

LU Guang, WANG Bing, CHEN Yao, WU Ji, YAN Jingye, WU Zhao, YAN Fabao, WU Lin. Simulations of the Antenna-shielding Effect of the Daocheng Solar Radio Telescope (DSRT) (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(2): 294–305. DOI:10.11728/cjss2022.02.210202017

稻城太阳射电望远镜 (DSRT) 天线 遮挡效应仿真*

路 光¹ 王 冰¹ 陈 耀¹ 吴 季^{2,4}
阎敬业^{2,3,4} 武 昭¹ 严发宝¹ 武 林^{2,3,4}

1(山东大学空间科学研究院 威海 264209)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

3(空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

4(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 稻城太阳射电望远镜 (DSRT) 由 313 面 6 m 直径抛物面天线组成。天线接收信号幅值和相位的精确修正是决定 DSRT 成像质量的关键因素。然而 DSRT 阵列可能会出现邻近天线相互遮挡的问题, 从而改变接收信号的幅值和相位, 影响其成像质量。利用电磁仿真软件计算了接收频率为 300 MHz (波长 $\lambda=1$ m) 时的相邻两单元与相邻三单元两种情况。三元系统中遮挡效应的影响仅比二元系统中相关影响略为显著。在本文考虑的最严重的遮挡情况 (天线边缘的投影间距 $D = -1\lambda$) 下, 对于双/三元系统, 相对于单天线系统水平和垂直增益分别降低了 0.6/0.6 dB 和 0.3/0.4 dB, 相位偏差分别为 $-3.3^\circ/-3.871^\circ$ 和 $-1.744^\circ/-2.244^\circ$ 。此外还分析了其他遮挡情况。研究表明 DSRT 系统中的天线遮挡效应分析可由二元系统充分描述, 在后期数据处理时应适当考虑该效应, 尽量提升 DSRT 数据的利用效率和成图质量。

关键词 子午工程二期, 稻城太阳射电望远镜, 遮挡效应, 幅值, 相位

中图分类号 P161

Simulations of the Antenna-shielding Effect of the Daocheng Solar Radio Telescope (DSRT)

LU Guang¹ WANG Bing¹ CHEN Yao¹ WU Ji^{2,4} YAN Jingye^{2,3,4}
WU Zhao¹ YAN Fabao¹ WU Lin^{2,3,4}

1(Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209)

2(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(State Key Laboratory of Space Weather, Beijing 100190)

* 国家重大科技基础设施子午工程项目和中国科学院前沿科学重点研究项目 (QYZDY-SSW-JSC014) 共同资助

2021-02-02 收到原稿, 2021-10-29 收到修定稿

E-mail: yaochen@sdu.edu.cn

4(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

Abstract The Daocheng Solar Radio Telescope (DSRT) is a next-generation solar radio telescope funded by the Chinese Meridian Project–Phase II. DSRT is composed of 313 parabolic antennas with a diameter of six meters. The antennas are evenly distributed in a circle with a diameter of one kilometer. With the synthetic aperture imaging techniques, key factors determining the DSRT imaging quality are accurate calibrations of amplitude and phase of the received signals. Yet, under some circumstances, adjacent antennas of DSRT may shield each other, which will affects the amplitude and phase of the received signals and thus deteriorate imaging quality. In this study, such shielding effects of three- or two-antenna using the electromagnetic simulation software at frequencies of 300 MHz ($\lambda=1$ m) were simulated. The shielding effect in the three-antenna system is slightly worse than that in the two-antenna system. When the projected distance of adjacent antennas is taken to be $-\lambda$, *i.e.*, the most serious effect of shielding considered here, the horizontal and vertical gains of the system with two/three antennas decline by 0.6/0.6 dB and 0.3/0.4 dB, respectively, and the horizontal and vertical phase deviations are $-3.3^\circ/-3.871^\circ$ and $-1.744^\circ/-2.244^\circ$, respectively, compared to the system with one antenna. Other situations with different projected shielding distances are also investigated. The results show that the two-antenna system can sufficiently describe the shielding effect associated with DSRT. Such effect should be properly taken into account when processing the future DSRT data so as to improve the data usage efficiency and imaging quality.

Key words Meridional project-phase II, Daocheng Solar Radio Telescope (DSRT), Shielding effects, Amplitude, Phase

0 引言

太阳射电爆发是太阳射电辐射剧烈增强现象^[1,2], 与太阳耀斑、日冕物质抛射等能量剧烈释放过程密切相关, 携带着太阳爆发、激波演化、粒子加速和传播、电磁辐射机制等方面的物理信息, 可用于日冕参数和爆发过程的诊断、激波到达时间与高能粒子事件的预报等多方向研究及应用^[3-5]。目前已研究了太阳射电辐射流量计、动态频谱仪、日像仪等射电观测设备^[6-11]。其中, 日像仪是太阳射电观测设备中最复杂和庞大的设备, 基于综合孔径成像原理, 利用大规模天线阵接收太阳射电辐射信号, 可以得到射电辐射强度的空间二维分布 (图像) 及其随时间的变化过程^[12,13]。阵列中一定间距和方向的一对天线构成一个二元干涉仪, 对应于空间频率域 (u, v) 坐标矢量, 相应的平面称为 (u, v) 面。对天线接收射电信号的复相关函数代表天空射电源亮度分布在相应坐标点上的一个傅里叶分量。天线阵中天线两两组合, 测量出一组傅里叶分

量, 利用这些傅里叶分量可以反演天空射电源的亮度分布^[12]。

全球在运行的日像仪屈指可数, 主要包括工作于米波和分米波段的法国南茜日像仪 (Nancay Radioheliograph, NRH^[6]), 厘米波段的日本野边山日像 (Nobeyama Radioheliograph, NoRH^[9]), 工作于分米波和厘米波的明安图射电频谱日像仪 (Mingantu Spectral Radioheliograph, MUSER^[14]) 以及工作于厘米波段的西伯利亚日像仪 (Siberian Radio Heliograph, SSRH^[15])。日像仪的图像分辨率与物理口径、观测频率和观测时间有关。NRH 可以提供 10 个频点 (150 MHz、173 MHz、228 MHz、270 MHz、298 MHz、327 MHz、360 MHz、408 MHz、432 MHz 和 445 MHz) 的太阳图像, 夏至南北方向具备从约 $2'$ (445 MHz) 至约 $6'$ (150 MHz) 的最佳空间分辨率, 明显高于冬至时的相应分辨率。NoRH 可以提供 17 GHz 和 34 GHz 的太阳图像, 夏至南北方向空间分辨率分别约为 $10''$ 和 $5''$ 。MUSER 系统由低频和低频两个阵列组

成: MUSER-I 为分米波阵, 频率为 0.4~2.0 GHz, 夏至南北方向空间分辨率为 10.3"~51.3"; MUSER-II 为厘米波阵, 频率为 2.0~15 GHz, 夏至南北方向空间分辨率为 1.4"~10.3"。SRT 由三个阵列组成, 分别可以观测 3~6 GHz, 6~12 GHz 和 12~24 GHz 三个频段, 三个阵列在夏至南北方向的空间分辨率分别可以达到 15"、12" 和 6"。

作为中国空间天气领域的国家重大科技基础设施, 子午工程是跨区域的大型综合性空间环境地基监测网^[14, 16]。子午工程一期已于 2012 年 10 月竣工, 形成了基本的空间环境成链观测能力。子午工程二期于 2019 年开工建设, 计划 2023 年竣工, 将在东经 100°和北纬 40°两条观测链上部署 16 个台站、195 台(套)监测设备, 形成空间环境地基综合监测网。

为了满足高质量米波段太阳射电成像的观测需求, 子午工程二期计划于四川稻城县建设稻城太阳射电望远镜(DSRT), 观测日冕物质抛射(CME)的初发过程并跟踪其传播和演化, 为空间天气的科学研究和数值预报模型提供观测数据输入, 并与行星际闪烁望远镜(IPS)形成从太阳到行星际空间的观测链条^[17]。DSRT 阵列由 313 面均匀分布在直径 1 km 圆周上的 6 m 直径抛物面天线单元组成。如此多的天线及环形布局使得 uv 分布可以密集覆盖采样空间, 大大提高了太阳射电成像的质量, 包括系统的灵敏度和动态范围。DSRT 的空间分辨率约为 5'(150 MHz)~1.5'(450 MHz)。

DSRT 阵列中天线的平均间距约为 10 m。当太阳高度角较低时, 天线指向与大地夹角较小, 邻近天线间可能发生遮挡, 造成单元天线辐射增益和相位的变化, 影响成像质量。如果能够掌握天线遮挡效应规律, 可以在后期数据处理时进行数据补偿, 更有效地利用观测数据, 提高太阳射电图像质量。针对日像仪中天线遮挡效应对成像质量的影响分析, 特别是遮挡效应对日像仪天线单元增益和相位的影响分析, 目前尚无文献报道。已有相关研究多为通信天线遮挡效应方面的分析^[18, 19], 主要考虑对天线增益方向图的影响, 没有考虑遮挡对相位方向图的影响。

DSRT 中消除遮挡影响的一种便捷操作是直接去除可视遮挡的基线。然而该做法会造成基线数量下降, 影响成像质量。此外, 电磁遮挡效应与可视遮挡并不等同, 即使无可视遮挡, 若距离足够近也可能

影响幅值和相位。针对 DSRT 阵列中会发生天线遮挡的实际问题, 本文利用电磁仿真软件 CST 对 6 m 抛物面天线进行全尺寸建模和电磁仿真计算, 分别构造由两个单元和三个单元天线构成的模拟系统, 通过对增益方向图和相位方向图的定量分析, 得到不同遮挡情况对天线辐射性能的影响规律。

1 DSRT 遮挡效应分析及天线仿真计算

当天线指向与地面夹角过小时, DSRT 相邻天线之间可能会发生可视遮挡。图 1 给出了不同时刻天线的遮挡情况, 从图 1 中可以看到: 夏至日 16:00 LT 有 16 面天线被遮挡; 冬至日遮挡最为严重, 16:00 LT 有 122 面天线发生了遮挡。图 2 给出了不同时刻剔除 DSRT 遮挡基线后的 uv 分布, 从图 2 中可见, 剔除遮挡基线使得夏至日和冬至日 16:00 LT 时刻的 uv 覆盖出现较大空缺, 这会对系统成像质量造成较大影响。

研究利用电磁仿真软件 CST 对天线系统进行仿真, 采用自适应网格瞬态求解器可通过一次计算得到仿真器件在整个频带上的响应; 计算频率范围为 100~450 MHz, 采用开放边界条件, 有限元网格划分采用六面体网格, 单元网格大小为波长的 1/30, 利用时域求解器进行仿真计算。模型建好后, 在本实验室高性能运算平台上进行仿真计算。该平台搭载有两颗 26 核高性能处理器, 并装有两块 48 Gbit 仿真专用的运算加速卡。

参照 DSRT 参数指标要求, 设计了 6 m 直径的抛物面天线, 天线工作频率为 150~450 MHz, 抛物面天线的焦径比为 0.4, 天线馈源为双线极化对数周期天线, 对数周期天线主杆长度 120 cm, 每种极化包含 16 对振子。天线设计时, 通过多次仿真, 优化了馈源的摆放位置, 对数周期天线主杆的中心位置低于焦点 16 cm, 确保天线在 150~450 MHz 的频率范围内具有较好的辐射效率。图 3 所示为该天线馈源系统。

根据馈源安装形式, 定义阵子垂直于地面的对数周期天线为垂直极化(V)天线, 阵子平行于地面的对数周期天线为水平极化(H)天线, 后者所在平面为 0°切面, 垂直极化天线平面为 90°切面。为提高运算速度, 对天线模型进行了适当简化, 没有考虑转台结

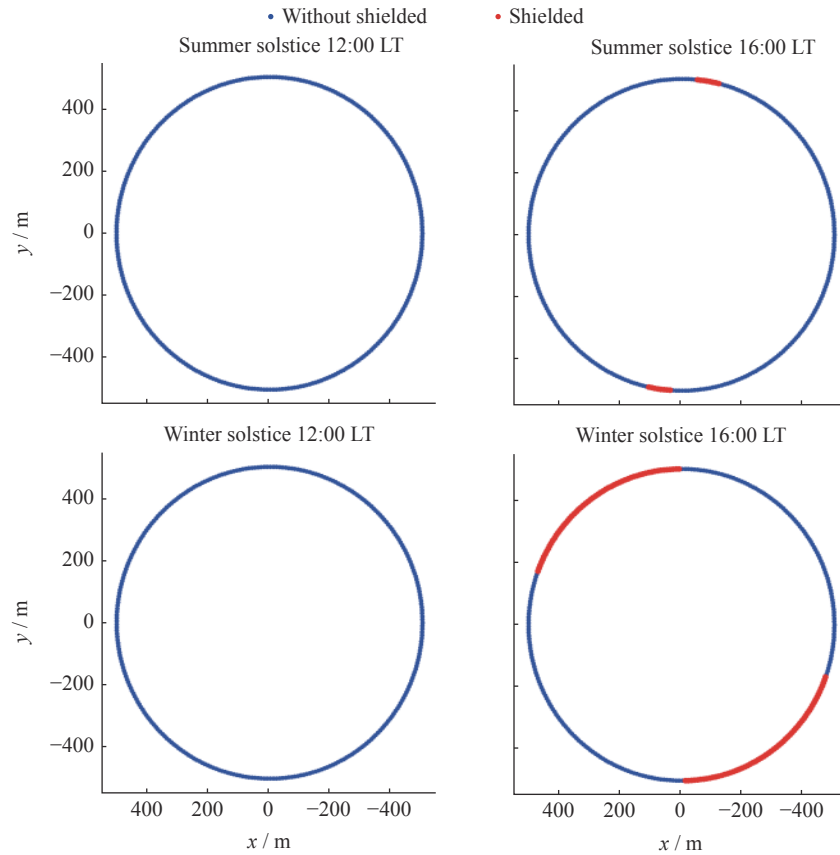


图 1 不同时刻 DSRT 中被遮挡天线位置分布 (蓝点为未遮挡天线位置, 红点为被遮挡天线位置)

Fig. 1 Distributions of antennas in the DSRT array at different local time (Blue and red dots represent unshielded and shielded antennas respectively)

构、实际地形地貌及大地反射的影响。在本工作研究期间, DSRT 方案 6 m 天线仍处于设计阶段, 该天线与山东大学槎山站的 6 m 抛物面天线非常类似, 均为前馈抛物面天线且都采用双线极化对数周期天线作为馈源, 观测频段相同。基于这些因素, 这里借鉴了山大槎山站 6 m 天线参数进行研究^[20]。

图 4 (a) 为仿真计算的天线回波损耗 (S_{11})。在 150~450 MHz 频率范围内, 水平极化(红线)和垂直极化(黑线)的 S_{11} 数值均小于 -10 dB。图 4 (b) 为仿真计算的天线主方向增益分布, 横轴为频率, 纵轴为主方向增益大小, 由于两种极化天线的尺寸和形式相同, 相同频点的增益也相同, 这里只取了一条曲线。随着工作频率增加, 天线增益由 12.2 dBi 单调增加至 25.8 dBi。

2 天线遮挡效应的影响

发生天线遮挡时, 接收信号的幅值和相位会受到

影响。对于综合孔径成像系统, 信号幅值和相位的精确修正是决定成像质量的关键, 也是本文重点关注的两个参数。为了解遮挡效应, 在 CST 软件中构建了包含两元和三元天线的仿真系统, 计算了观测频率为 300 MHz 时不同遮挡情况下天线的辐射增益和相位变化。

当射电频段电磁波的波长较长而两个天线间距较小时, 会产生近场耦合效应^[21], 同时金属反射面边缘产生的散射或绕射会产生菲涅尔效应, 也会影响接收信号的幅度和相位参数, 即便未被可视遮挡时, 接收信号也会受到一定程度的影响, 特别是与邻近天线的距离在一个波长之内时^[22]。这些影响被称为电磁遮挡效应。实际观测中也会出现涉及两个以上天线的遮挡情况。例如双天线系统中前方天线可能会被相邻天线遮挡, 通过耦合、散射和衍射等作用对被遮挡天线性能产生影响。因此, 这里构建了包含双元和三元天线的遮挡系统模型, 分别分析了两种情况中相

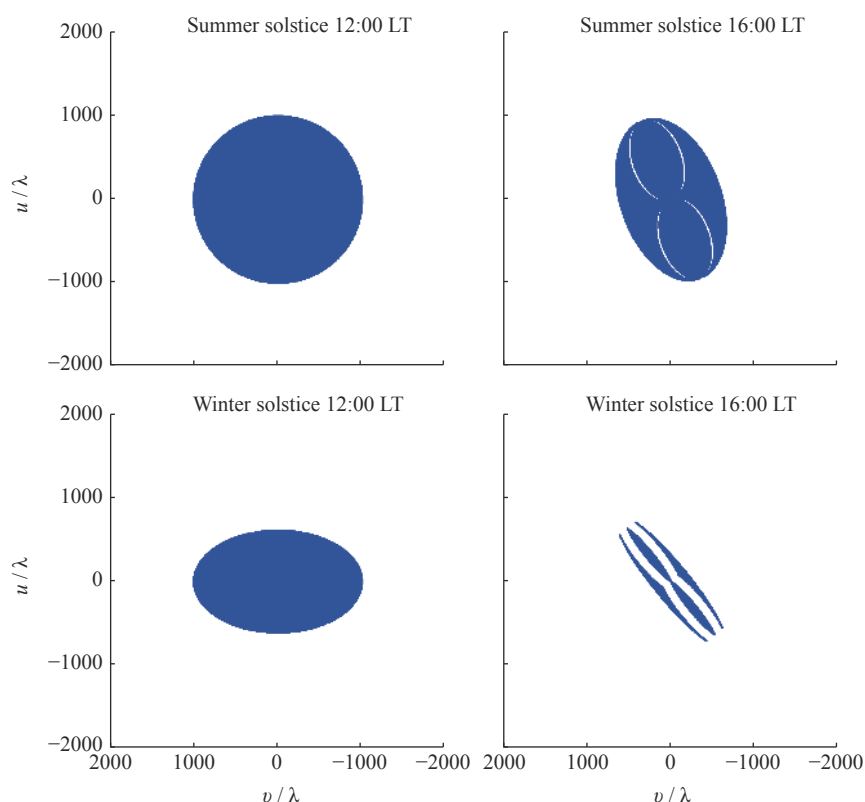
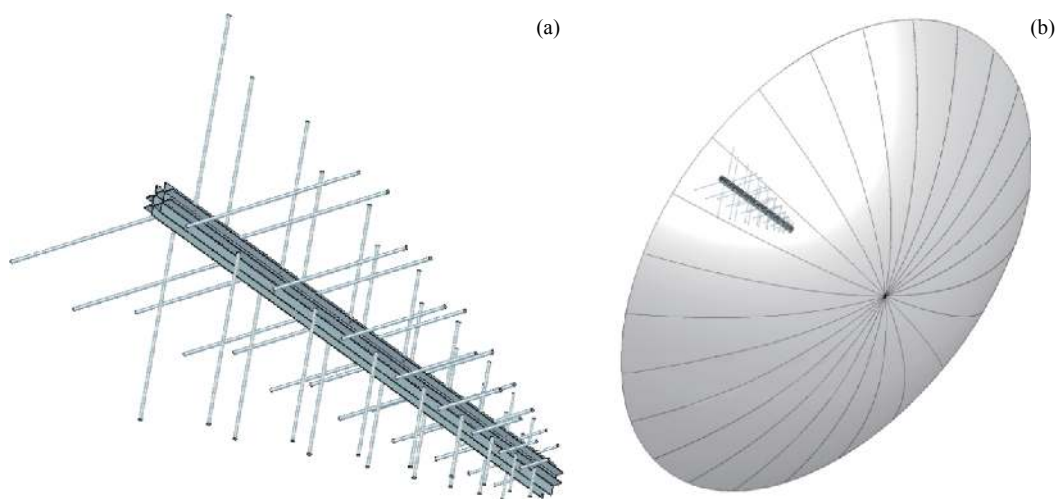
图2 不同时刻 DSRT 剔除可视遮挡基线的 uv 分布Fig. 2 uv excluding baselines consisting of shielded antennas

图3 双线极化对数周期天线馈源 (a) 和 6 m 抛物面天线结构 (b)

Fig. 3 Feed of the dual polarization log periodic antenna (a) and the 6-meter parabolic antenna (b)

邻两个天线边缘投影间距从间隔一个波长间距($D = 1\lambda$)到重叠(对应于可视遮挡)一个波长($D = -1\lambda$)时被遮挡天线的辐射增益和相位变化情况。本研究是针对 DSRT 圆环阵中天线遮挡效应的仿真分析,阵列中所有天线处于同一个水平位置,因此这里只分析了

水平方向遮挡效应。

二元系统结构如图 5 (a) (b) 所示,左侧为被遮挡(接收)天线。三元系统结构如图 5 (c) 所示。二元和三元系统中相邻两个抛物面天线的反射面顶点间距(L)固定为 10 m。在跟踪太阳观测过程中,相邻天

线边缘的投影间距 D 会发生变化, 当 $D \geq 0\lambda$ 时两个天线间不发生可视遮挡, 当 $D < 0\lambda$ 时发生可视遮挡。

以 300 MHz (波长 $\lambda=1$ m) 频率信号为例, 分析不同遮挡情况下接收天线辐射性能的变化。首先分析双元系统中的遮挡效应。图 6 和图 7 中红色实线为不同遮挡情况下水平极化和垂直极化增益方向图; 表 1 和表 2 列出了不同遮挡情况下的辐射性能对比。将 D 由 1λ 减小至 -1λ , 对应于两天线边缘的水平间距由间隔一个波长到重叠一个波长, 接收天线 (即被遮挡天线) 的主方向增益变化较小。当 $D \geq 0\lambda$, 天线的主方向增益保持在 23.8 dBi; 当 $D = -0.5\lambda$ 时, 水平极化和垂直极化均为 23.6 dBi, 减小了 0.2 dBi; 当 $D = -1\lambda$ 时, 水平极化为 23.2 dBi, 垂直极化为 23.5 dBi, 分别减小了 0.6 dBi 和 0.3 dBi; 可见 DSRT

中产生的水平方向遮挡对水平极化的影响大于垂直极化。虽然主方向增益变化不大, 但是方向图旁瓣数量逐渐增加, 指向逐渐发生偏移。当 $D \leq 0\lambda$ 时, 随着间距 D 逐渐变小, 天线的主波束指向偏离逐渐增大。当 $D = -0.5\lambda$ 和 1λ 时, 分别有 1.0° 和 1.5° 指向偏离。需要注意的是, 恰好无可视遮挡 ($D = 0\lambda$) 时两个天线的波束指向也发生了 0.5° 的偏移。

图 6 和图 7 中蓝色虚线为三元系统中不同遮挡情况下在 300 MHz 频率水平极化和垂直极化的增益方向图。当 $D \geq 0\lambda$ 时, 主方向增益保持在 23.8 dBi; 当发生 0.5λ 的遮挡时, 水平极化和垂直极化分别为 23.6 dBi 和 23.7 dBi, 分别减小了 0.2 dB 和 0.1 dB。当 $D = -1\lambda$ 时, 水平极化为 23.2 dBi, 垂直极化为 23.4 dBi, 分别减小了 0.6 dB 和 0.4 dB。虽然主方向

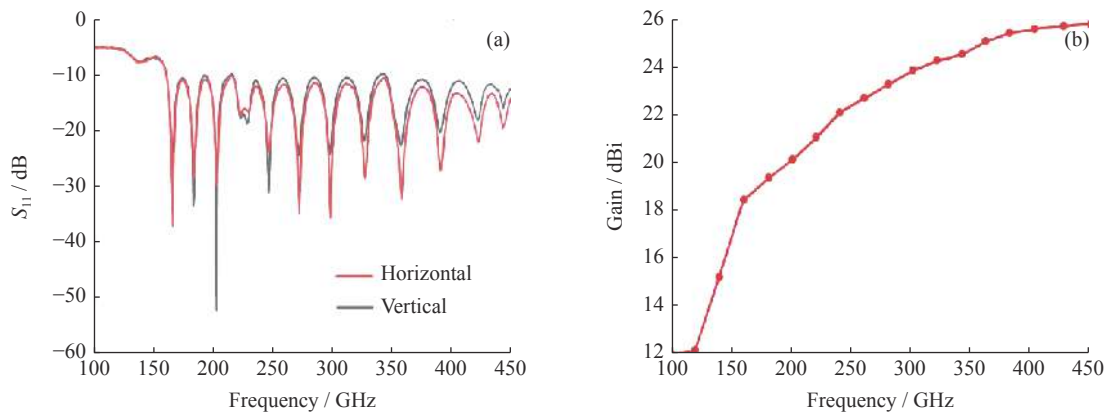


图 4 仿真计算的天线回波损耗 S_{11} (a) 及不同频率的天线主方向增益分布 (b)

Fig. 4 Return loss S_{11} of the simulated antenna (a) and antenna gain along the main direction at different frequencies (b)

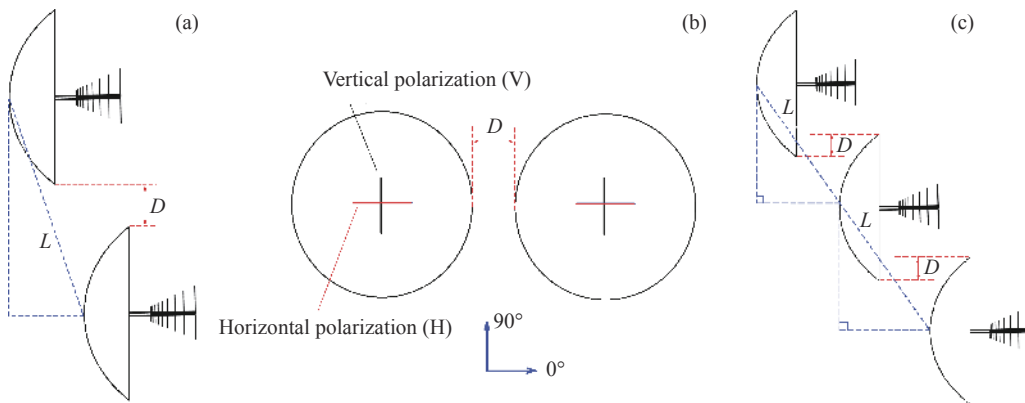


图 5 双元系统的侧视 (a) 前视 (b) 及三元系统俯视 (c) 图

Fig. 5 (a) Side view of the two-antennas system; (b) front view of the two-antenna system; (c) side view of the three-antenna system

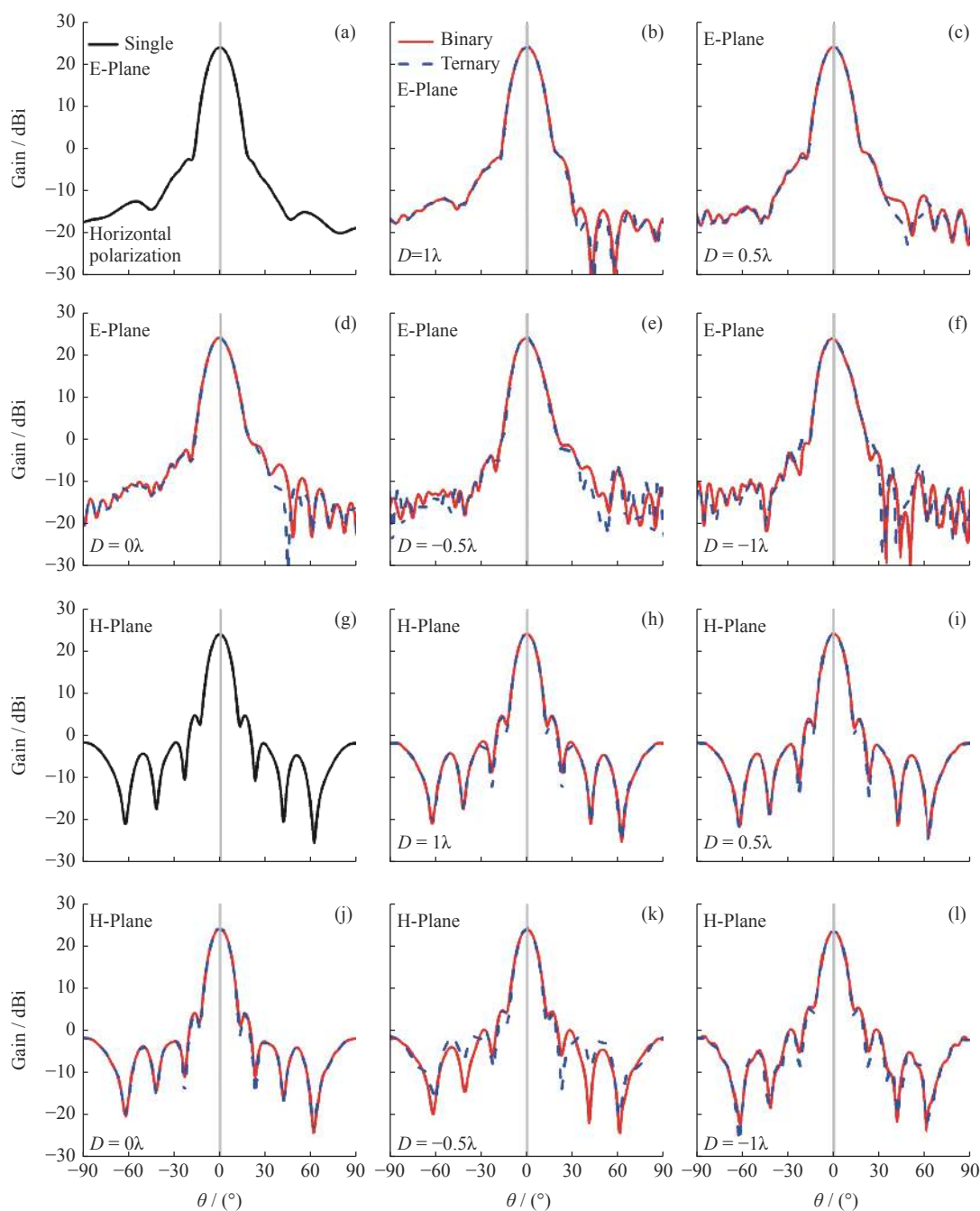


图6 仿真计算的单元、双元和三元系统中不同遮挡情况下水平极化接收天线在 300 MHz 频率的增益方向图 (灰色竖线表示单天线的主方向)

Fig. 6 Simulated gain pattern of the horizontal polarization at 300 MHz under different shielding conditions (The gray vertical line is the main direction of the single-antenna system)

增益变化不大,但是方向图旁瓣数量逐渐增加,指向逐渐发生偏离。随着水平间距逐渐变小,天线的主波束指向逐渐增大。当 $D=-0.5\lambda$ 和 -1λ 时,分别发生了 1.0° 和 1.5° 的指向偏移。当 $D=0.5\lambda$ 和 0λ 时,尽管天线之间没有产生可视遮挡,但是波束指向仍产生了约

0.5° 的偏离。

图 8 (a) (b) 为单天线和二元系统中不同遮挡情况下不同极化的相位方向图。随着两个天线水平间距减小,主波束内的相位变化较小,但旁瓣的相位变化幅度较大,遮挡效应主要影响旁瓣的相位。由于太

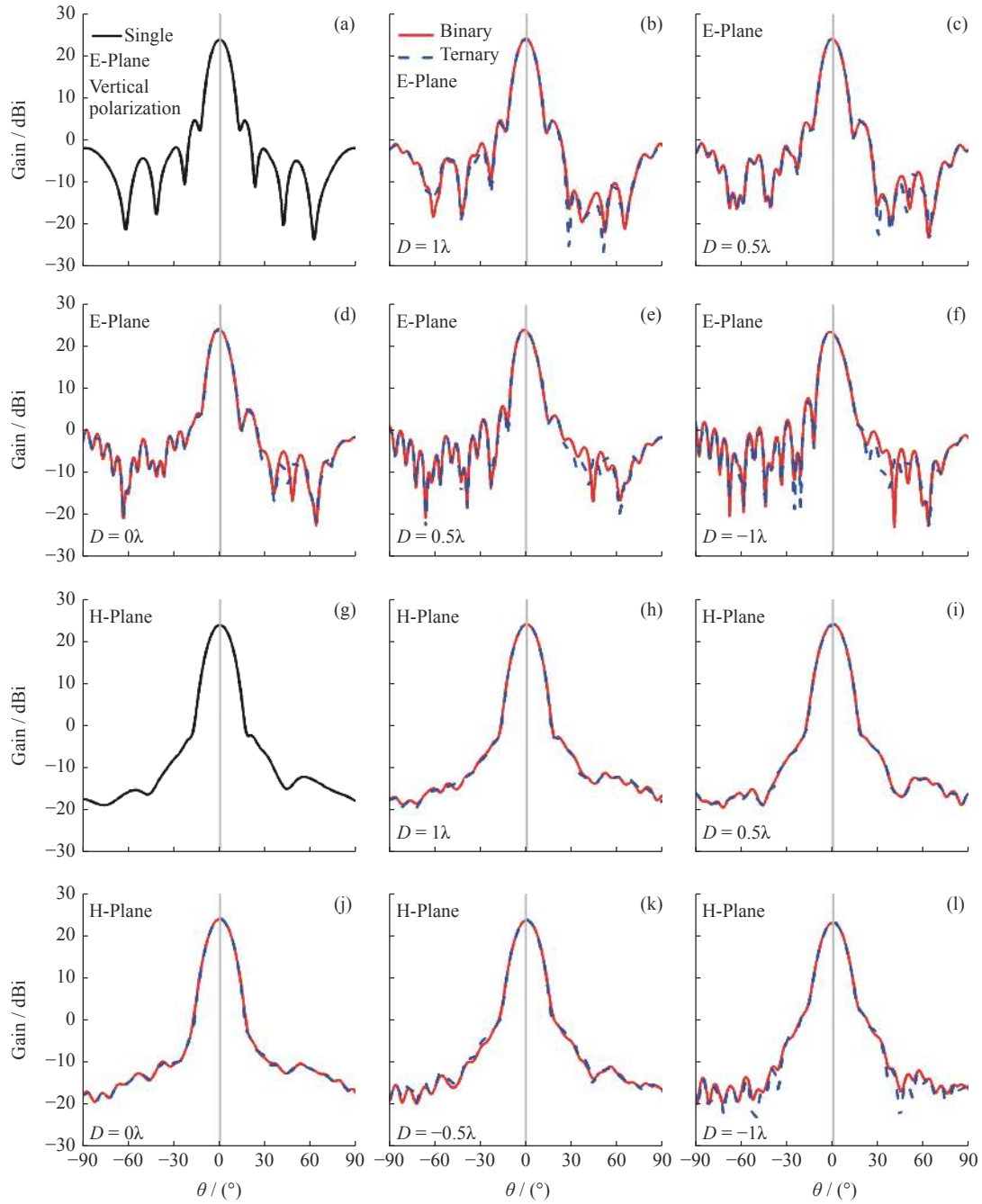


图 7 仿真计算的单元、双元和三元系统中不同遮挡情况下垂直极化接收天线在 300 MHz 频率的增益方向图 (灰色竖线表示单天线的主方向)

Fig. 7 Simulated gain pattern of the vertical polarization at 300 MHz under different shielding conditions (The gray vertical line is the main direction of the single-antenna system)

阳对地张角仅为 0.5° , 因此只需关注主波束内的相位变化。图 8 中实线给出了双元系统中窄角度范围内的相位方向图, 相位方向图的 θ 取值范围为 $\pm 5^\circ$ 。为方便对比, 将单天线的主方向相位设为 $\theta = 0^\circ$ 。接收天线的水平极化和垂直极化相对于单天线系统主方向相

位偏差分别定义为 $\Delta\phi_H$ 和 $\Delta\phi_V$ 。随着 D 由 1λ 减小至 -1λ , $\Delta\phi_H$ 由 -0.279° 变为 -3.3° , $\Delta\phi_V$ 则由 -0.079° 变为 -1.744° 。可见, 相同遮挡情况下水平极化的相位变化大于垂直极化。两个天线逐渐靠近时, 接收信号的相位平坦度逐渐恶化, E 面的相位变化幅度大于 H 面的

表 1 双/三元系统中不同遮挡情况水平极化接收天线的辐射性能比较

Table 1 Comparison of radiation characteristics of horizontal polarized antennas under different shielding conditions in the two/three-antenna system

	双/三元系统主方向增益/dBi	双/三元系统旁瓣水平/dB	双/三元系统主波束指向/(°)
单天线	23.8/23.8	19.0/19.0	0/0
$D=1\lambda$	23.8 /23.8	19.2/19.1	0/0
$D=0.5\lambda$	23.8/23.8	19.9/19.4	0/0.5
$D=0\lambda$	23.8/23.8	19.8/19.0	0.5/0.5
$D=-0.5\lambda$	23.6/23.6	17.0/18.7	1.0/1.0
$D=-1\lambda$	23.2/23.2	17.7/16.2	1.5/1.5

表 2 双/三元系统中不同遮挡情况垂直极化接收天线的辐射性能比较

Table 2 Comparison of radiation characteristics of vertical polarization under different shielding conditions in the system with two/three-antenna system

	双/三元系统主方向增益/dBi	双/三元系统旁瓣水平/dB	双/三元系统主波束指向/(°)
单天线	23.8/23.8	19.0/19.0	0/0
$D=1\lambda$	23.8/23.8	19.1/19.1	0/0
$D=0.5\lambda$	23.8/23.8	19.4/19.4	0/0.5
$D=0\lambda$	23.8/23.8	19.0/19.0	0.5/0.5
$D=-0.5\lambda$	23.6/23.7	17.9/18.7	1.0/1.0
$D=-1\lambda$	23.5/23.4	15.6/16.2	1.5/1.5

相位变化幅度。 D 分别为 1λ 、 0.5λ 、 0λ 、 -0.5λ 和 -1λ 时,太阳视角内($-0.5^\circ\sim 0.5^\circ$)水平极化相位变化幅度分别为 0.059° 、 0.125° 、 0.178° 、 0.353° 和 0.74° ,垂直极化相位变化幅度分别为 0.002° 、 0.057° 、 0.111° 、 0.152° 和 0.196° 。

图 8 (c) (d) 为仿真计算的单天线和三元系统在不同遮挡情况下不同极化的相位方向图,可见遮挡效应主要影响旁瓣的相位。图 9 中虚线给出了窄角度范围内的相位方向图。随着 D 由 1λ 减小到 -1λ ,水平极化相位偏差 $\Delta\phi_H$ 由 -0.309° 变为 -3.871° ,垂直极化相位偏差 $\Delta\phi_V$ 由 -0.093° 变为 -2.244° ,相同遮挡情况下水平极化的相位变化绝对值大于垂直极化。两个天线逐渐靠近时,接收信号的相位平坦度逐渐恶化,E面中的相位变化幅度大于H面。 D 分别为 1λ 、 0.5λ 、 0λ 、 -0.5λ 和 -1λ 时,太阳视角内($-0.5^\circ\sim 0.5^\circ$)水平极化相位变化幅度分别为 0.072° 、 0.119° 、 0.132° 、 0.528° 和 0.767° ,垂直极化相位变化幅度分别为 0.064° 、 0.078° 、 0.116° 、 0.204° 和 0.223° 。

根据上述计算结果分析,随着遮挡距离 D 的减

小,三元系统的相位变化与二元系统的变化趋势相同。在这里考虑的最严重遮挡情况下($D=-1\lambda$),双元/三元系统相对于单天线系统的水平和垂直增益分别降低了 $0.6/0.6$ dB和 $0.3/0.4$ dB,相位偏差 $\Delta\phi_H$ 和 $\Delta\phi_V$ 分别为 $-3.3^\circ/-3.871^\circ$ 和 $-1.744^\circ/-2.244^\circ$ 。随着参与遮挡的天线数量增加,天线之间的折射、散射和衍射等相互干扰效应增强,使得相同遮挡距离条件下三元系统中辐射相位变化(与单天线系统相比)略大于二元系统中的相应数值。不同间距遮挡下接收天线的主方向相位比较见表 3。

3 结论与讨论

稻城太阳射电望远镜(DSRT)是国家重大科技专项子午工程二期计划建设的新一代太阳专用射电望远镜,系统通过综合孔径原理成像,天线接收信号幅度和相位的精确修正是决定成像质量的关键因素。根据 DSRT 的天线设计和排布方式,针对 DSRT 低仰角观测中会发生天线遮挡的问题,通过全尺寸电磁

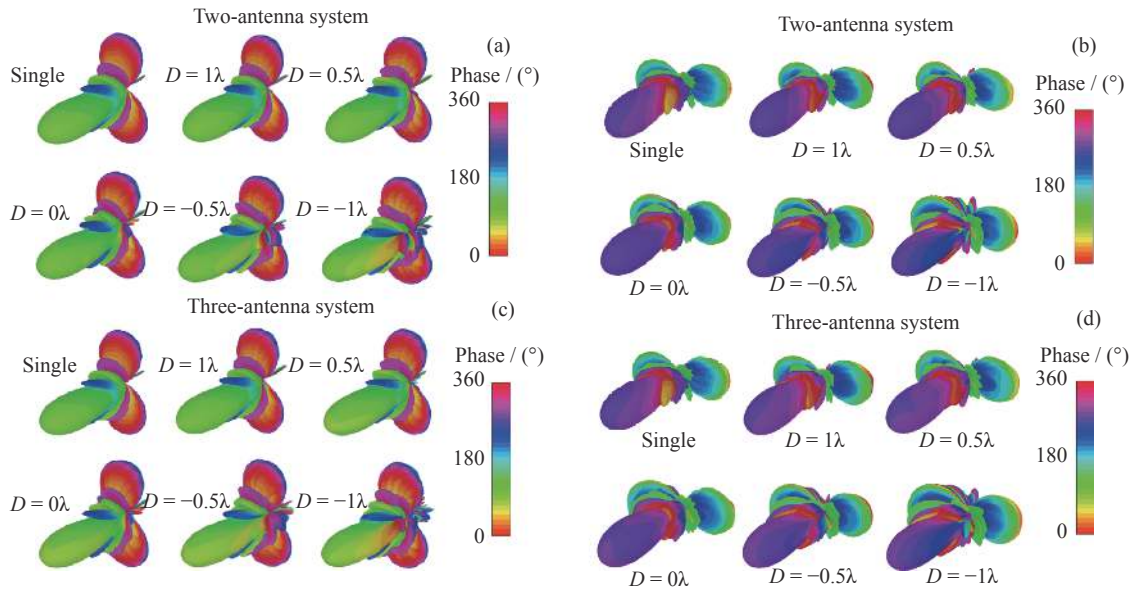


图 8 仿真计算的单元、双元和三元系统中不同遮挡情况下水平极化 (a)(b) 和垂直极化 (b)(d) 的相位方向图

Fig. 8 Simulated phase patterns of (a)(c) horizontal polarization and (b)(d) vertical polarization under different shielding conditions

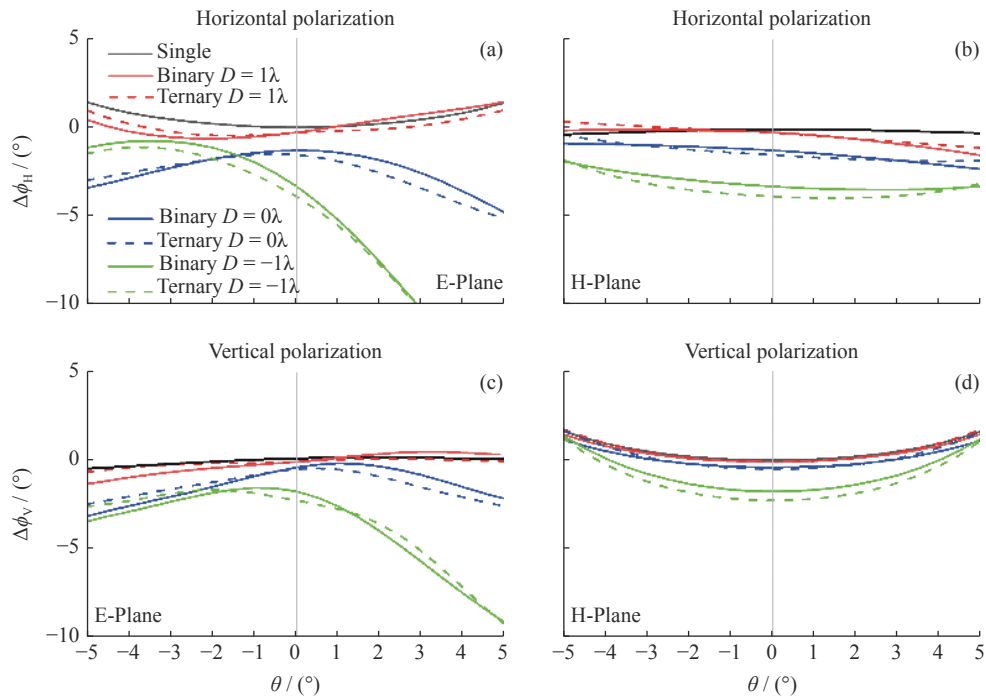


图 9 二元 (实线) 和三元 (虚线) 系统中, 不同遮挡情况下接收天线的辐射相位

Fig. 9 Radiation phase of receiving antenna under different shielding conditions in the two-antenna system (solid line) and three-antenna system (dotted line)

仿真, 计算了不同遮挡情况下天线辐射增益和相位的变化规律。相关研究可为 DSRT 后期成像算法中的天线补偿提供参考, 有利于增加可用基线数量、提高

观测数据的使用效率和成图质量。

分别计算了两元和三元系统中天线遮挡效应的影响, 针对不同遮挡条件进行了仿真计算, 三元系统

表 3 双/三元系统中不同间距遮挡下接收天线的主方向相位比较
Table 3 Comparison of radiation phase along the main direction of the receiving antenna under different shielding distance in the two/three-antenna system

主方向相位变化	双/三元系统水平极化/(°)	双/三元系统垂直极化/(°)
单天线	0/0	0/0
$D=1\lambda$	-0.279/-0.309	-0.079/-0.093
$D=0.5\lambda$	-0.767/-0.819	-0.089/-0.137
$D=0\lambda$	-1.289/-1.545	-0.393/-0.490
$D=-0.5\lambda$	-1.983/-2.096	-1.085/-0.490
$D=-1\lambda$	-3.300/-3.871	-1.744/-2.244

中的幅值和相位变化与双元系统的变化趋势基本相同,前者幅值和相位的偏差数值略大于后者,仿真结果接近。进一步增加天线个数,由于新增天线与接收天线水平距离较远,新增天线带来的遮挡效应已不明显,因此进一步增加天线数量引起的影响会更小,DSRT 系统中的天线遮挡效应分析可由双元系统描述。此外,进一步增加天线数量,会使得仿真模型过于庞大,占用更多计算资源,但不会显著改变仿真结果。

重点关注天线遮挡对接收信号幅值和相位的影响。当天线之间不发生可视遮挡时,主方向增益保持在 23.8 dBi。当天线之间发生可视遮挡时,随着遮挡间距 D 的减小,增益逐渐降低,DSRT 中产生的水平方向遮挡对水平极化的影响大于垂直极化。当发生一个波长的可视遮挡时($D=-1\lambda$),双元和三元系统中水平极化天线增益均下降 0.6 dBi,相对于单天线系统的主方向相位偏差分别为 -3.3° 和 -3.87° ,太阳视角内相位变化幅度分别为 0.747° 和 0.767° 。当天线之间未发生可视遮挡($D\geq 0\lambda$)时,接收信号的幅值均为 23.8 dBi,但相位会因电磁遮挡效应而产生一定偏差,例如 $D=0\lambda$ 时,相应的相位偏差分别为 -1.289° 和 -1.545° ,太阳视角内相位变化幅度分别为 0.178° 和 0.132° ;间隔一个波长($D=1\lambda$)时,双元和三元系统的相位偏差分别为 -0.279° 和 -0.309° ,太阳视角内相位变化幅度分别为 0.059° 和 0.072° 。

当遮挡效应对天线增益和相位的影响较小时,例如主方向增益偏差小于 $1\sim 2$ dB 而相位偏差小于 $5^\circ\sim 10^\circ$ 时,相应的偏差可通过后期数据补偿校正,从而提升 DSRT 数据的利用效率和成像质量。需要注意的是,对于未发生可视遮挡的电磁遮挡情况,也应根据实际影响适当考虑幅值和相位补偿。根据本文

研究,在遮挡间距小于 1 个波长($D\geq 1\lambda$)时,遮挡效应对接收信号的影响均在上述范围内,受到的影响是可以通过后期数据处理进行校正的。

以上仿真研究对双元和三元系统遮挡模型进行了适当简化。下一步工作中,需考虑转台结构、实际地形地貌及大地反射等环境变量,更加真实反映 DSRT 中天线遮挡带来的增益和相位偏差等影响。另外,本文仅研究了 300 MHz 频率的遮挡效应,而 DSRT 的观测频率为 150~450 MHz,后续工作还应分析 DSRT 工作频段中其他频率的情况。

参考文献

- [1] MCLEAN D J. Metre-wave solar radio bursts[M]// Solar Radiophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 1985
- [2] WILD J P, SMERD S F, WEISS A A. Solar bursts[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1963, 1: 291-366
- [3] FENG S W, CHEN Y, KONG X L, et al. Radio signatures of coronal-mass-ejection-streamer interaction and source diagnostics of type II Radio Burst[J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 753(1): 21
- [4] CHEN Y, DU G H, FENG L, et al. A solar type II radio burst from coronal mass ejection-coronal ray interaction: simultaneous radio and extreme ultraviolet imaging[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 787(1): 59
- [5] FENG S W, CHEN Y, KONG X L, et al. Diagnostics on the source properties of a type II radio burst with spectral bumps[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, 767(1): 29
- [6] ALAIN K, JEANMARC D. The nancay radioheliograph[J]. *Coronal Physics from Radio and Space Observations*, 1997, 483: 192-201
- [7] GRECHNEV V V, LESOVOI S V, SMOLKOV G Y, et al. The Siberian solar radio telescope: the current state of the instrument, observations, and data[J]. *Solar Physics*,

- 2003, **216**(1/2): 239-272
- [8] XU L, YAN Y H, MA L, *et al.* Image processing for synthesis imaging of Mingantu Spectral Radioheliograph (MUSER)[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, **77**(16): 20937-20954
- [9] NAKAJIMA H, NISHIO M, ENOME S, *et al.* The Nobeyama radioheliograph[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1994, **82**(5): 705-713
- [10] DU Qingfu, CHENG Renjun, CHEN Changshuo, *et al.* A compensation method for the consistency of multi-channel mixing circuit for solar radio observation system[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, **49**(8): 901-909 (杜清府, 程仁君, 陈昌硕, 等. 太阳射电观测系统多通道变频电路一致性补偿方法与实现[J]. *中国科学:技术科学*, 2019, **49**(8): 901-909)
- [11] XU Ke, SHANG Ziqian, YAN Fabao, *et al.* Compensation method of signal flatness for a broadband solar millimeter radio observation system[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2021, **51**(1): 413-423 (徐珂, 尚自乾, 严发宝, 等. 毫米波宽带太阳射电观测系统的信号平坦度补偿方法[J]. *中国科学:技术科学*, 2021, **51**(1): 413-423)
- [12] THOMPSON A R, MORAN J M, SWENSON JR G W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy[M]. New York: John Wiley & Sons, 2008
- [13] ROHLFS K, WILSON T L. Tools of Radio Astronomy[M]. JIANG Biwei, trans. Beijing: Beijing Normal University Press, 2008 (ROHLFS K, WILSON T L. 射电天文工具[M]. 姜碧涛, 译. 北京: 北京师范大学出版社, 2008)
- [14] YAN Yihua, CHEN Linjie, TAN Baolin, *et al.* Radioheliograph array for the solar atmospheric dynamics[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, **49**(5): 059608 (颜毅华, 陈林杰, 谭宝林, 等. 太阳大气等离子体动力学射电成像探测系统[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2019, **49**(5): 059608)
- [15] SERGEY L, ALEXANDER A, ALEKSEY K, *et al.* Siberian Radioheliograph: first results[J]. *Solar-Terrestrial Physics*, 2017, **3**(1): 3-18
- [16] WANG C. Development of the Chinese meridian project[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2010, **30**(4): 382-384
- [17] WANG C. Recent advances in observation and research of the Chinese Meridian Project[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(5): 640-649
- [18] WANG Tiange, MA Qian, OU Gangqiang. Research on blocking problems of the satellite antenna of warships[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, **39**(6): 76-78 (王添鸽, 马迁, 欧刚强. 舰艇卫星通信天线遮挡问题研究[J]. *舰船电子工程*, 2019, **39**(6): 76-78)
- [19] WANG Guomin, GU Xiaopeng, QIU kai. Effects of airborne-antenna blocking angle on air-grounding communication[J]. *Communications Technology*, 2016, **49**(12): 1724-1727 (王国民, 谷晓鹏, 邱恺. 机载天线遮挡角在地空通信中的影响探析[J]. *通信技术*, 2016, **49**(12): 1724-1727)
- [20] FENG S W, CHEN Y, LI C Y, *et al.* Harmonics of solar radio spikes at metric wavelengths[J]. *Solar Physics*, 2018, **293**(3): 39
- [21] STUTZMAN W L, THIELE G A. Antenna Theory and Design[M]. 2 nd ed. New York: Wiley, 1998
- [22] SONG Dong'an, YI Xueqin, WEN Ding. Experimental study of shaded effectiveness of plates[J]. *Ship Science and Technology*, 2010, **32**(9): 76-79 (宋东安, 易学勤, 温定娥. 金属挡板遮挡效应试验[J]. *舰船科学技术*, 2010, **32**(9): 76-79)

(责任编辑: 宋雅娜)