ_1 一致, 以及 C 的方向 z 轴垂直于移动的平台, 正向上。固定坐标系的原点向量 OC 与移动坐标系之间的相对距离为 r 。固定坐标系的 z 轴与运动坐标系之间的夹角为俯仰角 δ 。 C 的投影之间的夹角 ζ 移动坐标系的轴和固定的 Cx 轴为方位角 ζ 。

所述天线机构的所述致动接头包括一旋转接头 P_i ($i=1, 2, 3$) 与固定平台连接。对于逆运动学分析, 假设为位置矩阵 ${}^O R_C$ 和姿态矩阵 ${}^O R_C$ 的运动平台是已知的。逆运动学的目的是获得驱动关节变量。为了得到各驱动机构的角度值, 根据天线机构的结构特性, 可以将该分支的闭环矢量方程写成

$${}^O_{op}P_i + {}^O_{P_i}G_i + {}^O_{G_i}Q_i = {}^O_r + {}^O_{RC}C_iQ_i, \quad (1)$$

其中, i 的分别为1、2和3, ${}^O_{P_i}G_i$ 是旋转关节的向量 P_i 至 G_i 在固定坐标系中, ${}^O_{G_i}Q_i$ 是旋转关节 G_i 的向量 i 到 Q_i 在固定坐标系中, ${}^O_{C_i}Q_i$ 是旋转关节的向量 C_i 到 Q_i 在固定的坐标系中, 和 ${}^O_{C_i}Q_i$ 是旋转关节的向量 C_i 到 Q_i 在移动的坐标系中。

根据闭环向量方程, 等式(1)可以表示为

$${}^O_{G_i}Q_i = {}^O_r + {}^O_{RC}C_iQ_i - {}^O_{op}P_i - {}^O_{P_i}G_i. \quad (2)$$

相对于固定坐标系, 移动坐标系原点的位置向量可以表示为 ${}^O_r = [r_k \zeta, r_k \zeta, r_k]^T$ 。此外, 这个姿势

并联天线机构的输入与输出之间的关系如下:

$$\theta_{31} = 2 \arctg \left(\frac{4LC_3 + [16L^2C_3^2 - 4((C_1^2 + C_2^2 + C_3^2)^2 - (\sqrt{3}C_2L + C_1L)^2)]^{\frac{1}{2}}}{2(C_1^2 + C_2^2 + C_3^2 + (\sqrt{3}C_2L - C_1L))} \right). \quad (7)$$

2024年6月20日07:49

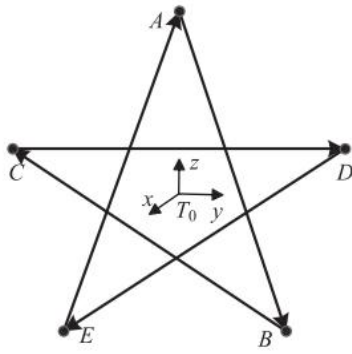


FIG. 3. Pentagram trajectory.

因此，目标轨迹的位置向量点A-E在固定坐标系0-0中 $xOyOz$ 可获得如下信息：

$$otA \sim E = OT_0 + T_0TA \sim E = [T_x, T_y, T_z]^T. \quad (11)$$

将目标点的坐标向量替换为等式(11)，可以得到平行天线随目标点变化的姿态参数 r 、 θ 和 ϕ 。因此，通过逆运动学解可以得到平行天线的驱动参数。

C. 轨迹规划方法

轨迹规划是实现并行天线机构有效控制的前提。并行天线机构需要实现方位角和螺距运动。在运动过程中，轨迹的运动节点具有位姿、速度和加速度的要求。利用五次多项式差分的轨迹规划方法，可以在联合空间中实现并行天线的轨迹规划。致动关节角的五次多项式表达式如下：

$$\beta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5. \quad (12)$$

关节角速度 $\dot{\beta}$ 和角加速度 $\ddot{\beta}$ 表示如下：

$$\begin{cases} \dot{\beta}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4, \\ \ddot{\beta}(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3. \end{cases} \quad (13)$$

并行天线机构联合运动的起点和终点的约束条件如下：

$$\begin{cases} \beta(0) = \beta_0, \beta(t_f) = \beta_f, \\ \dot{\beta}(0) = \dot{\beta}_0, \dot{\beta}(t_f) = \dot{\beta}_f, \\ \ddot{\beta}(0) = \ddot{\beta}_0, \ddot{\beta}(t_f) = \ddot{\beta}_f. \end{cases} \quad (14)$$

同时表达式(12) - (14)如下：

$$\begin{cases} \beta_0 = a_0, \beta_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 + a_4 t_f^4 + a_5 t_f^5, \\ \dot{\beta}_0 = a_1, \dot{\beta}_f = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 + 4a_4 t_f^3 + 5a_5 t_f^4, \\ \ddot{\beta}_0 = 2a_2, \ddot{\beta}_f = 2a_2 + 6a_3 t_f + 12a_4 t_f^2 + 20a_5 t_f^3. \end{cases} \quad (15)$$

通过求解等式，可以得到五次多项式的系数(15)，

$$\begin{cases} a_0 = \beta_0, a_1 = \dot{\beta}_0, a_2 = \frac{\ddot{\beta}_0}{2}, \\ a_3 = \frac{20\beta_f - 20\beta_0 - (8\dot{\beta}_f + 12\dot{\beta}_0)t_f - (3\ddot{\beta}_0 - \ddot{\beta}_f)t_f^2}{2t_f^3}, \\ a_4 = \frac{30\beta_f - 30\beta_0 + (14\dot{\beta}_f + 16\dot{\beta}_0)t_f + (3\ddot{\beta}_0 - 2\ddot{\beta}_f)t_f^2}{2t_f^4}, \\ a_5 = \frac{12\beta_f - 12\beta_0 - (6\dot{\beta}_f + 6\dot{\beta}_0)t_f - (\ddot{\beta}_0 - \ddot{\beta}_f)t_f^2}{2t_f^5}. \end{cases} \quad (16)$$

罗马数字 3 并联天线机构的结构优化与仿真

A. 并联天线的结构优化

机制

分支驱动转矩的最大值与伺服电机的选择有关。进一步考虑到天线完成了相同的轨迹，运动范围需要尽可能小。因此，以分支驱动力矩和分支运动范围作为优化指标。利用亚当斯软件建立了该机构的参数化模型。并对该机构的结构参数进行了优化。该机构的结构参数包括连杆长度 L ，固定平台半径 RO ，以及移动平台半径 RC 。从移动平台中心到固定平台中心的距离为 $|r|$ 。因此， L ， RO ， RC ，并选择 $|r|$ 作为设计变量，如表I所示。

根据机构的几何结构和设计变量的初始值，在Adams参数分析模块中创建了11个标记点，分别为固定的平台中心点、移动的平台中心点和9个铰链点。根据几何特征，完成了11个标记点的参数方程。Adams中定义的设计变量还包括杆长参数 L 、初始高度 H 、初始角 β_0 、 β_1 和 β_2 、方位角 x 、俯仰角 d 、固定平台半径 R_{0_Varia} 和移动平台半径 R_{C_Varia} 。该机理的参数化模型如图所示。4。

考虑了四个参数对该机构驱动转矩性能指标的综合影响。基于参数分析的实验设计函数，给出了优化目标和四组设计变量。另外，设计级别设置为6，即将每组设计变量分为6组数据。 N 组配置

表i. 该机制的参数化变量。

参数	L (m)	RO (m)	RC (m)	$ r $ (m)
初始	0.420	0.150	0.150	0.520
价值				
变化	0.400 -	0.130 -	0.130 -	0.500 -
一系列	0.430	0.160	0.160	0.530

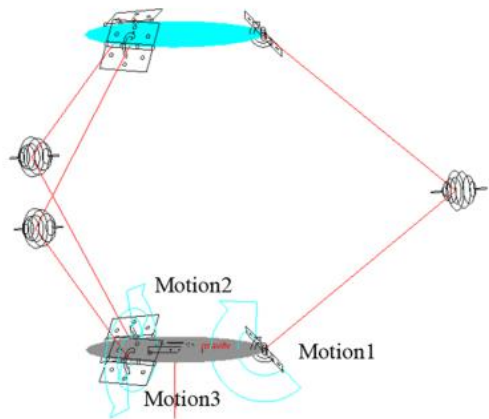


图4. 并联天线机构的参数化模型。

得到了一些参数，其中 $N=6^4=1296$ 。各组参数与根据实验设计模块得到的驱动转矩之间的关系如图所示。5.

根据图. 5、分支驱动力矩随设计变量的变化而波动。在仿真中各分支的最大驱动扭矩中选择较小的六组数据

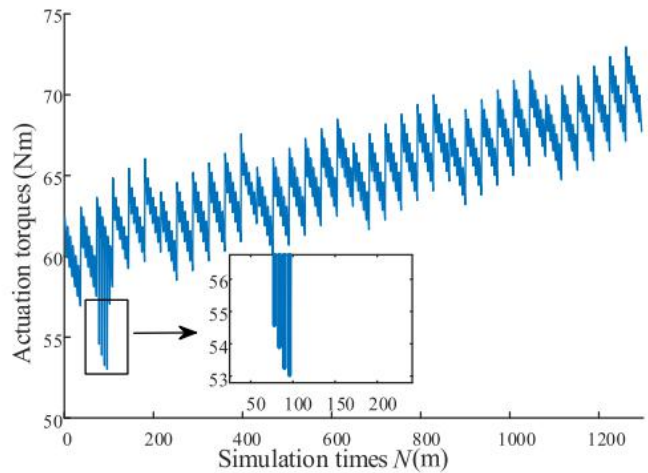


图5. 基于驱动转矩指标的优化结果。

表二. 基于驱动转矩指数的参数化变量。

N	L (m)	RO (m)	RC (m)	$ r $ (m)	Torques (N m)
36	0.400	0.130	0.160	0.530	56.925
78	0.400	0.142	0.130	0.530	54.567
84	0.400	0.142	0.136	0.530	53.884
90	0.400	0.142	0.142	0.530	53.243
96	0.400	0.142	0.148	0.530	53.022

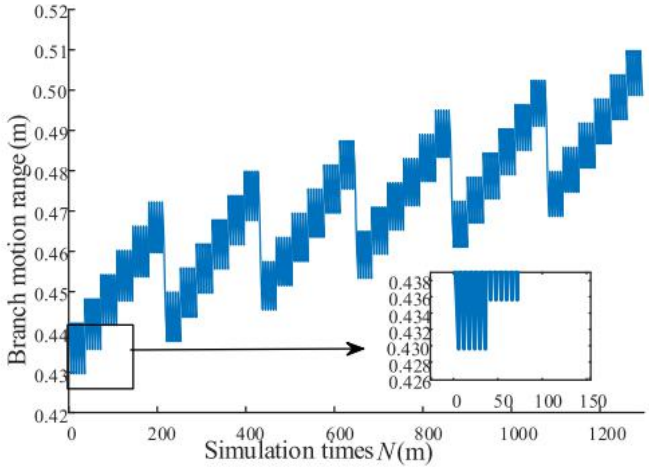


图6. 基于分支运动范围指数的优化结果。

表III. 基于分支运动范围指数的参数化变量。

N	L (m)	RO (m)	RC (m)	$ r $ (m)	范围 (m)
6	0.400	0.130	0.130	0.530	0.430
12	0.400	0.130	0.136	0.530	0.430
18	0.400	0.130	0.142	0.530	0.430
24	0.400	0.130	0.148	0.530	0.430
30	0.400	0.130	0.154	0.530	0.430
36	0.400	0.130	0.160	0.530	0.430

参数，分别为第36、78、84、90和96组。五组参数变量的值见表2。

各组参数与基于实验设计模块得到的分支运动范围之间的关系如图所示。6.

如图所示。6、分支运动的范围随设计变量的变化而波动。取出仿真参数中最大分支运动范围较小的6组数据，分别为第6、12、18、24、30和36组。六组参数变量的值见表3。

根据表二和表三可知，在第36组模拟参数中，并联机构的驱动力矩和分支运动范围较小。根据实验设计和优化分析结果，得到了一组使该机构具有优良性能的关键结构尺寸参数。该机构的连杆长度为 $L = 0.400$ m，固定平台半径为 $RO = 0.130$ m，移动平台半径为 $RC = 0.160$ m，从移动平台中心到固定平台的距离为 $|r| = 0.530$ m。

B. 轨迹规划的仿真分析

模拟了联合空间五次多项式差分轨迹规划。平行天线机构的方位角和俯仰运动形式如下：(1)方位角运动：平行天线的俯仰角为 45° 和方位角运动

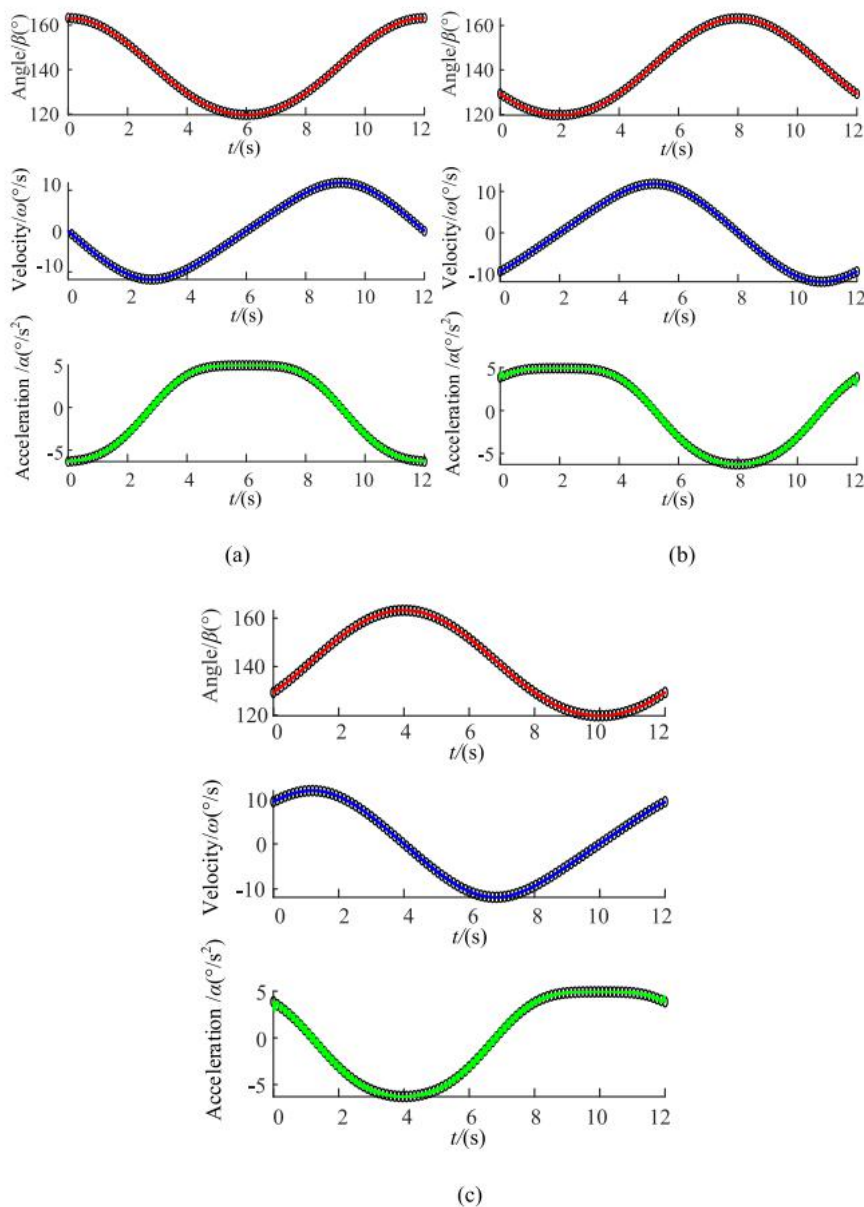


图7. 方位角轨迹规划：关节1的(a)运动参数、关节2的(b)运动参数、关节3的(c)运动参数。

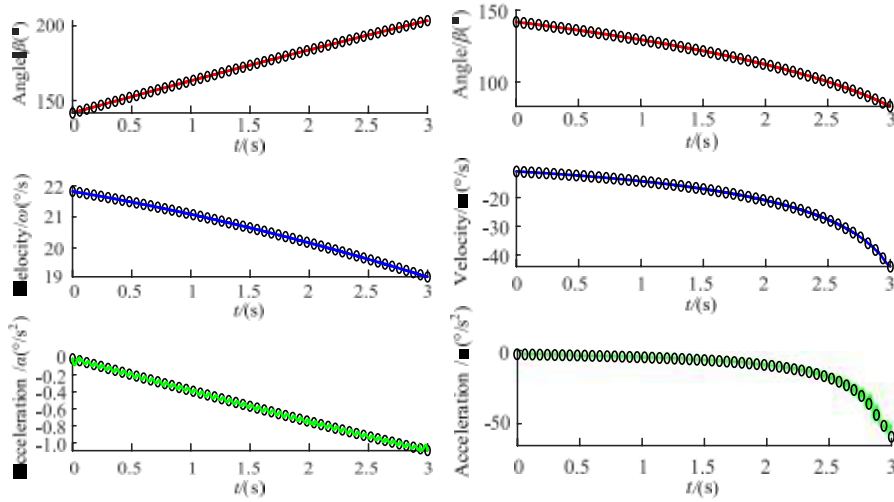
是 $0^{\circ} - 360^{\circ}$ ，速度为 $30^{\circ}/s$ 和(2)螺距运动：平行天线的方位角为 0° 而音高运动是 $0^{\circ} - 90^{\circ}$ ，速度为 $30^{\circ}/s$ 。平行天线机构驱动关节的关节角、角速度、角加速度如图所示。7和8。

如图所示。7和8，在具有五分之一多项式差的平行天线机构的方位角和螺距运动过程中，驱动关节的轨迹曲线通过所有目标角位移、角速度和角加速度节点。角速度曲线和角加速度曲线比较平滑。此外，并行天线的轨迹跟踪过程是稳定的。基于五次多项式的差分

在关节空间上，为平行天线的运动控制奠定了基础。

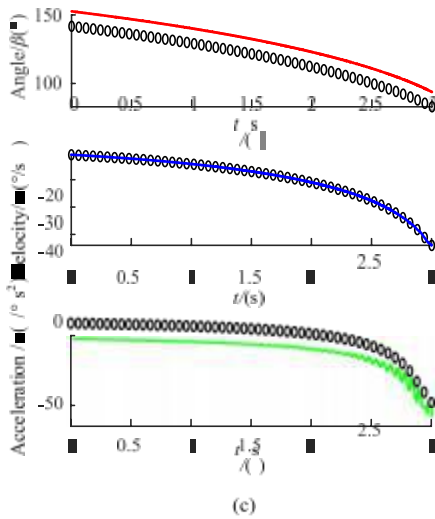
C. 并行算法的指向性能仿真 天线机构

平行天线机构的运动参数设置如下：(1)方位角运动：方位角 $\zeta \in [0^{\circ} - 360^{\circ}]$ ，螺距角 $\delta = 45^{\circ}$ ，和相对距离 $r = 540mm$ ，和(2)螺距运动：方位角 $\zeta = 0^{\circ}$ ，俯仰角 $\delta \in [0^{\circ} - 90^{\circ}]$ ，和相对距离 $r = 540mm$ 。MATLAB用于模拟和验证天线机构的运动特性，以及螺距和



(a)

(b)



(c)

图8. 螺旋轨迹规划：关节1的(a)运动参数、关节2的(b)运动参数、关节3的(c)运动参数。

图9. 平行天线机构运动线框：(a)螺旋运动和(b)方位运动。

得到了方位角运动轨迹和运动包络空间
如图所示。9和10。
如图所示。9(a)和9(b)，移动平台中心
运动轨迹平滑。平行天线系统的运动
工艺稳定，无干扰。如图所示。10、标准杆
并联天线机构具有连续移动的能力
半球形空间。

增值指向性能的实验
的平行天线机构

A. 指向性能实验

考虑到天线系统在实验现场运动范围的限制，采用1：2的比值制作了平行天线机构的实验原型，验证了天线机构的轨迹跟踪能力。在零件设计的基础上，利用鞋底工程对天线机构的零部件进行了组装，最终得到了天线的整体模型。给定俯仰角，实现了平行天线机构的运动姿态演示，如图所示。11。
基于样机的三维配置，对实验样机进行了处理、组装和调试。并联天线机构组装后的物理原型如图所示。12。
进行了天线结构的设计和原型的开发，并完成了电气系统和软件系统的设计。然后，通过对并行天线系统的功能测试，验证了该天线系统的性能。平行天线机构的俯仰运动过程如下：起始姿态为初始姿态，期望姿态为



图12. 并联天线机构的原型。

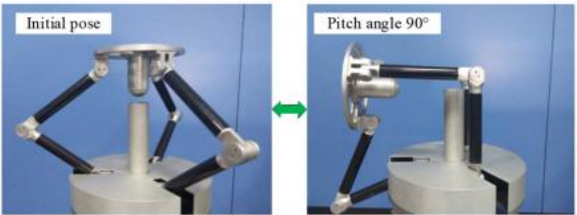


图13. 平行天线机构的俯仰过程。

俯高特定角度姿势，结束姿势再次返回到初始姿势。图13显示了俯仰角为90°。
平行天线机构的方位角移动过程如下：首先，天线从初始姿态移动到方位角0°和俯仰角45°。第二，天线的俯仰角保持不变，方位角从0开始移动°至180°。第三，天线的俯仰角保持不变，

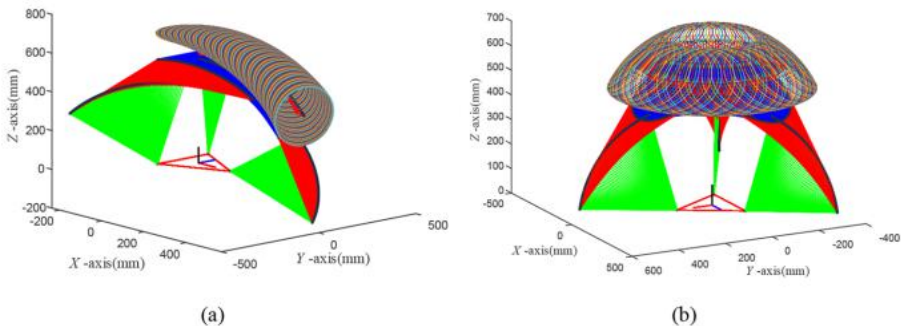


图10. 平行天线机构的运动包络线：
(a) 螺旋运动和(b)方位角运动。

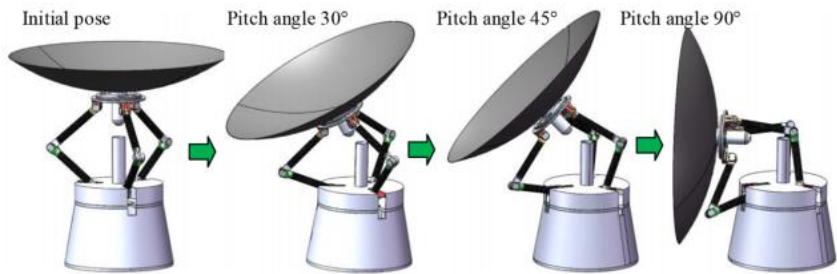


图11. 平行天线机构的三维结构。

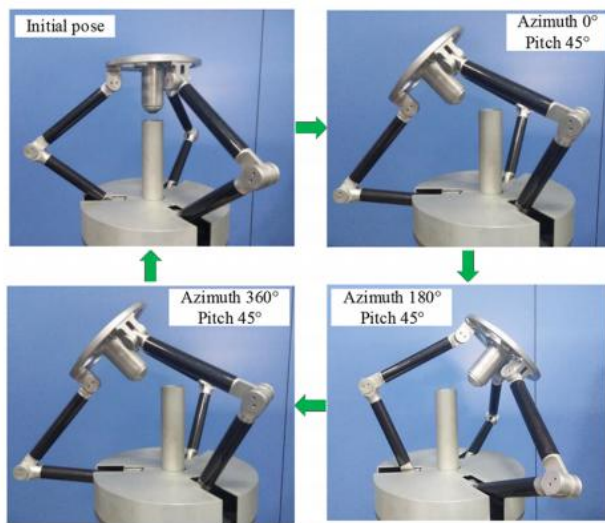


图14. 平行天线机构的方位角运动过程。

而方位角从180开始移动 $^{\circ}$ 至360 $^{\circ}$. 最后, 从俯仰角45返回初始位置和方向 $^{\circ}$ 方位角360 $^{\circ}$. 平行天线机构的完整方位角运动过程如图所示。¹⁴.

B. 轨迹跟踪实验

轨迹跟踪实验的目的是验证并行天线机构的轨迹跟踪能力

并观察平行天线机构是否能按照预期的轨迹完成动作。实验内容如下: 图纸上给出了五角星图案。激光笔用于初步校准, 以确定图纸板的适当位置。

然后, 驱动天线的运动, 形成激光束

用激光笔发射的, 沿着五角星的轨迹运动。

将天线位置和方向的驱动数据输入控制程序。平行天线机构的五角星轨迹跟踪实验如图所示。¹⁵. 在3-DOF平行天线的移动平台上的激光点以五角星模式的顺序移动。实验结果表明, 3-DOF平行天线能够按照预期的目标轨迹移动, 具有良好的轨迹跟踪能力。

指向精度是平行天线机构的一个重要指标。需要利用测量仪对并联天线机构的运动参数进行测试。采用徕卡AT901-B激光跟踪器, 观察平行天线机构的螺距和方位角。在测量了移动坐标系的位置和方向后, C-CuCvCw在固定坐标系0-0中 $xOyOz$ 利用激光跟踪器, 间接地得到了平行天线机构的俯仰角 θ 和方位角 φ 的实际值。表四显示了平行天线机构在运动过程中的指向误差。

根据表四所示的测量数据, 拟合后的方位角和俯仰角的轨迹跟踪误差如图所示。¹⁶.

如表四和图中所示。¹⁶、平行天线的方位角误差保持在 -0.036° 至 0.030° . 音高误差

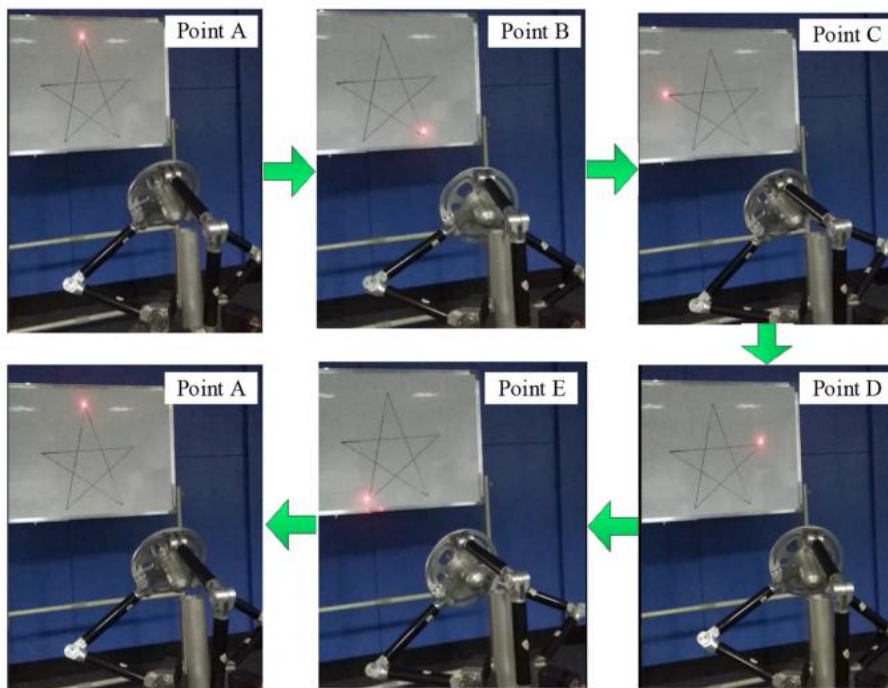


图15. 五角星跟踪过程。

表iv. 平行天线机构的指向误差。

方位角理想值 (deg)	实际方位角值 (deg)	错误 (deg)	理想的俯仰值 (deg)	实际间距值 (deg)	错误 (deg)
0	0.026	-0.026	30	29.984	0.016
20	19.970	0.030	30	30.027	-0.027
40	39.968	0.032	30	29.990	0.010
60	59.964	0.037	30	29.974	0.026
80	79.985	0.015	30	29.990	0.010
100	99.993	0.007	30	29.991	0.009
120	119.997	0.003	30	29.995	0.005
140	139.985	0.015	30	30.026	-0.026
160	159.981	0.019	30	30.006	-0.006
180	179.987	0.013	30	29.977	0.023
200	199.997	0.003	30	29.965	0.035
		0.015	30	29.964	0.036
		0.03	30	29.974	0.026
		0.024	30	30.028	-0.028
		0.008	30	30.011	-0.011
		0.009	30	29.966	0.035
		0.021	30	29.972	0.028
		0.029	30	29.977	0.023
		0.010	30	29.979	0.021

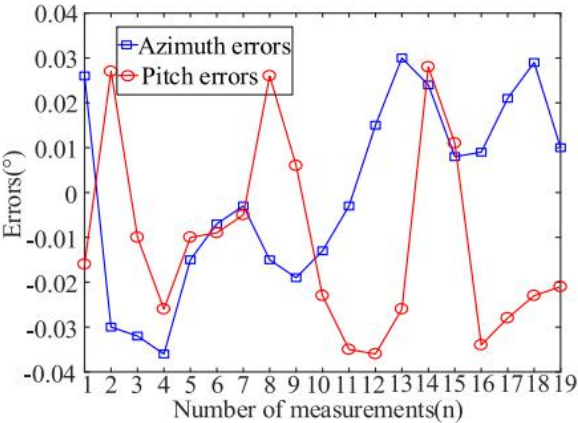


图16. 并联天线机构的轨迹跟踪误差。

保持在 -0.036° 至 0.028° . 分析表明, 并联天线的螺距和方位指向精度优于 0.1° . 并联天线的运动误差主要是由加工误差和装配误差引起的. 从实验结果可以推断, 并联天线的指向精度符合设计指标.

V. 结论

提出了3-DOF并联机构作为天线机构. 平行天线的轨迹跟踪原理

基于逆位置模型推导了机理。随后，建立了具有特定运动轨迹的平行天线机构的运动学模型。根据分支驱动力矩和运

动范围对结构参数进行了优化。此外，基于关节空间中的五次差分多项式完成了天线的轨迹规划。基于软件仿真，绘制了天线的运动范围。此外，还进行了天线特定轨迹跟踪仿真。

研制了并联天线机构的原型，并进行了实验研究。平行天线在俯仰和方位角运动过程中运行平稳，无干扰。根据并行天线机构的轨迹跟踪原理，实现了对五角星轨迹的实时跟踪。此外，还验证了并联天线机构和控制系统的有效性。实验结果表明，并联天线机构的螺距和方位角指向误差均小于 0.1° ，符合设计要求。本研究为并联天线机构的工程应用奠定了基础。

确认

本研究由国家重点研发计划项目资助(No. 2018YFC0309100)，国家自然科学基金资助项目(项目No. 51905228)，河北省自然科学基金资助项目(基金资助项目No. E2019203109)、河北省高等学校重点研究项目(资助项目No. ZD2019020)。

作者声明

违背公共利益的行为

作者之间没有任何需要披露的冲突。

数据可用性

支持本研究结果的数据可根据合理的要求从通讯作者处获得。

参考文献

- ¹ Z. 黄, 问. C. 李和H. F. 丁, 《平行机制理论》(施普林格, 多尔德雷赫特, 2013)。
- ² P. M. 科赫, M. 凯斯蒂文, H. Nishioka等., “阿米巴六足望远镜安装”。*J.* 694(2), 1670 – 1684 (2009).
- ³ Y. L. Hou, Y. B. 段, Y. C. 龚等., “65米射电望远镜亚反射器调整机构的校准”, 中国机械公司。*雕刻*24(24), 3318 – 3322+3328 (2013).
- ⁴ J. T. 姚, D. X. 曾, Y. L. 侯等人., “大型射电望远镜天线中亚反射器调节系统的设计与实验研究”, 载人太空飞行22(1), 69–73+87 (2016)。
- ⁵ Q. 王, Y. 高, J. X. 薛等人., “五百米孔径球形射电望远镜反射面液压执行器的关键性能分析”, *J. 机械. 雕刻*53(2), 183 – 191 (2017).
- ⁶ H. 邓, T. 李和Z. 王建, “空间可展开网格反射器测地线电缆网的设计”, 《宇航员空间学报》。119, 13 – 21 (2016).
- ⁷ X. 李, X. 丁和G. S. “天线指向冗余驱动的机构分析”, 教授。*在. 机械. 工程.*, 第G 231(2)部分, 第229–239部分 (2017)。
- ⁸ B. 劳伦, R. 尼古拉斯和M. 杨恩, “3POD: 高性能并行天线指向机制”, 第15届欧洲空间机制与部落学研讨会-ESMATS, 诺德维克, 荷兰 (2013), 页。25 – 27.
- ⁹ Y. D. 徐, S. S. 童, B. 王等人., “2RPU-UPR并行机制在天线支持中的应用”, 中国机械技术。*雕刻*30(14), 1748 – 1755 (2019).
- ¹⁰ Y. L. 张, “太阳无线电观测系统极地底座设计”, 无线电通讯。技术。35(5), 40 – 43 (2009).
- ¹¹ O. 阿尔图扎拉, E. 马乔, J. 阿吉纳加等人., “低能耗太阳能跟踪平行机构的设计”, 专业介绍。*在. 机械. 工程.*, C 229(3)部分, 566–579 (2015)。
- ¹² M. Abid, J. Yu, Y. 谢等人., “一种新型的快速转向镜的2-DOF旋转指向机构的概念设计、建模和符合性表征”, *Chin. J. 航空员*. 33(12), 3564 – 3574 (2020).
- ¹³ B. Ahi和M. Haeri, “一种高性能制导滤波方案与精确动态建模的俯偏航臂导引器机制”, *Mech. 西斯特. 信号处理*. 144, 106857 (2020).
- ¹⁴ A. 库马尔和T. “基于激光的实时天线指向测量系统”, *Int. J. 雕刻技术*. 7(3), 28 – 32 (2018).
- ¹⁵ D. Corinaldi, M. 卡莱加里和J. 洛杉矶, “为一类球形平行机制设计的灵巧指向任务的无奇点路径规划”, *Mech. 马赫数. 理论*128, 47–57 (2018)。
- ¹⁶ S. 邵, S. 宋等人., “空间天线指向的压电驱动定向台的结构和控制设计”。*西斯特. 信号处理*. 138, 106525 (2020).
- ¹⁷ G. X. 张, D. H. 郑, J. W. 郭等人., “3-R (RRR) R+R天线机构的动态建模和移动性分析”, *Robotica* 39(8), 1485–1503 (2021).
- ¹⁸ J. 郭, Y. 赵, Y. 徐等人., “一种新型的模块化桁架天线可展开机构: 装配原理与性能分析”。*科学. 技术*. 105, 105976 (2020).
- ¹⁹ Q. Zou, D. 张, S. 张等人., “一个3-DOF平行机构的运动学和动力学分析”, *Int. J. 机械. 母亲设计*17, 587 (2021).
- ²⁰ Z. 朱, Z. 邓, X. 齐等人., “大型可部署天线结构的建模和分析”, 《宇航员行动报》。95(1), 51 – 60 (2014).
- ²¹ C. M. 冯和T. S. 刘, “反射天线可展开机构的图论方法”, 宇航员报。87(6), 40 – 47 (2013).
- ²² Y. 宋, Y. 齐, G. Dong和T. 太阳, “驱动卫星间链路天线的2-DOF旋转平行机构的类型合成”, 秦。*J. 航空员*. 29(6), 1795 – 1805 (2016).
- ²³ B. 韩, Y. 徐, J. 姚等人., “基于螺旋理论的空间天线环向桁架可展开机构的配置合成”。9(8), 085201 (2019).
- ²⁴ J. 郭, Y. 赵, Y. 徐等人., “基于新型对称六边形轮廓划分方法的桁架可展开天线机构的设计与分析”。*J. 航空员*. 34(8), 87 – 100 (2021).
- ²⁵ A. Majeed. 阿巴斯, F. Qayyum等人., “使用具有形状参数的新的三次三角b样条函数的几何建模”, *数学*8(12), 2102 (2020).
- ²⁶ A. Majeed. 阿巴斯. A. 西塔尔等人., “使用具有形状参数的二次三角b样条的飞机设计”, *数学*6(7), 7669–7683 (2021).

