

文章编号: 2095-4980(2024)12-1370-05

## 基于相控阵馈源的射电望远镜结构扰动补偿

牛晟璞<sup>1,2,3</sup>, 伍洋<sup>1,2,3</sup>, 孔德庆<sup>1,2,3</sup>, 霍克强<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 河北 石家庄 050081; 2. 河北省射电天文技术重点实验室, 河北 石家庄 050081;  
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100101)

**摘要:** 为解决大型射电望远镜天线受重力、风和日照影响引起的馈源扰动、反射面表面形变的问题, 采用相控阵馈源技术, 通过对每个单元进行适当的激励, 弥补馈源扰动和反射面表面形变导致的幅相误差。对比了高斯馈源和相控阵馈源在 3 种不同情况下的性能, 仿真结果表明, 相控阵馈源不仅可以纠正馈源扰动导致的指向偏差, 还可以补偿反射面形变导致的相位误差, 提高波束的性能。相控阵馈源将传统机械式形面调整转换为电子式形面补偿, 不仅提高了天线的性能, 还降低了资源消耗, 适用于大型射电望远镜天线。

**关键词:** 相控阵馈源; 馈源扰动; 反射面形变; 射电望远镜天线

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023401

## Structure disturbance compensation of radio telescope based on phased array feed

NIU Shengpu<sup>1,2,3</sup>, WU Yang<sup>1,2,3</sup>, KONG Deqing<sup>1,2,3</sup>, HUO Keqiang<sup>1,2,3</sup>

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050081, China;  
2. Hebei Key Laboratory of Radio Astronomy Technology, Shijiazhuang Hebei 050081, China;  
3. National Astronomical Observatory, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** To address the issues of feed perturbation and reflector surface deformation in large radio telescope antennas caused by gravity, wind, and solar radiation, phased array feed technology is employed. By appropriately exciting each unit, the amplitude and phase errors resulting from feed perturbation and reflector surface deformation are compensated for. The performance of Gaussian feeds and phased array feeds under three different conditions is compared, and simulation results indicate that phased array feeds can not only correct the pointing deviation caused by feed perturbation but also compensate for the phase errors caused by reflector deformation, thereby enhancing the performance of the beam. Phased array feeds convert traditional mechanical surface adjustments to electronic surface compensation, which not only improves the performance of the antenna but also reduces resource consumption, making them suitable for large radio telescope antennas.

**Keywords:** phased array feed; feed disturbance; reflector surface deformation; radio telescope antenna

受重力、太阳辐射、雨雪以及风载等因素影响, 大型射电望远镜的结构变形严重, 影响了射电望远镜的指向精度和天线效率<sup>[1]</sup>。射电望远镜的重力形变、轨道形变等影响是静态可重复的, 这些因素可通过指向修正模型和主副面的调整实现修正, 而日照温度、风载等受天气的影响非常明显, 同时与天线的姿态关系密切, 因此天线的温度和风载形变具有时变和难以预测性, 其导致的动态指向和面形误差很难通过预先的测量和模型进行精确修正。

检测这些大型射电望远镜反射面形状, 主要采用摄影测量法、激光测量法以及射电全息法。在用这些方法获得实际反射面形状后, 可计算出反射面上各个点的调整量, 通过人工、自适应面板等直接或间接进行面形调整。但上述机械补偿方法已不能满足高频段大型望远镜的实际工作性能需求, 机械补偿方法在速度上无法跟上风载荷、日照强度等的变化。若采用主动面调整技术, 除了反应速度低这一缺点外, 还需要数量庞大的促动器,

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-04-27

这提高了成本，并降低机械补偿系统的可靠性。

将相控阵馈源作为大口径射电望远镜天线的主焦馈源的研究始于 20 世纪末，是目前研究的热点和重要发展方向。与传统的多馈源方式相比，相控阵馈源可形成紧密交叠的波束，实现连续的天空覆盖；还能够通过适当的激励，补偿馈源偏焦造成的相位误差，从而将偏轴波束的增益提高至与轴向波束相当的水平<sup>[2]</sup>。

鉴于此，考虑从电子补偿而非机械补偿的角度，利用相控阵馈源快速、便宜地校正反射面形变。电子补偿主要是通过相控阵馈源幅相加权进行补偿，优点是能快速调整馈源阵列各单元激励的振幅和相位，从而间接达到校正或补偿反射面形变的目的。目前，国内在研究利用相控阵馈源进行大型射电望远镜电性能优化及反射面形变电子补偿方面所做的工作很少，但其价值不可小觑。随着深空通信距离越来越远以及多波束天线的应用，通过机械方式调整反射面形状，其实已无法实现更高的增益以及满足交叉极化、副瓣电平和整体辐射特性等方面的性能要求，而电子补偿则可以弥补这不足。

本文依托于某大型射电望远镜天线<sup>[3-4]</sup>，通过对相控阵馈源技术进行研究，实现对重力、风载荷、日照温度等导致的反射面天线指向误差的实时补偿。

## 1 馈源扰动

由于受风和温度的影响，馈源受到扰动导致馈源偏焦并发生倾斜。以工作频率为 32 GHz 的 7 m 反射面天线为例进行仿真，分析以下 3 种情况下，分别采用高斯馈源和相控阵馈源的天线性能。

### 1.1 馈源无扰动

当馈源无扰动时，若采用高斯馈源照射天线，天线的方向图如图 1 所示，图中天线指向 0°，增益为 66.37 dB；若采用相控阵馈源照射天线，利用焦面场的共轭场<sup>[5]</sup>即幅相补偿进行计算，此时天线的方向图如图 2 所示，图中天线指向 0°，增益为 66.86 dB。

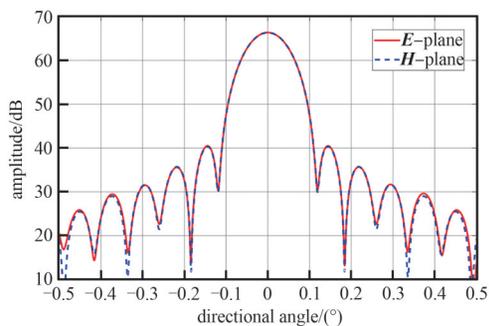


Fig.1 Performance of Gaussian feed without disturbance  
图 1 无扰动时的高斯馈源性能

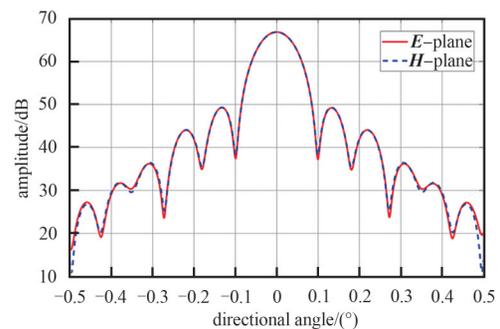


Fig.2 Performance of phased array feed without disturbance  
图 2 无扰动时的相控阵馈源性能

### 1.2 馈源倾斜 3°，横向和纵向同时偏焦 10 mm

当馈源倾斜 3°，横向和纵向同时偏焦 10 mm 时，若采用高斯馈源照射天线，天线的方向图如图 3 所示，图中天线指向 0.03°，增益为 65.82 dB；若采用相控阵馈源照射天线，利用焦面场的共轭场进行计算，则天线的方向图如图 4 所示。图中天线指向 0°，增益为 66.86 dB。

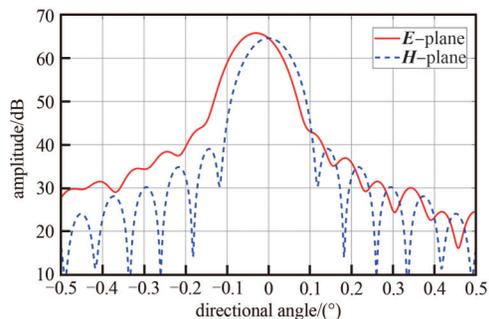


Fig.3 Performance of Gaussian feed with disturbance  
图 3 受扰动时的高斯馈源性能

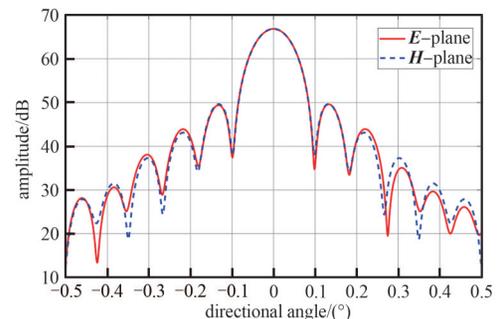


Fig.4 Performance of phased array feed with disturbance  
图 4 受扰动时的相控阵馈源性能

1.3 馈源倾斜 3°，横向和纵向同时偏焦 20 mm

当馈源倾斜 3°，横向和纵向同时偏焦 20 mm 时，若采用高斯馈源照射天线，天线的方向图如图 5 所示，图中天线指向 0.06°，增益为 65.72 dB；若采用相控阵馈源照射天线，利用焦面场的共轭场进行计算，则天线的方向图如图 6 所示，图中天线指向 0°，增益为 66.82 dB。

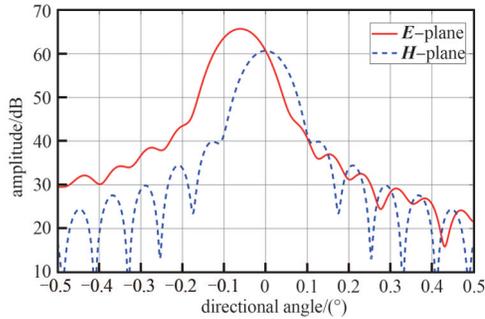


Fig.5 Performance of Gaussian feed with disturbance  
图5 受扰动时的高斯馈源性能

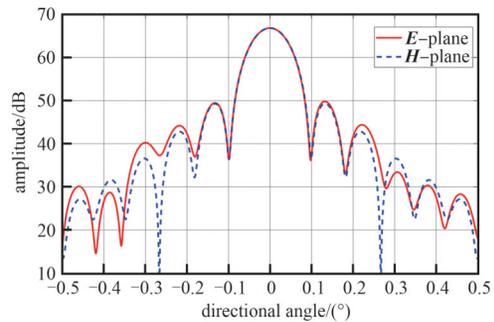


Fig.6 Performance of phased array feed with disturbance  
图6 受扰动时的相控阵馈源性能

3 种情况的对比如表 1 所示。可以看出，当馈源受到扰动时，天线的性能受到影响，扰动越大，天线的增益和效率越低，指向偏轴角度越大。采用相控阵馈源进行幅相补偿后，可以弥补馈源受风和温度扰动的影响，提升天线效率，且波束始终指向轴向。

表 1 馈源扰动时相控阵馈源和高斯馈源性能对比

Table1 Comparison of performance between phased array feed and Gaussian feed with feed source perturbation

	Gaussian feed	phased array feed	Gaussian feed	phased array feed	Gaussian feed	phased array feed
later offset distance /mm	0	0	10	10	20	20
vertical offset distance/mm	0	0	10	10	20	20
tilt angle/(°)	0	0	3	3	3	3
gain/dB	66.37	66.86	65.82	66.86	65.72	66.82
efficiency/%	78.79	88.20	69.41	88.20	67.83	87.39
beam direction/(°)	0	0	0.03	0	0.06	0

2 反射面形变

受到重力和温度的影响，反射面的形面会发生改变。以工作频率为 5 GHz 的 10 m 反射面天线为例进行仿真，分析对比高斯馈源和相控阵馈源的波束性能。

标准反射面天线和形变反射面天线的焦面场分布如图 7 所示。

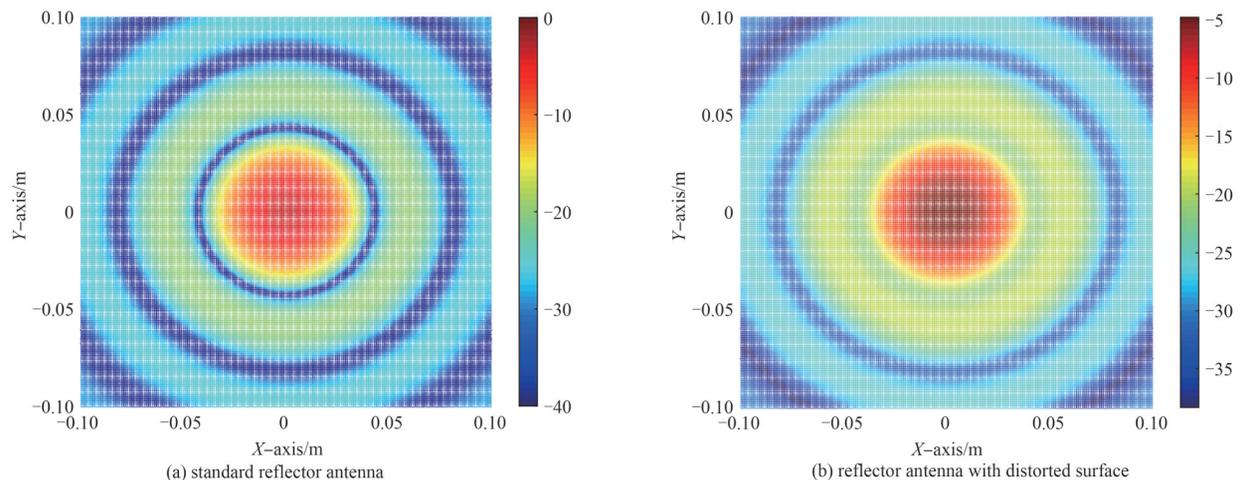


Fig.7 The focal plane field distribution of standard reflector antenna and reflector antenna with distorted surface

图7 标准反射面天线和形变反射面天线焦面场分布

从图 7 可以看出，天线的焦面场呈波纹状分布，越靠近中心，能量越聚集。天线发生形变时，天线的焦面场分布发生变化，由于设置的形变为中心对称形变，故焦面场没有出现散焦现象。

当用高斯馈源照射标准反射面天线时，天线方向图如图 8 所示，天线的增益为 53.26 dB，效率为 77.27%；当用相控阵馈源照射标准反射面天线(幅相补偿)时，天线方向图如图 9 所示，天线的增益为 53.81 dB，效率为 87.70%。

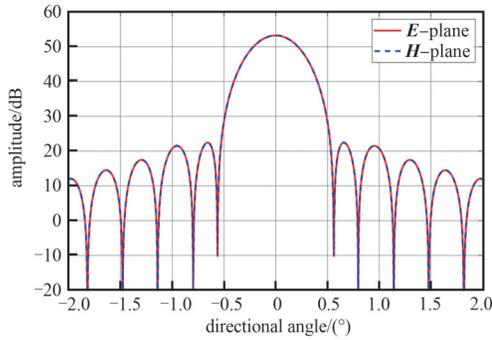


Fig.8 Performance of standard reflector antenna illuminated by Gaussian feed  
图 8 高斯馈源照射标准反射面天线性能

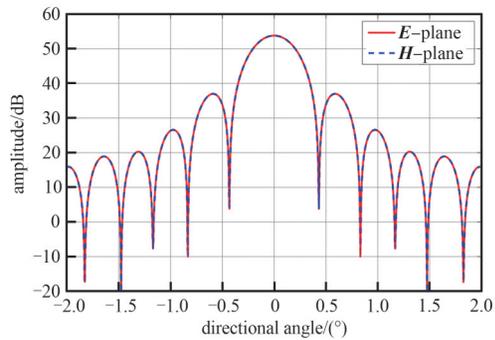


Fig.9 Performance of standard reflector antenna illuminated by phased array feed  
图 9 相控阵馈源照射标准反射面天线性能

当用高斯馈源照射形变天线时，天线方向图如图 10 所示，天线的增益为 49.88 dB，效率为 35.48%；当用相控阵馈源照射形变天线时(幅相补偿)，天线方向图如图 11 所示，天线的增益为 51.61 dB，效率为 52.84%。

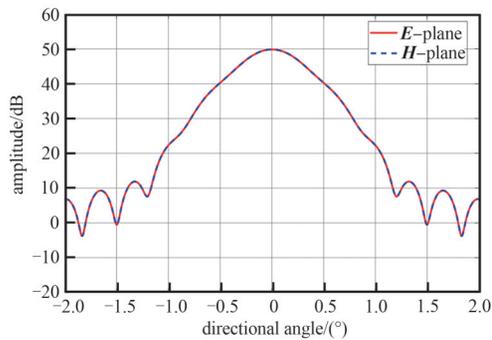


Fig.10 Performance of reflector antenna with distorted surface illuminated by Gaussian feed  
图 10 高斯馈源照射形变反射面天线性能

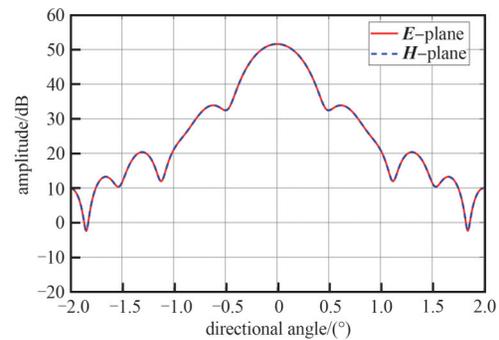


Fig.11 Performance of reflector antenna with distorted surface illuminated by phased array feed  
图 11 相控阵馈源照射形变反射面天线性能

相控阵馈源和高斯馈源性能对比如表 2 所示。可以看出，反射面形变导致天线增益和效率下降，通过相控阵馈源可以弥补馈源受重力和温度扰动的影响，提升天线的性能。

表 2 反射面形变时相控阵馈源和高斯馈源性能对比

Table2 Comparison of performance between phased array feed and Gaussian feed with reflective surface deformation		
	gain/dB	efficiency/%
the standard reflector antenna illuminated by Gaussian feed	53.26	77.27
the standard reflector antenna illuminated by phased array feed	53.81	87.70
the reflector antenna with distorted surface illuminated by Gaussian feed	49.88	35.48
the reflector antenna with distorted surface illuminated by phased array feed	51.61	52.84

### 3 结论

本文针对大型射电望远镜天线受重力、风和日照影响导致的馈源扰动和反射面形变的问题，将相控阵馈源与高斯馈源进行对比。仿真说明相控阵馈源可以补偿馈源扰动和反射面形变导致的幅相误差，纠正系统指向，提升系统性能。将相控阵馈源技术用于大型射电天文望远镜天线，可将传统的机械式形面调整转化为电子式调整，不仅节省了人力资源，还提高了系统的性能。此外相控阵馈源技术还可产生多个性能优良、交叠良好无盲区的波束，可扩大天线的视场，提高望远镜天线的巡天速度。此前仿真的相位误差均在一个波长内，超出一个波长的误差还需再进行研究。

## 参考文献:

- [1] 吴江,王博. 大型反射面天线轨道不平度对指向精确度的影响[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(4):634-639. (WU Jiang,WANG Bo. Influence of track irregularity on the pointing accuracy for large reflector antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(4):634-639.) doi:10.11805/TKYDA201704.0634.
- [2] 伍洋. 射电望远镜天线相控阵馈源技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013. (WU Yang. Research on phased array feed technology for radio telescope antennas[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2013.)
- [3] MA Jun,WU Yang,XIAO Song,et al. Design of the cryogenic system of the wideband phased array feed for QTT[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021,21(4):168-172. doi:10.1088/1674-4527/21/4/88.
- [4] XU Qian,WANG Na. Challenges for QTT structure[C]// SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation. United Kingdom:SPIE, 2016(34):63-69.
- [5] 段雪峰,王凯,宁云炜,等. 射电望远镜焦面场分析研究[J]. 微波学报, 2021,37(S1):97-100. (DUAN Xuefeng,WANG Kai,NING Yunwei,et al. Research on the focal field analysis of radio telescopes[J]. Journal of Microwave, 2021,37(S1):97-100.)

## 作者简介:

牛晟璞(1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为反射面天线与馈源 .email:niushengpu3527@163.com.

伍洋(1984-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为反射面天线与馈源.

孔德庆(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为天线组阵技术、深空通信和射电望远镜技术.

霍克强(1992-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为天线设计.