

曹锐, 卢保军, 郭肖肖, 等. 一种应用于平方公里中频阵的锥削槽天线阵的设计[J]. 电波科学学报, 2019, 34(3): 363-370. DOI: 10.13443/j.cjors.2018111903

CAO R, LU B J, GUO X X, et al. Tapered slot antenna array for mid-frequency aperture array of the Square Kilometer Array [J]. Chinese journal of radio science, 2019, 34(3): 363-370. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2018111903

一种应用于平方公里中频阵的锥削槽天线阵的设计

曹锐¹ 卢保军^{1,2} 郭肖肖² 桑磊²

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室, 合肥 230088;

2. 合肥工业大学, 合肥 230009)

摘要 设计了一种应用于平方公里中频孔径阵列的双极化超宽带锥削槽天线。该天线采用五边形谐振腔代替传统锥削槽天线的正方形谐振腔,在不占用有源电路面积的情况下,拓展了低频工作带宽;采用辐射板与馈电巴伦分离设计,在不影响天线电性能的前提下,极大地缩小了介质板尺寸以节约加工成本;天线加工成十字形结构以实现阵元间良好的电流连续性和不恶化天线的极化性能。仿真结果显示,该天线能够在0.25~1.57 GHz带宽内进行 $\pm 45^\circ$ 扫描,且在整个工作频带内具备较好的极化特性,因此所设计天线能够满足平方公里(the Square Kilometer Array, SKA)中频阵超宽带、低成本、大扫描角以及高极化隔离度的要求。

关键词 平方公里阵;中频孔径阵列;双极化;五边形谐振腔;十字形结构

中图分类号 TN821+.8

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2019)03-0363-08

DOI 10.13443/j.cjors.2018111903

Tapered slot antenna array for mid-frequency aperture array of the Square Kilometer Array

CAO Rui¹ LU Baojun^{1,2} GUO Xiaoxiao² SANG Lei²

(1. Key Lab of Aperture Array and Space Application, No. 38 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China; 2. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract A dual-polarized ultra-wideband tapered slot antenna for a square kilometer Intermediate frequency aperture array is designed. The antenna adopts a pentagon resonator instead of the square cavity of the conventional tapered slot antenna, and expands the low-frequency working bandwidth without occupying the active circuit area. The antenna adopts a pentagon resonator instead of the square cavity of the conventional tapered slot antenna, and expands the low-frequency working bandwidth without occupying the active circuit area. The radiant panel and the feed balun are separated designed, thus, the size of the dielectric plate can be greatly reduced to save processing cost, and the electrical performance of the antenna can be maintained. The antenna is processed into a cross-shaped structure to achieve good current continuity in the array elements and not deteriorate the polarization performance of the antenna. The simulation results show that the antenna can scan in the bandwidth of 0.25—1.57 GHz and has better polarization characteristics in the whole working frequency band. Therefore, the design of antenna can fulfill the requirements of the Square Kilometer Array (SKA) in the ultra-wideband intermediate frequency, low cost, large scan angle and high polarization isolation.

收稿日期: 2018-11-19

资助项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFE0100500)

联系人: 曹锐 E-mail: cet38caorui@126.com

Keywords the Square Kilometer Array; mid-frequency aperture array; dual-polarized; pentagon resonator; cross-shaped structure

引 言

平方公里阵(the Square Kilometer Array, SKA)是国际无线电科学联盟自 1991 年起一直设计和开发的具有比目前天文设备灵敏度大两个数量级的最大综合孔径射电望远镜,计划由分布在 3 000 公里范围内的约 2 500 面 15 m 口径碟型天线、250 个直径约 60 m 的致密孔径阵列,以及 100 万个对数周期天线组成的稀疏孔径阵列组成,接收面积约 1 平方公里^[1-3]. 作为新一代射电望远镜,SKA 将致力于回答宇宙最基本的问题,如:宇宙性质、年龄、历史等基本属性;恒星及星系形成与发展;不同尺寸的黑洞的产生与演变等^[1]. SKA 中频孔径阵列(mid-frequency aperture array, MFAA)的设计工作,计划于 SKA 建设的第 2 阶段进行部署,其关键性科学目标是研究暗能量对宇宙的影响以及对脉冲星和其他无线电瞬态事件进行高速测量,因此设计低成本、超宽带以及大扫描角的超宽带阵列天线以满足高灵敏度射电望远镜的技术要求是必要的.

目前,国外已经有了一些应用于 MFAA 的验证系统,如:EMBRACE^[4-5](electronic multi-beam radio astronomy concept)能够在 0.3~1.33 GHz(电压驻波比(voltage standing wave ratio, VSWR) < 2.35, 4.43:1 倍频程)频率范围内±45°扫描. 然而其为了保证阵元间良好的电流连续性所采用的“W”型阵元布局在一定程度上恶化了阵列的极化性能^[6];曼彻斯特大学在 2011 年提出将八角环阵列天线(octagonal ring antenna, ORA)^[7]应用于 SKA 中频阵,其优点在于剖面较低,但其在扫描状态下的工作带宽仅有 3.43:1 倍频程(VSWR < 3);2016 年南非斯坦陵布什大学提出了采用双极化偶极子致密阵(dense dipole array, DDA)^[8]应用于 MFAA,但文献中阵列天线在侧射方向时的工作带宽为 700~1 500 MHz,远不能满足 SKA 中频阵的要求,此外文献中并未给出扫描状态下的 VSWR,因此采用紧耦合偶极子阵列天线应用于 MFAA 也仅仅是提供了一种新的思路. 近年来,国内的 SKA 科学研究队伍已经初具规模,目前有中国电子科技集团公司第 38 研究所^[2]、中国电子科技集团公司第 54 研究所、中国科学院国家天文台、中国科学院上海天文台以及上海交通大学^[9-10]等数 10 支队伍参与到核心技术的研究. 然而相比于国外,国内关于 SKA 核心技

术的研究起步较晚,且大部分精力主要集中于低频阵,因此国内关于 MFAA 的研究以及公开发表的论文相对较少.

锥形槽天线(tapered slot antenna, TSA)由于具有宽频带、稳定的增益、对称的 E、H 面方向图以及易与有源电路集成等优点,被广泛应用于超宽带通信、射电天文和军用雷达等领域. 因此本文基于射电望远镜的技术要求,研究并设计了一种能够在 6.28:1 倍频程内进行±45°扫描的双极化超宽带 TSA 阵应用于 MFAA,且该天线在整个工作频带内具备稳定的方向图和较好的极化特性. 此外,该天线还具有噪声小、成本低以及物理强度高优点,能够满足 SKA 中频阵超宽带、低成本、大扫描角以及高极化隔离度的要求.

1 天线的仿真分析

1.1 天线阵元的设计

为了满足天文学科学目标对射电天文设备灵敏度的要求,SKA 中频阵的天线有效接收口径 A_e 和天线系统噪声 T_{sys} 需要满足 $A_e/T_{sys} > 10^4 \text{ m}^2/\text{K}$,因此较大的系统噪声对应了较大的接收口径,进而增大了系统的成本^[1]. 通常系统噪声为 50~100 K,即 SKA 中频阵验证系统的天线接收口径尺寸 $\geq 20\lambda \times 20\lambda$,因此可采用基于 Floquet 模无限周期边界条件的单位元胞方法设计天线阵元^[4],表 1 给出了 MFAA 天线的设计指标和要求.

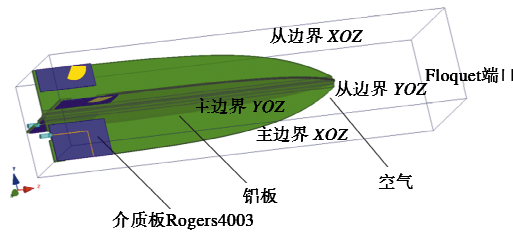
表 1 MFAA 天线设计指标

Tab. 1 Target design parameters for the MFAA phased array antenna

参数	指标
频带/MHz	300~1 500
扫描角/(°)	-40~+40
前后比/dB	-10
输入阻抗/ Ω	75
驻波	<3
极化	双极化

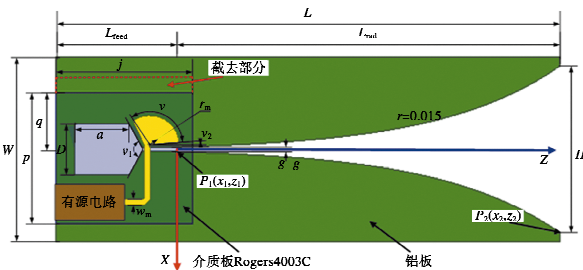
图 1(a)所示为无限阵列中的单位元胞,即是双极化阵列的最小可重复结构. 为了避免天线阵列宽角扫描时方向图出现栅瓣以及由平行板模引起阻抗异常现象^[11],选取天线阵元间距 D 略大于 $\lambda_H/2$, λ_H 为最高频率在自由空间中的波长. TSA 阵元结构

示意图如图1(b)所示,天线阵元分为馈电区域和辐射区域两部分:馈电部分采用简单的 $75\ \Omega$ 微带线耦合馈电结构,以便于与有源电路中第一级低噪声放大器实现最小噪声的阻抗匹配^[4]. 所用介质基板为 Rogers4003C ($\epsilon_r = 3.38$),介质板厚度 $t_{\text{sub}} = 0.81\ \text{mm}$.



(a) 单元仿真模型

(a) Simulation model of the unit cell



(b) 尺寸示意图

(b) Size diagram

图1 双极化 TSA 阵元结构示意图

Fig. 1 Geometry of dual-polarization TSA element

为了兼顾拓展天线的低频工作带宽和不占用有源电路面积的目的,使用五边形槽线谐振腔替代了传统 TSA 的矩形槽线谐振腔^[4],由图2所示矩形和五边形槽线谐振腔驻波比可以看到:改用五边形槽线谐振腔既起到了减小占用有源电路面积同时驻波又并未恶化,另外还增大了扇形枝节的开口角度;通过调节五边形谐振腔的长度 a 、宽度 D 以及张口角度 v_1 ,充分利用了微带线开路枝节与槽线短路终端之间的互耦,使其对转换巴伦的性能产生有益的影响^[12]. 考虑到无源器件的插损将增大接收系统的整体噪声,选取馈电巴伦与辐射片分离设计的结构去取代在双面敷铜介质板上蚀刻槽线的传统 TSA 结构,以实现减小天线接收口径和降低介质板材料使用成本的双重目的. 此外,为了进一步节约介质

板材料积,在不影响天线电性能的前提下,在扇形巴伦一侧截去了部分介质板,如图1(b)中红色虚线所示. 厚度为 $2\ \text{mm}$ 的铝板同时充当着微带馈线的地板和天线辐射板的作用. 辐射区域的渐变槽线由图1(b)中 $P_1(x_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, z_2)$ 两点以及槽线渐变率 r 决定,其中 $P_1(0.15, 0)$, $P_2(50, 286)$, $r = 0.015$ 满足

$$x = c_1 e^{rz} + c_2. \quad (1)$$

$$\text{式中: } c_1 = \frac{x_2 - x_1}{e^{rz_2} - e^{rz_1}}; c_2 = \frac{x_1 e^{rz_2} - x_2 e^{rz_1}}{e^{rz_2} - e^{rz_1}}.$$

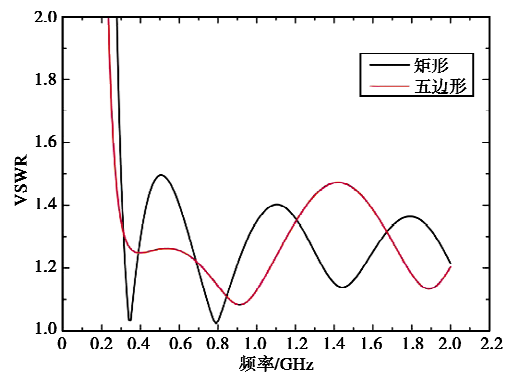


图2 传统矩形槽线与五边形槽线谐振腔的驻波对比

Fig. 2 Standing wave comparison between traditional rectangular groove line and pentagonal cavity

在不扫描情况下,优化天线参数,最终优化得到的阵元详细尺寸见表2所列. 仿真得到的阵元驻波系数如图3所示. 可以看出,所设计阵元在扫描角度为 0° , XOZ 面 45° 以及 YOZ 面 45° 时, $VSWR < 2.14$ 的带宽分别为 $0.22 \sim 1.76\ \text{GHz}$, $0.25 \sim 1.57\ \text{GHz}$, $0.24 \sim 1.66\ \text{GHz}$,能够满足 SKA 中频阵的带宽要求.

图4所示为天线单元在 0.3 、 0.9 、 $1.5\ \text{GHz}$ 的单元方向图. 可以看到:在各频点天线单元具备较宽的半功率波瓣宽度;天线的交叉极化随频率的增高成下降的趋势,在 $1.5\ \text{GHz}$ 时,其交叉极化仍小于 $60\ \text{dB}$,即在整个工作频带内,天线具有较低的交叉极化. 其中,本文所设计的双极化 TSA 阵元是由两个同是水平极化的 TSA 相互垂直拼接而成,所以我们给出的主极化是单个 TSA 的水平极化性能. 交叉极化说明两个水平极化拼接后各个极化性能依然良好,最后得出双极化 TSA 阵元的极化性能良好.

表2 TSA 阵元参数

Tab. 2 TSA element parameter

参数	数值	参数	数值
W/mm	104	r_m/mm	16
p/mm	66	g/mm	1.7
q/mm	25	H/mm	100
D/mm	30	$v/(^{\circ})$	120
w_m/mm	0.91	a/mm	30
$L_{\text{feed}}/\text{mm}$	54	j/mm	65
L/mm	340	$v_0/(^{\circ})$	5
L_{rad}/mm	286	$v_1/(^{\circ})$	170

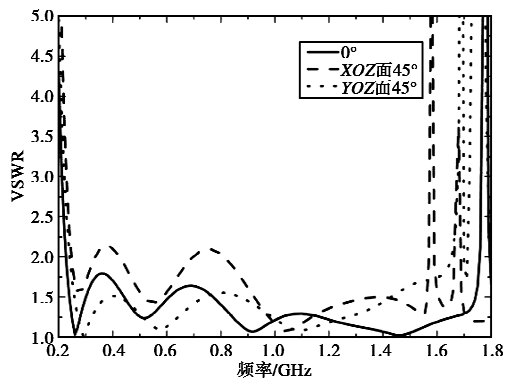
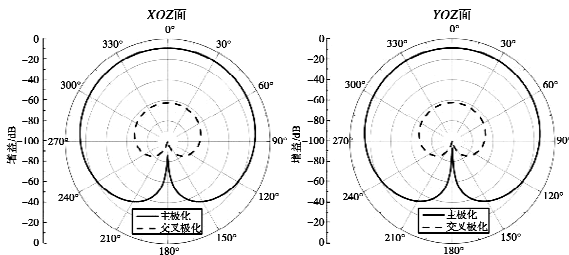
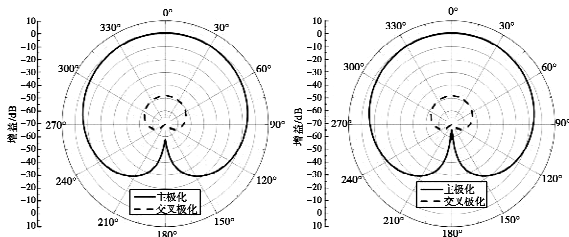


图3 驻波系数

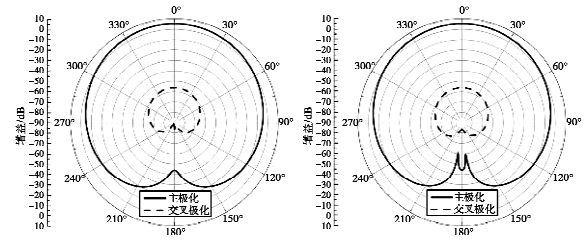
Fig. 3 Voltage standing wave ratio



(a) 0.3 GHz



(b) 0.9 GHz



(c) 1.5 GHz

图4 单元方向图

Fig. 4 Pattern of the unit cell

1.2 8×9 验证阵列的设计

为了进一步验证天线单元及阵列的性能,设计了一个8×9的验证阵列.由于超宽带阵列天线在工作过程中阵元连接处的缝隙将导致阵元间出现大量的不连续电流,进而将严重影响天线驻波、方向图等性能,因此在考虑到加工和装配精度的情况下,将天线单元加工成十字形结构,如图5所示.相比于传统的在阵元边缘位置连接阵元的方式,在电流密度相对较小的谐振腔后端连接阵元能够大量减小阵元连接区域,进而降低了阵元连接处不连续电流对天线性能的影响.阵元之间的横向间距和纵向间距均设为单元宽度 W .阵元与阵元之间、介质板与阵元之间以及阵元与地板间通过螺丝固定.

考虑到实验室难以测量输入阻抗为75 Ω 的天线,因此在不改变原天线结构及尺寸的前提下,设计了一种50~75 Ω 的切比雪夫馈电巴伦,其尺寸示意图见图6,该巴伦面积仅有0.033 $\lambda_L \times 0.036\lambda_L$.加载转换巴伦后的天线单元驻波系数仿真结果如图7所示,可以看出,转换巴伦对天线性能在低频处有所恶化,但对整个频带而言影响并不大.

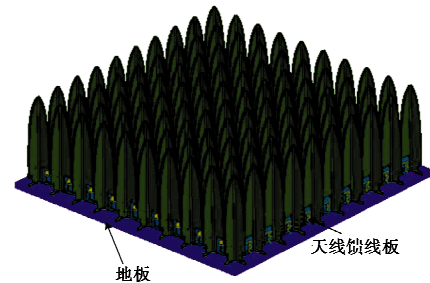


图5 8×9 验证阵列

Fig. 5 8×9 array for verification

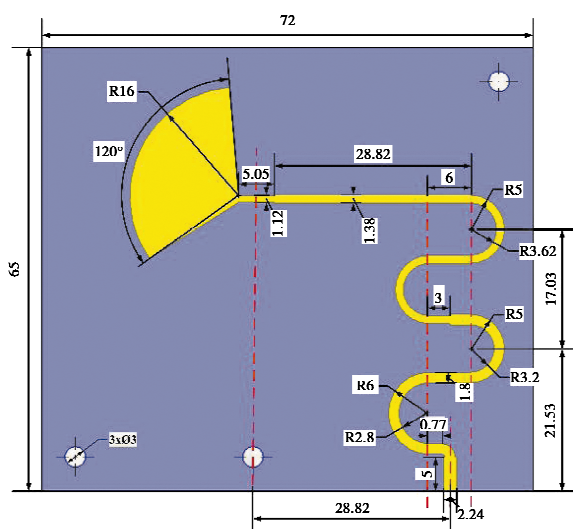


图6 75~50 Ω巴伦尺寸示意图

Fig. 6 Geometry of 50-75 Ω balun

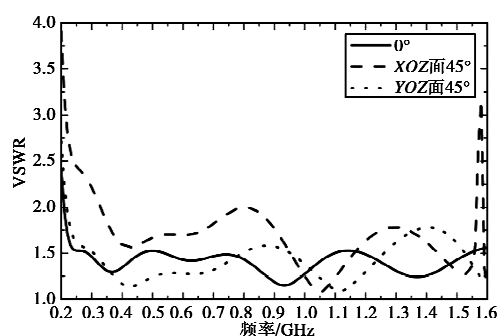
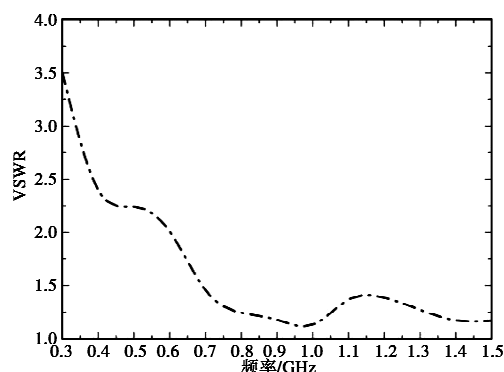
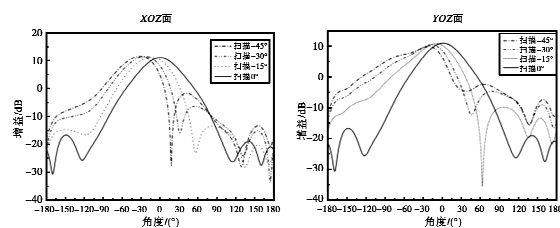


图7 加载转换巴伦后的天线驻波系数

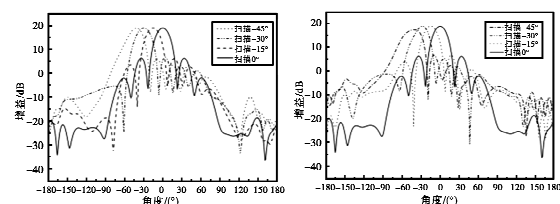
Fig. 7 Voltage standing wave ratio of antenna element with balun

图8所示为 8×9 验证阵列在扫描角度为 0° 时的驻波系数仿真结果.由于SKA中频阵验证系统的物理孔径尺寸较大,而且本文并未在 8×9 有限阵中加载抑制边缘截断效应的结构,这也是驻波在低频段较差的主要原因.然而,在工作频点大于 0.4 GHz时,有限阵列的驻波比逐渐接近无限大阵列单元的有源驻波仿真结果,验证了该天线的超宽带特性.图9为阵列在大扫描角度下的方向图,图中在 0.3 GHz处主波束方向发生了偏移,其辐射方向图的波束未达到 $\pm 45^\circ$ 的范围,这是由于阵列的单元在低频时的耦合较强,从而导致单元辐射体自身的相位发生改变,使得辐射波束未能达到指定扫描角度.此外,由于阵列单元数量只有 72 个,从而导致边缘截断单元对阵列的辐射特性影响较大,造成阵列在某些角度的扫描波束恶化,这点在E面的表现最为明显^[13].因此,可以预见随着阵列规模的增大边缘

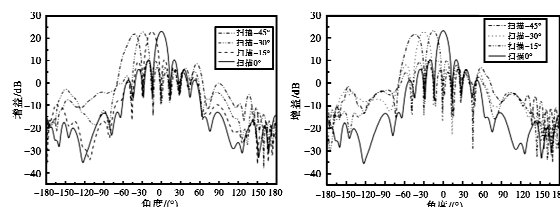
截断效应逐渐减弱,有限阵中心单元的有源方向图将逐渐接近无限大阵列环境阵元的辐射性能.另外,可以看出天线阵列具备较好的定向性.因此,所设计TSA能够满足SKA中频阵超宽带、低成本、大扫描角以及高极化隔离度的要求.

图8 8×9 阵列中心阵元的驻波系数仿真图Fig. 8 Voltage standing wave ratio of the center element in 8×9 antenna array

(a) 0.3 GHz



(b) 0.9 GHz



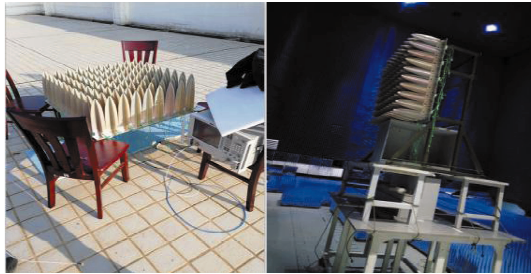
(c) 1.5 GHz

图9 8×9 阵列扫描方向图Fig. 9 Scanning pattern of 8×9 antenna array

1.3 8×9 验证阵列实物测试与结果分析

为了验证仿真结果的准确性,制作了 8×9 双极化锥削槽阵列样机,如图10所示.反射板背面粘附有 2 cm厚的可发性聚乙烯板(expandable polyeth-

ylene, EPE), 用于保护 SMA 匹配负载。图 10(a) 和图 10(b) 所示分别为 8×9 锥削槽阵列样机驻波测试和暗室测试现场。在有源方向图测量过程中, 由于暗室喇叭探头的最小工作频率为 1 GHz, 因而在测量 0.3 GHz 和 0.7 GHz 频点的方向图时, 所用探头分别为偶极子天线和菱形天线。



(a) 驻波测试现场 (b) 暗室测试现场
(a) Field of standing wave test (b) Field of darkroom test

图 10 8×9 双极化锥削槽阵列样机实物图

Fig. 10 The 8×9 dual-polarization NTSA array

利用矢量网络分析仪对锥削槽阵列天线的阻抗性能进行测试, 测得的中心阵元的有源驻波比如图 11 所示。从测量结果可以看出: 所设计双极化锥削槽阵列天线在 0° 扫描状态下, 中心阵元获得的有源驻波小于 2 的频带范围为 0.3~1.5 GHz, 且实测结果与 8×9 有限阵仿真结果表现出较强的一致性, 有效地验证了设计方法的正确性。由于阵列规模较小, 在低频段的边缘截断效应仍然较强, 导致阵列天线中心阵元在低频段的驻波系数较大。随着阵列规模的增大, 有限阵列中心阵元的驻波系数将逐渐接近于无限大阵列环境中阵列中心阵元的驻波系数。

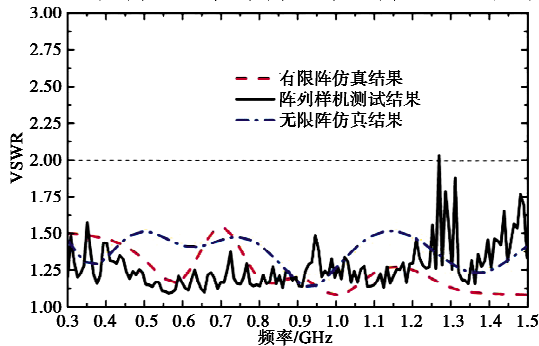
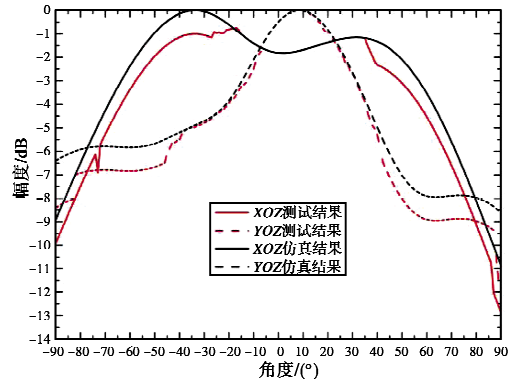


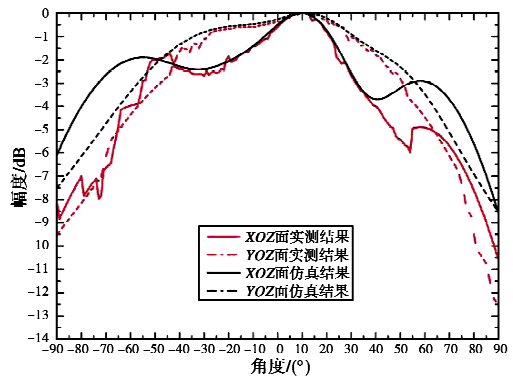
图 11 8×9 双极化锥削槽阵列样机中心阵元的实测有源驻波

Fig. 11 Measured voltage standing wave ratio of the center element of the 8×9 dual-polarization NTSA array and its comparison to the simulated results

受到暗室测试条件的限制, 仅测试了 0.3 GHz 和 0.6 GHz 两个频点处中心阵元主极化方向上的有源方向图, 如图 12 所示。可以看到 0.3 GHz 和 0.6 GHz 频点处, 在 XOZ 面和 YOZ 面内的有源方向图实测结果均与仿真结果比较吻合, 实测结果的半功率波瓣宽度与仿真结果比较吻合。



(a) 0.3 GHz



(b) 0.6 GHz

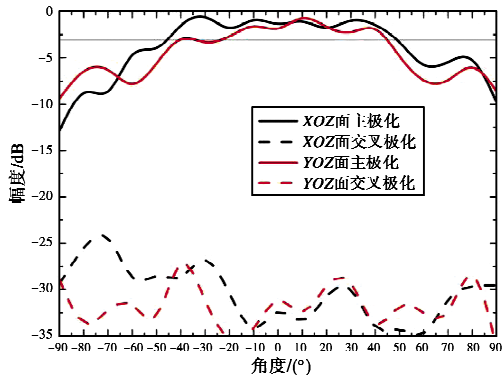
图 12 8×9 双极化锥削槽阵列样机中心阵元的有源方向图

Fig. 12 Measured active pattern of the central array element of the 8×9 double-polarization cone grooving array prototype

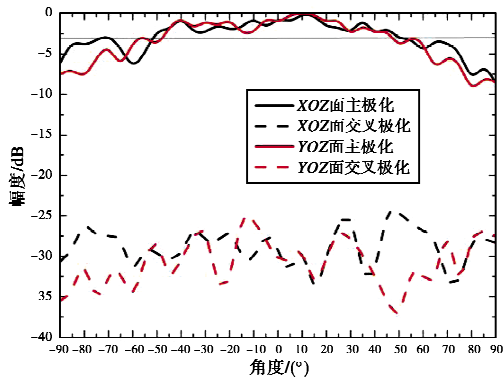
在不同频点处实测的主极化与交叉极化方向图如图 13 所示。可以看到: 在 0.3 GHz、0.6 GHz 频点处其 XOZ 面、YOZ 面的主极化和交叉极化测试结果良好, 满足天线的设计指标。

表 3 给出了 SKA 中频阵指标的对比结果, 天线的设计整体能够满足 SKA 项目组的指标。针对实测结果扫描角有所降低的原因是由于以下几方面造成的: 1) 由于阵列的单元在低频时的耦合较强, 导致单元辐射体自身的相位发生改变, 使得辐射波束未能达到指定扫描角度。2) 阵列单元数量只有 72 个,

从而导致边缘截断单元对阵列的辐射特性影响较大,造成阵列在某些角度的扫描波束恶化。



(a) 0.3 GHz



(b) 0.6 GHz

图 13 8×9 双极化锥削槽阵列样机中心阵元实测结果对比图

Fig. 13 Measured patterns for the center element of the 8×9 dual-polarization NTS array

表 3 SKA 中频阵指标对比
Tab. 3 Comparison of medium frequency array indicators of SKA

参数	指标	仿真结果	测试结果
频带/MHz	300~1 500	300~1 500	300~1 500
扫描角/(°)	-40~+40	-40~+40	-35~+35
前后比/dB	-10	<-11.6	<-10.3
输入阻抗/Ω	75	75	75
驻波	<3	<1.7	<2.1
极化	双极化	双极化	双极化

2 结 论

本文所设计的应用于 MFAA 的新型十字形结构双极化超宽带锥削槽阵列天线单元在节约成本、降低系统噪声以及拓宽阻抗匹配等方面比传统锥削

槽天线单元有了很大的提升和改进。最后根据所设计的新型锥削槽阵列单元加工了一个 8×9 的双极化超宽带锥削槽阵列样机,对设计方法的准确性和有效性进行验证。虽然本文提出了一些新的设计思路,并做出了一些尝试,但相对于 SKA 中频阵接收系统对宽带宽角扫描相控阵的需求来说,这里的研究成果只是阶段性的,还有一些理论与技术问题有待进一步探讨和研究。

1) MFAA 接收系统为大型的双极化超宽带相控阵,其除了需要具备超宽频带宽角扫描、低噪声以及较好的辐射方向图等性能外,还需具备易于安装与维护、低成本、高物理强度以及低剖面等性能。因而如何在不恶化阵列天线性能的前提下进一步降低成本、减小噪声、模块化以及实现低剖面等仍是有待于解决的热点问题。

2) 当紧耦合超宽带相控阵大角度扫描时,可以发现在低频处其主波束方向往往会发生偏移。如何对这一现象从理论上定量或定性地分析对紧耦合超宽带相控阵的设计将具有很大的指导意义。

3) 在大型有源超宽频带宽角扫描相控阵设计过程中,天线馈电、供电以及电子设备的损耗、散热和封装等也是设计者需要考虑的重要问题。因而高性能的大型有源超宽频带宽角扫描相控阵的设计还需要更深入的研究。

参考文献

[1] DEWDNEY P E, HALL P J, SCHILIZZI R T, et al. The square kilometer array[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8): 1482-1496.

[2] 吴曼青,曹锐,陶小辉,等.世界最大综合孔径望远镜 SKA 低频数字阵列系统研究[J].中国科学:信息科学,2015,45(12):1600-1614.

WU M Q, CAO R, TAO X H, et al. The world's largest synthesis radio telescope-SKA: low frequency digital-array system[J]. Scientia sinica informationis, 2015, 45(12): 1600 1614. (in Chinesc)

[3] VAN CAPPELLEN W A, KANT G W, PATEL P D. Antenna developments for EMBRACE, the European demonstrator program for SKA[C]//11th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, Saint-Malo, 2005:1-3.

[4] KANT G W, PATEL P D, WIJNHOLDS S J, et al. EMBRACE: a multi-beam 20,000-element radio astronomical phased array antenna demonstrator[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2011, 59(6): 1990-2003.

- [5] RUITER M, VAN CAPPELLEN W, VAN DER WAL E, et al. Development of a Vivaldi tile for the SKA mid frequency aperture array[C]//10th European Conference on Antennas and Propagation, Davos, 2016: 1-4.
- [6] ARTS M J, FIORELLI B. Polarization studies of Vivaldi aperture arrays for the Square Kilometre Array[C]//2013 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2013: 356-359.
- [7] ZHANG YW, BROWN A K. Octagonal ring antenna for a compact dual-polarized aperture array[C]//IEEE transactions on antennas and propagation, 2011, 59(10): 3927-3932.
- [8] GILMORE J, DAVIDSON D B, BIJ DE VAATE J G. Progress on the development of a dual-polarized dense dipole array for the SKA mid-frequency aperture array[C]//10th European Conference on Antennas and Propagation, Davos, 2016: 1-2.
- [9] 彭勃, 金乘进, 杜彪, 等. 持续参与世界最大综合孔径望远镜 SKA 国际合作[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2012, 42: 1292-1307.
PENG B, JIN C J, DU B, et al. China's participation in the SKA—the world's largest synthesis radio telescope [J]. Scientia sinica physica, mechanica&astronomica, 2012, 42: 1292-1307. (in Chinese)
- [10] 伍洋, 杜彪, 金乘进, 等. 平方公里阵天线新技术综述[J]. 电波科学学报, 2016, 31(2): 413-419.
WU Y, DU B, JIN C J, et al. Overview of new antenna technologies for the Square Kilometre Array [J]. Chinese journal of radio science, 2016, 31(2): 413-419. (in Chinese)
- [11] 王乃彪. 超宽频带锥削槽天线及阵列的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- WANG N B. Design and implementation of ultra-wideband tapered slot antennas and arrays[D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
- [12] 费鹏. 超宽频带环槽与锥削槽天线研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2013.
FEI P. A Study of ultra wideband slot loop and tapered slot antennas[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [13] 王军会. 超宽带天线及其阵列的若干技术研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2015.
WANG J H. Research on several issues in ultra-wideband antenna and array[D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)

作者简介

曹锐 (1976—), 男, 安徽人, 中国电子科技集团公司三十八所研究员, 博士, 目前主要研究方向为孔径阵列、微系统。

卢保军 (1995—), 男, 安徽人, 中国电子科技集团公司第三十八研究所孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室工程师, 硕士, 主要研究方向为超宽带相控阵、微波模块及收发系统。

郭肖肖 (1992—), 男, 安徽人, 硕士研究生, 研究方向为无线通信系统。

桑磊 (1983—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为天线设计与开发。