

新型频率选择表面加载双极化超宽带紧耦合阵列天线*

吴微微¹, 王少植¹, 颜雨晨¹, 方艺忠², 袁乃昌¹

(1. 国防科技大学 CEMEE 重点实验室, 湖南长沙 410073;

2. 北京航天长征飞行器研究所 试验物理与计算数学国家重点实验室, 北京 100076)

摘要:为使紧耦合阵列天线在超宽频带内实现电磁性能更佳、辐射性能更稳定的目的,提出一种新型条形频率选择表面宽角阻抗匹配层加载的双极化超宽带紧耦合阵列天线。通过高频仿真软件 CST 周期边界条件对阵列单元截断并进行研究分析。掌握阵元阻抗和辐射等电磁性能后,优化设计并加工出一个 6×6 单元的阵列天线进行实际测量。测量结果表明,该天线在 $2 \sim 12$ GHz 的频带内驻波比均小于 3,驻波比带宽为 10 GHz。带内辐射特性稳定,主瓣电磁能量集中,交叉极化小。工作频带内,最大增益可以达到 13 dBi。该阵列天线可应用于超宽带相控阵天线领域中。

关键词:双极化;紧耦合;超宽带;频率选择表面;宽角阻抗匹配层

中图分类号:TN823 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)04-037-08



听语音
与作者互动
聊科研

Novel frequency selective surface-loaded dual-polarized ultra-wideband tightly coupled array antenna

WU Weiwei¹, WANG Shaozhi¹, YAN Yuchen¹, FANG Yizhong², YUAN Naichang¹

(1. Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Experimental Physics and Computational Mathematics, Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: To achieve better electromagnetic characteristics and more stable radiation properties within an ultra-wide band, a novel dual-polarized ultra-wideband tightly coupled array antenna loaded with wide-angle impedance matching layer on a strip frequency selective surface was proposed. The array elements were studied and analyzed through the truncation by the periodic boundary conditions in high frequency electromagnetic simulation software CST. After investigating its electromagnetic properties of array impedance and radiation, a 6×6 array antenna was designed, manufactured for actual measurement. The measurement results show that the standing wave ratio of the antenna in the frequency band of $2 \sim 12$ GHz is less than 3. The impedance bandwidth is 10 GHz. Moreover, the antenna has stable radiation within frequency band, more electromagnetic energy is concentrated in the mainlobe, and the cross polarization is small. In the operating frequency band, the maximum gain can reach 13 dBi. This kind of array antennas can be applied in the ultra-wideband phased array domain.

Keywords: dual polarization; tight coupling; ultra-wideband; frequency selective surface; wide-angle impedance matching layer

现代通信和雷达系统逐步向多功能综合射频系统方向发展,在不同频段完成不同任务,比如多种平台远距离或短距离通信,电子侦察、防御及干扰,自适应抗干扰等。在很多军事装备如导弹、战机或军舰等平台上,给予这些多功能雷达通信系统的空间十分有限。若用多副天线实现各种电磁功能,不仅不能满足空间限制的要求,同时天线间近距离的电磁干扰也会给通信带来很大困扰。利用超宽带天线工作频带宽,带内性能稳定的特点,

可以将多个天线集成为一个天线,既解决了空间有限和电磁兼容的问题又可望降低成本。

基于以上实际工程需求背景,超宽带阵列天线技术发展迅速。随着研究的深入,发现此类天线阵元间的间距是制约其性能好坏的一个重要因素。出于抑制栅瓣、抑制由阵元间表面波引起的扫描盲点等目的及天线小型化的考虑,阵元间通常需要排列紧密。但由于互耦影响,阵元的电磁性能如输入阻抗、阵中波瓣等会发生变化,使得如

* 收稿日期:2023-03-14

基金项目:国防科技基础加强计划技术领域基金资助项目(2022-JCJQ-JJ-0230)

作者简介:吴微微(1981—),女,四川成都人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:wuweimei@nudt.edu.cn

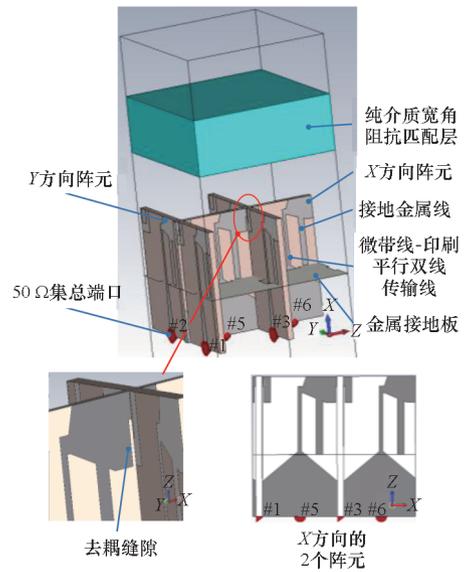
天线测向等性能急剧下降甚至完全失效。与这些传统超宽带阵列天线选择抑制或消除阵元间互耦影响的研究方向不同,新型超宽带紧耦合阵列天线选择充分利用并加强阵元间耦合来进一步拓宽天线带宽。Wheeler^[1-2]提出了理论上的基于强互耦效应的连续电流片阵列天线。Munk 等^[3]在论文中透露实验中已验证了这种基于紧密排列偶极子单元的强互耦宽带阵列天线设计思想。从此拉开了超宽带紧耦合阵列天线研究的序幕并取得很多研究成果,近年来的最新研究成果可归为以下几个主要方向。提出新型阵元振子结构^[4-15]:如电磁偶极子混合振子^[4-5]、新型二维平面振子^[6-10]和新型三维振子^[11-15]等。采用新型馈电结构^[16-21]:如梳齿状馈电结构^[16], Γ 形状探针馈电结构^[17]和新型差分馈电结构^[18]等。研制新型宽角阻抗匹配层结构^[22-31]:如新型二维超构表面加载的宽角阻抗匹配层^[22-28],立式引向型超材料加载的宽角阻抗匹配层^[29-31]等。优化接地板结构^[32-38]:采用异形频率选择表面结构加载的接地板结构^[32-35],电阻性材料频选结构加载的接地板结构^[36-37]和磁性材料频选结构加载的接地板结构^[38]等。还有一些文献资料公开了对该类天线设计方法的研究^[39-41]。

本文提出一种新型条形频率选择表面宽角阻抗匹配层加载的双极化超宽带紧耦合阵列天线。首先,研究了双极化阵列天线单元。其次,提出了新型条形频率选择表面宽角阻抗匹配层。经仿真优化后得到最优的尺寸参数,并进行了实际加工和测试实验。

1 阵列单元的设计

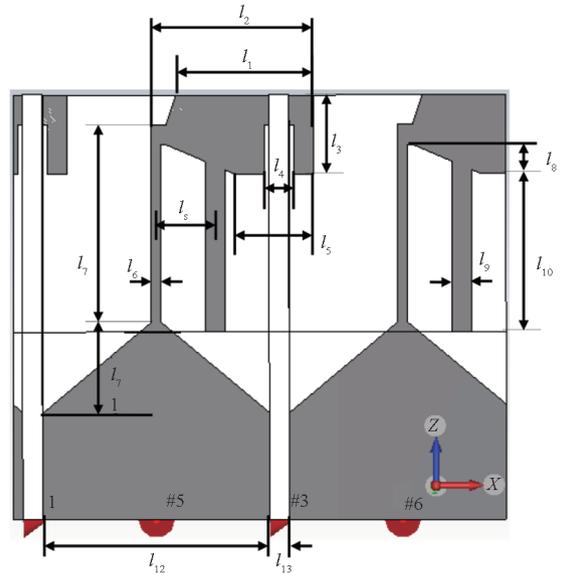
本阵列天线的阵元为印刷偶极子天线。阵元之间的耦合电容通过介质基板两侧振子臂的交叠来实现。偶极子天线阵元分别沿 X 方向和 Y 方向排布。通过在振子臂上开槽,将沿 X 方向和 Y 方向的阵元分别从上和下两个方向相互穿插结合在一起以实现 X 方向和 Y 方向的双极化辐射模式。两个振子臂之间有一定的缝隙,以避免两振子臂之间的短路。纯介质基板宽角阻抗匹配层加载到阵元的辐射前端方向。阵元采用从微带线到印刷平行双线转换的传输线作为馈电方式,同时也实现了不平衡端口到平衡端口的转换。本文中,此结构模型被简称为①型结构模型,如图 1 所示。

天线结构均用高频仿真软件 CST 进行仿真优化。为缩短每一次优化仿真的时间,在建模时,



(a) ①型结构模型示意图

(a) Configuration of type ① structure model



(b) 阵元的结构尺寸

(b) Dimensions of array element

图 1 ①型天线结构模型

Fig. 1 Structure model of type ① antenna

首先利用 CST 软件中的 periodic 周期边界条件在 $\pm X$ 方向和 $\pm Y$ 方向对整个阵列天线进行截断, $\pm Z$ 方向为开放空间边界条件。由于两个方向的阵列结构一致,因此只需研究一个方向的线极化阵,即可得到整个阵的优化方法。为使截断的阵元结构的电磁特性更加趋近于真实的阵列天线,同时又不增加过多的仿真时间,沿 X 方向保留 2 个阵元;沿 Y 方向 2 列,每一列保留 2 个阵元,以期将两个极化方向阵元之间的互耦效应考虑进去。沿 Y 方向排列的两列阵列,共 4 个阵元的集总端口编号分别为 #1, #2, #3 和 #4。沿 X 方向排

列的2个阵元的集总端口编号为#5和#6。在仿真中,只有#5端口被激励,其余端口均接 $50\ \Omega$ 的匹配负载。

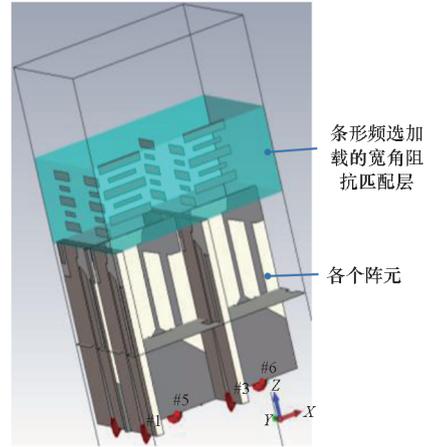
利用这个模型可以快速找到影响阵列阻抗特性和辐射特性的敏感参数,掌握优化规律,同时也为设计新的宽角阻抗匹配层提供了一个高效的基础结构模型。

为了抑制共模谐振和在更宽的频带内实现阻抗匹配,在振子臂的 AB 边上加载了接地金属短路线。与 AB 边和 CD 边等长度的传统偶极子天线不同,本文所提出阵元振子的 AB 边与 CD 边的长度不一样。 AB 边的长短取决于金属短路线与平行双线的距离 l_5 。利用阵元输入端口的反射系数小于 $-10\ \text{dB}$ 作为优化指标,首先优化金属短路线与平行双线的距离 l_5 ;然后优化该线的宽度 l_9 ;最后,进一步优化 CD 边的长度 l_1 ,且通过 l_1 和 l_5 直接得到 AB 边的长度 l_5 ,使阵元输入端口的阻抗匹配程度达到最佳。最后,采用了金属板作为接地板置于振子臂和微带馈线之间,一方面将与辐射方向相反的电磁波反射回去,另一方面在天线振子和馈电端口之间实现隔离。考虑低剖面的要求,金属板与天线振子之间的距离为工作频带内最短波长的 $1/4$ 。 $\textcircled{2}$ 型结构是在 $\textcircled{1}$ 型天线结构和纯介质宽角阻抗匹配层结构的尺寸参数均保持不变的基础上加载了条形频率选择结构。

完成阵元结构和阵元馈线的设计后,重点对阵元辐射前端方向的宽角阻抗匹配层进行了设计、仿真和优化。受八木-宇田天线引向器的启发,在每个阵元辐射前端纯介质宽角阻抗匹配层中加载条形频率选择表面结构实现电磁波立式引向功能,此结构模型称为 $\textcircled{2}$ 型结构模型。图2为 $\textcircled{2}$ 型结构模型示意图。宽角阻抗匹配层和阵列天线所使用介质基板的相对介电常数均为 $\epsilon_r = 2.2$ 。以阵元输入端口的反射系数和辐射方向图在宽频带内的稳定性和对称性为指标,对条形频率选择结构的尺寸参数进行优化设计。

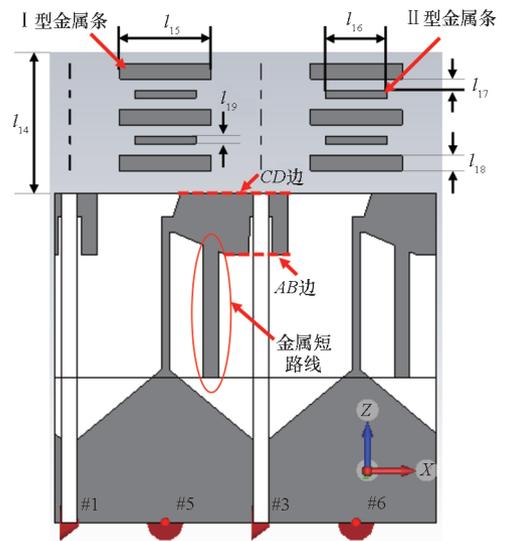
I型金属条主要感应阵元发出的工作频带低端的电磁波,并将其沿天线主瓣方向辐射出去。II型金属条则感应高频端的电磁波,并沿主瓣方向将电磁波进一步辐射出去。金属条的初始长度和间距主要依据高低两端频带的几何中心频率和八木天线引向器设计原理来设定。优化时,先优化I型金属条的长宽尺寸 l_{15} 、 l_{18} ;再优

化II型金属条的长宽尺寸 l_{16} 、 l_{19} ;最后,优化金属条之间的间距 l_{17} 。为简化设计,所有金属条沿 Z 方向的间距均相等,为 l_{17} 。阻抗匹配层的总高度 l_{14} 和两种金属条沿 Z 方向重复的数目主要在满足低剖面、轻重量需求和阵列天线电磁特性要求(包括阻抗特性和辐射特性等)之间进行平衡和折中:即在保证电磁特性的前提下,做到小型化和轻量化。



(a) $\textcircled{2}$ 型结构模型示意图

(a) Configuration of type $\textcircled{2}$ structure model



(b) 阵元的结构尺寸

(b) Dimensions of array element

图2 $\textcircled{2}$ 型天线结构模型

Fig. 2 Structure model of type $\textcircled{2}$ antenna

为清晰展示所有结构尺寸参数,在图1(b)中给出了天线结构的各尺寸参数,在图2(b)中则给出了条形频率选择结构加载的宽角阻抗匹配层的各尺寸参数。图1(b)和图2(b)中天线结构的尺寸参数完全相同,这两部分结构的所有具体尺寸参数如表1所示。

表 1 阵元各结构尺寸参数值

Tab.1 Dimensional parameters of array element structure

单位:mm

参数	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7
数值	7.0	8.4	4.0	1.5	4.0	0.5	10.0
参数	l_8	l_9	l_{10}	l_{11}	l_{12}	l_{13}	l_{14}
数值	3.8	1.0	8.2	4.5	12.5	1.0	10.0
参数	l_{15}	l_{16}	l_{17}	l_{18}	l_{19}	l_s	
数值	6.0	4.0	1.0	1.0	0.5	4.0	

表 2 给出了各个频点处①型和②型结构模型的增益值。从该表可以看出,在 9 GHz、10 GHz 和 12 GHz 三个高频点上,两种结构模型的增益值差别较大。②型结构模型的增益比①型结构模型的增益分别大 3.46 dBi、2.26 dBi 和 5.84 dBi。主要原因有:第一,②型结构中条形频选结构对电磁波沿主瓣方向的引向功能十分有效,导致在整个工作频带内②型结构的辐射能量主要聚集在主瓣方向,增益较高,辐射性能稳定。第二,天线振子臂上的激励电流与金属地板上的感应电流均会产生电磁波。因缺少条形频选结构的引向作用,在上述三个高频点上,①型结构的两种波沿非主瓣方向同相叠加,故将能量更多地分散到非主瓣方向上。②型结构的条形频选结构引导天线振子臂上激励电流产生的电磁波沿主瓣方向传播。较难与金属地板上感应电流产生的电磁波在非主瓣方向进行同向叠加。综上所述,②型结构的条形频选结构具有明显的聚束引向功能,使天线的增益更高,辐射性能更加稳定。

表 2 ①型和②型结构模型的增益值对比

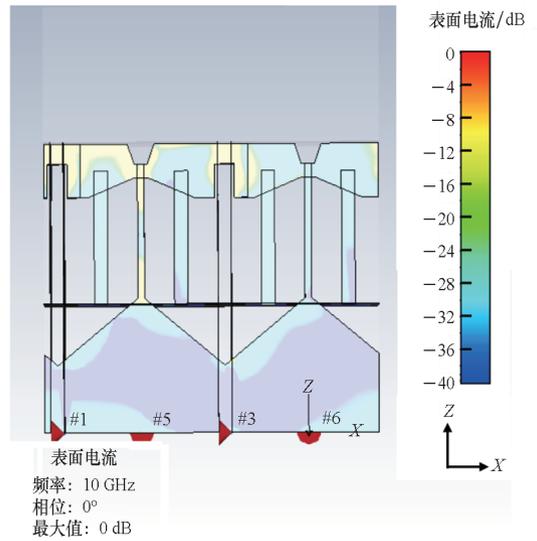
Tab.2 Comparisons of the gain values of the structures of type ① and type ②

单位:dBi

频点/ GHz	①型	②型	频点/ GHz	①型	②型
2	-9.75	-9.90	8	1.87	1.83
3	-7.75	-7.41	9	-0.38	3.08
4	-3.65	-3.83	10	2.45	4.71
5	-0.73	-0.76	11	9.01	9.10
6	0.88	0.96	12	-0.40	5.44
7	2.86	2.81			

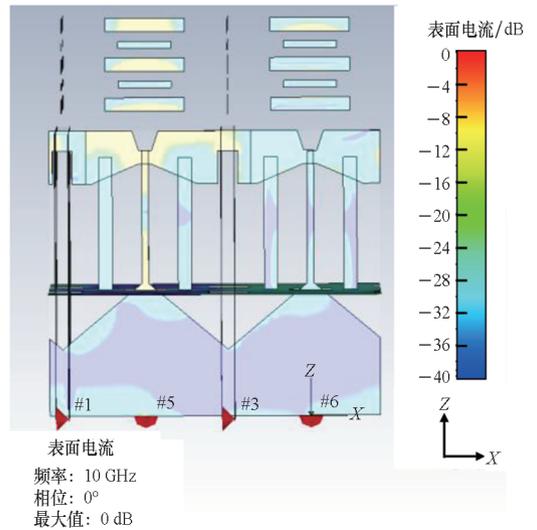
图 3 为①型结构模型和②型结构模型在 10 GHz 频点处的表面电流对比图。可以看到,条

形频率选择表面结构能把大量电磁波引向天线辐射前端方向。通过大量优化仿真发现,条形频选结构中含有两种尺寸的金属条带,且相互交替排列能在更宽频带内提高天线的辐射特性。



(a) ①型表面电流

(a) Surface current of type ①



(b) ②型表面电流

(b) Surface current of type ②

图 3 阵元结构的表面电流

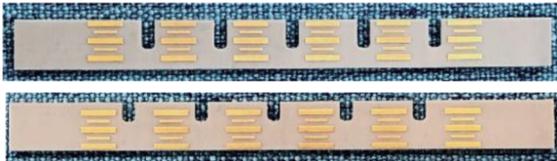
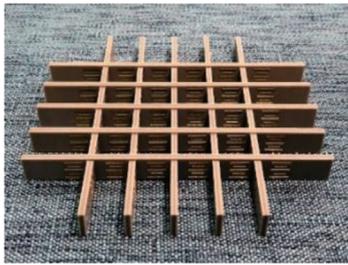
Fig.3 Surface currents of array element structures

在显示结构的表面电流时,CST 将凸显结构金属区域的电流和能量。因此,图 3(a)中阵元顶部的纯介质基板宽角阻抗匹配层区域能量显示不明显。从仿真结果看,具有频选结构的宽角阻抗匹配层能将更多电磁能量引向辐射方向,在高频段上显得尤为突出。

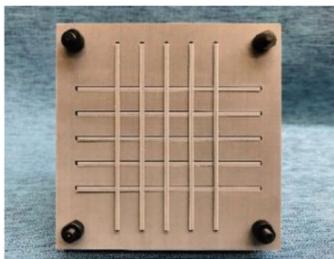
2 阵列的测试结果

通过设计、仿真和优化后,加工了一个含 6 ×

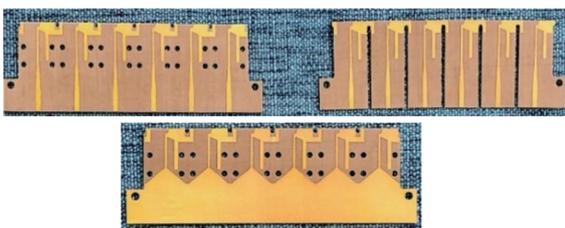
6单元的新型条形频率选择表面宽角阻抗匹配层加载双极化超宽带紧耦合阵列天线。图4为加工出来的天线各部件及装配后的实物图。阵列天线采用相对介电常数为2.2,厚度为1 mm的介质基板和印制电路板工艺进行加工,以保证加工精度和避免阵元形变,并保证所有阵元的一致性。采用5 mm厚的金属接地板和多个用于固定阵列天线的金属底座,加之1 mm厚的天线介质基板相互垂直嵌入安装,能很好地保证天线单元与接地板之间的垂直安装,从而有效避免阵元振子臂之间的短路。基于以上加工装配细节,本紧耦合阵列天线能更好地利用阵元之间的电磁互耦,实现更优的阻抗和辐射特性。



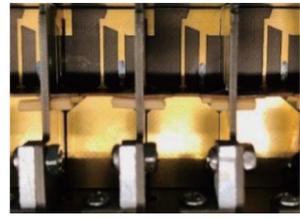
(a) 介质基板上的条形频率选择表面
(a) Strip shape frequency selective surface on a dielectric substrate



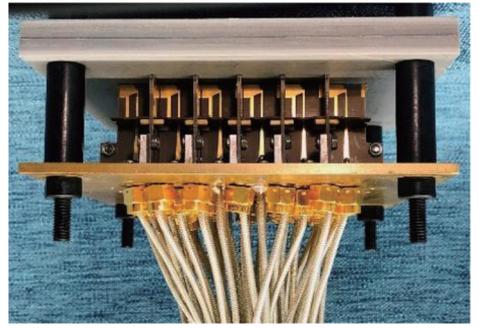
(b) 嵌入介质基板中的条形频率选择表面
(b) Bar shape frequency selective surface embedded in a dielectric substrate



(c) 基板正反面的印刷偶极子阵行
(c) Printed dipole linear array on a substrate (front side and back side)



(d) 相互交叉的印刷偶极子阵列细节图
(d) Detail view of the assembled printed dipole array



(e) 加入馈线的实物图
(e) Whole assembled array antenna with coaxial feedlines

图4 6 × 6单元阵列天线实物图

Fig. 4 Physical image of 6 × 6 element array antenna

图5为测试时,阵列天线的馈电示意图。利用一分四的功分器对整个阵面的对称中心处沿X方向的四个阵元进行等幅同相馈电,其余阵元均端接50 Ω的匹配负载。

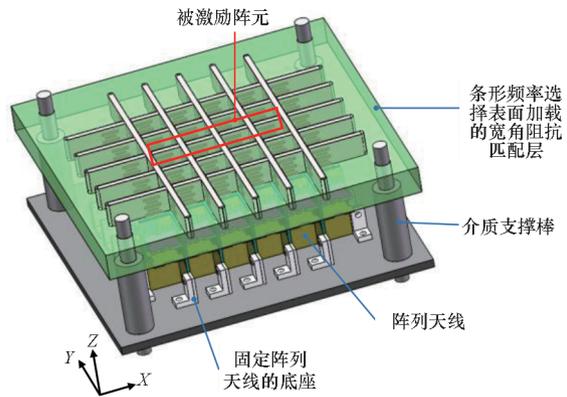


图5 阵列天线馈电示意图

Fig. 5 Schematic diagram of array antenna feeding

图6为阵列天线端口反射系数测试图。从曲线来看,在整个频带(2 ~ 12 GHz)内 $S_{11} < -6$ dB (驻波比小于3); 6 ~ 12 GHz 频段内, $S_{11} < -8$ dB (驻波比小于2.3); 8 ~ 12 GHz 频段内, $S_{11} < -10$ dB (驻波比小于2.3)。故,驻波比小于3的驻波比带宽为10 GHz,驻波比小于2.3的驻波比带宽为6 GHz,驻波比小于2的驻波比带宽为4 GHz。

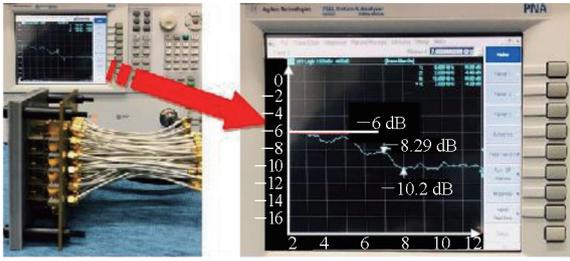
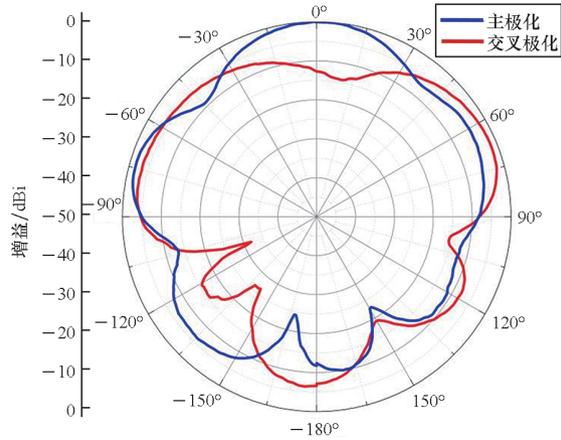


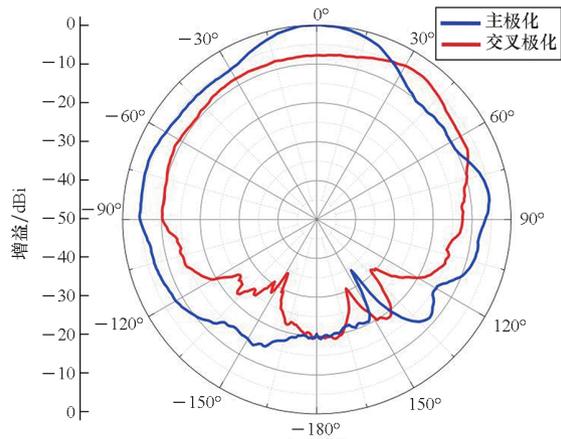
图 6 阵列天线端口反射系数测试图

Fig. 6 Measurement of the reflection coefficient

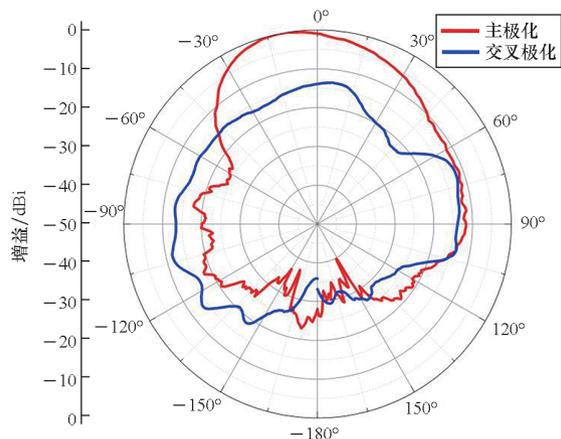
在微波暗室中对阵列天线辐射性能进行了测试。图 7 为在各频点上线阵方向图的实测结果，



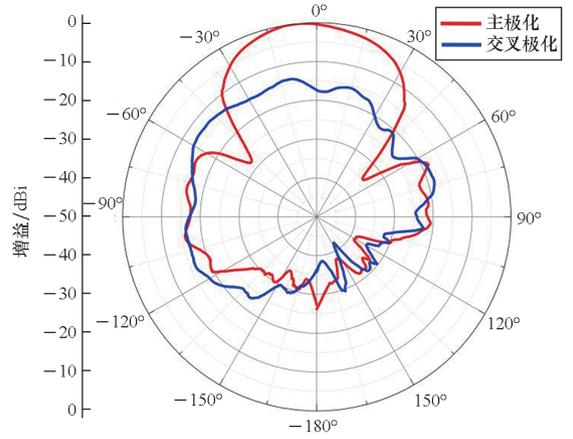
(a) 2 GHz



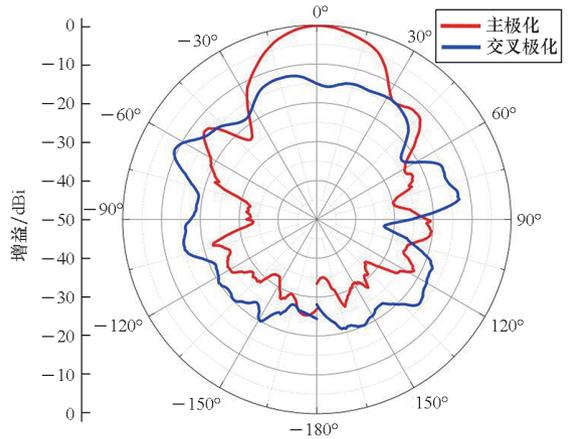
(b) 4 GHz



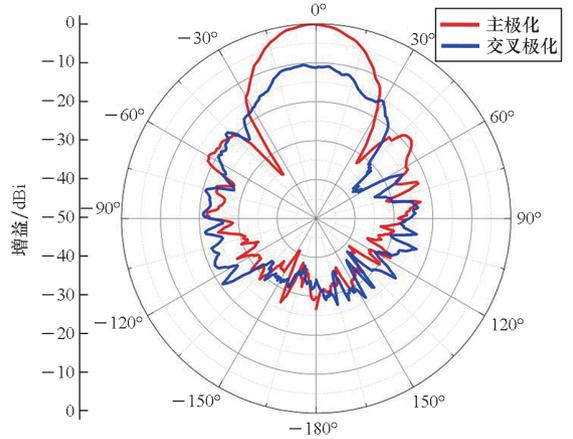
(c) 6 GHz



(d) 8 GHz



(e) 10 GHz



(f) 12 GHz

图 7 各频点天线方向

Fig. 7 Patterns of array antenna direction at each frequency point

包括交叉极化的方向图。

从图 7 中可以看出,在低频端,阵列天线是弱方向性的,甚至交叉极化较强。这说明当工作波长相对于阵列天线结构尺寸来说很长时, X 方向和 Y 方向上阵元间的互耦很强。随着频率升高,阵列天线的电尺寸逐渐增大,交叉耦合的情况得

到抑制。通过研究表明,在相互垂直的两振子臂交叉点,即去耦缝隙区域的耦合是最强的。将各频点方向图按照主极化增益的最大值为标准,进行归一化后的实测结果表明,6 GHz 以上各频点交叉极化抑制度大于 10 dB,主瓣宽度随频率升高而逐渐变窄,辐射电磁波集中程度增高,增益变大。

图 8 给出了阵列天线增益随频率的变化规律。从图 8 可以看出,当频率大于 4 GHz 时,阵列天线的实测增益大于 0 dBi。当频率为 11 GHz 时,实测增益达到最大值 13 dBi。

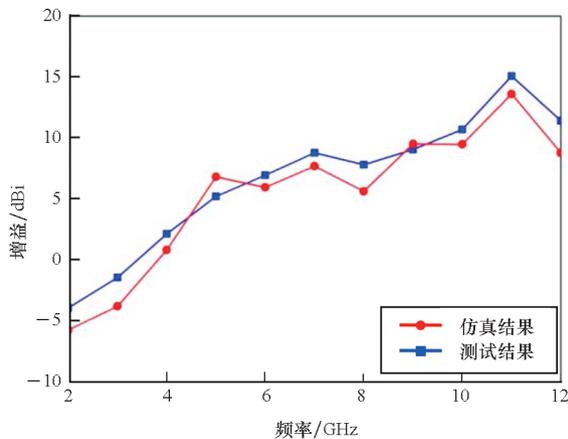


图 8 阵列天线增益随频率变化图

Fig. 8 Gain of array antenna changes with frequency

通过将实测结果与本领域公开发表的文献资料比较,得到本文所提阵列天线的几个创新点:采用具有两种长宽尺寸的条形频率选择表面,且实行交替布阵方式加载介质基板的宽角阻抗匹配层属于立式引向型宽角阻抗匹配层。文献[30-32]中的立式引向型超材料加载的宽角阻抗匹配层仅实现了对单一极化电磁波的引向功能。本文提出的结构实现了对双极化电磁波的引向功能。为实现抑制共模谐振和宽频带阻抗匹配的目的,优化设计了接地金属短路线和具有不对称性的振子臂。接地金属短路线与振子臂、阵元馈线和接地板形成封闭电流环,其效果类似磁偶极子,而具有不对称性的一对振子臂则实现了电偶极子的功能,故类似文献[5-6]中的电磁偶极子混合振子结构。但通过振子臂的不对称性设计,扩展了阻抗匹配的频带宽度,最终使阵列天线在 2 ~ 12 GHz 的 9 倍频程范围内实现了稳定的阻抗特性和辐射性能。

3 结论

本文提出一种新型条形频率选择表面宽角阻

抗匹配层加载的双极化超宽带紧耦合阵列天线。通过该频率选择表面宽角阻抗匹配层的加载,可将电磁波更好地引向天线辐射的主瓣方向。阐释了该阵列天线关键尺寸参数优化设计的理论依据和方法步骤。对该阵列天线的阻抗特性和辐射特性进行了研究、测试和分析。实测结果表明,该天线的驻波比带宽为 10 GHz(驻波比小于 3);辐射特性在整个工作频带内稳定性良好;6 ~ 12 GHz 这一宽频带内反射系数更小,方向性更强,具有更好的聚束特性;为超宽带雷达通信系统天线前端提供了一种应用可能。

参考文献 (References)

- [1] WHEELER H A. The radiation resistance of an antenna in an infinite array or waveguide [J]. Proceedings of the IRE, 1948, 36(4): 478-487.
- [2] WHEELER H. Simple relations derived from a phased-array antenna made of an infinite current sheet [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965, 13(4): 506-514.
- [3] MUNK B, TAYLOR R, DURHARN T, et al. A low-profile broadband phased array antenna [C]//Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Science Meeting (Cat. No. 03CH37450), 2003, 2: 448-451.
- [4] TAN Q Q, FAN K K, YU W L, et al. A broadband circularly polarized planar antenna array using magneto-electric dipole element with bent strips for Ka-band applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(1): 39-43.
- [5] WANG S F, XIE Y Z, QIU Y X. A kind of tightly coupled array with nonuniform short-circuited branches for the radiation of UWB pulses [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(3): 2259-2267.
- [6] HAMZA M, ZEKIOS C L, GEORGAKOPOULOS S V. A low profile planar dual-polarized tightly coupled dipole reflectarray with 5:1 bandwidth [J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2022, 3: 958-969.
- [7] KIM S, NAM S. A novel reflection-type polarization convertor design using connected orthogonal tightly coupled dipole arrays [J]. IEEE Access, 2022, 10: 52116-52125.
- [8] 张君, 胡志慧, 曲洪东. 一种新型超宽带紧耦合天线阵列设计 [J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(2): 127-130.
- [9] ZHANG J, HU Z H, QU H D. Design of a novel ultra-wideband tightly coupled antenna array [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2014, 29(2): 127-130. (in Chinese)
- [10] ZHAO M Y, ZHU Y J, WANG T, et al. A wideband scanning circularly polarized array antenna based on the shorted transmission line model [J]. IEEE Access, 2022, 10: 78493-78501.
- [11] ZHANG T L, CHEN L, MOGHADDAM S M, et al. Millimeter-wave ultrawideband circularly polarized planar antenna using bold-C spiral elements with concept of tightly coupled array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(4): 2013-2022.
- [12] SUN D M, HAO Z C, DING C Y, et al. A low-profile ultra-wideband and wide-scanning phased array for UHF

- applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(1): 473–486.
- [12] 王军会. 超宽带天线及其阵列的若干技术研究[D]. 西安: 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)
- [13] CARVALHO M, VOLAKIS J L. Deployable rigid-flexible tightly coupled dipole array (RF-TCDA) [J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 2: 1184–1193.
- [14] KIM S, NAM S. Ultra-wideband and wide-angle insensitive absorber based on TCDA-under-tightly coupled dipole array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(9): 5682–5690.
- [15] 王泽东. 宽频带定向天线及强耦合阵列天线研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
WANG Z D. Wideband unidirectional antennas and tightly coupled antenna arrays [D]. Xi'an: Xidian University, 2016. (in Chinese)
- [16] WANG J Y, ZHAO X, YE Y, et al. A millimeter-wave ultrawideband tightly coupled dipole array antenna for vehicle communication[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(10): 2135–2139.
- [17] MOGHADDAM S M, YANG J, ZAMAN A U. Fully-planar ultrawideband tightly-coupled array (FPU-TCA) with integrated feed for wide-scanning millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(9): 6591–6601.
- [18] JOHNSON A D, MANOHAR V, VENKATAKRISHNAN S B, et al. Optimized differential TCDA (D-TCDA) with novel differential feed structure [J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 2: 464–472.
- [19] WANG B J, YANG S W, CHEN Y K, et al. Low cross-polarization ultrawideband tightly coupled balanced antipodal dipole array [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(6): 4479–4488.
- [20] ISLAM M R, CARVALHO M, VENKATAKRISHNAN S B, et al. Packable and readily deployable tightly coupled dipole array (TCDA) with integrated planar balun[J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2022, 3: 1206–1217.
- [21] MA Y K, YANG S W, CHEN Y K, et al. Sparsely excited tightly coupled dipole arrays based on irregular array techniques [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(8): 6098–6108.
- [22] LYU X Y, ZHANG Y W, SHI Q, et al. A dual slant-polarized cylindrical array of tightly coupled dipole antennas[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 30858–30869.
- [23] JIANG Z G, XIAO S Q, YAO Z X, et al. A planar ultrawideband wide-angle scanning array loaded with polarization-sensitive frequency-selective surface structure[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(11): 7348–7357.
- [24] HU C H, WANG B Z, SUN B F, et al. A wide-band self-complementary tightly-coupled dipole array with $\pm 80^\circ$ scanning range in the E plane[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 151316–151324.
- [25] ZHANG Z C, WANG B J, YANG F, et al. Conical conformal tightly coupled dipole arrays co-designed with low-scattering characteristics [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(12): 12352–12357.
- [26] HUSSAIN S, QU S W, ZHOU W L, et al. Design and fabrication of wideband dual-polarized dipole array for 5 G wireless systems [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 65155–65163.
- [27] ZHANG Z C, HUANG M, CHEN Y K, et al. In-band scattering control of ultra-wideband tightly coupled dipole arrays based on polarization-selective metamaterial absorber[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(12): 7927–7936.
- [28] SUN J X, CHENG Y J, FAN Y. Planar ultra-wideband and wide-scanning dual-polarized phased array with integrated coupled-marchand balun for high polarization isolation and low cross-polarization [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(11): 7134–7144.
- [29] JIANG Z G, XIAO S Q, WANG B Z. A low-cost light-weight ultrawideband wide-angle scanning tightly coupled dipole array loaded with multilayer metallic strips [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 24975–24983.
- [30] HU C H, WANG B Z, GAO G F, et al. Conjugate impedance matching method for wideband and wide-angle impedance matching layer with 70° scanning in the H-plane[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(1): 63–67.
- [31] HU C H, WANG B Z, WANG R, et al. Ultrawideband, wide-angle scanning array with compact, single-layer feeding network [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(4): 2788–2796.
- [32] KIM S, NAM S. Characteristics of TCDA with polarization converting ground plane[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(4): 2359–2364.
- [33] TANG H, ZHENG B W, AN S S, et al. A broadband high-efficiency dipole array based on frequency selective surface and integrated feeding structure [J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 2: 1087–1097.
- [34] QUAN X, CAO Z X, ZHOU H M, et al. Common-mode resonance suppressing surface for tightly coupled array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(12): 12358–12363.
- [35] KIM S, NAM S. Compact ultrawideband antenna on folded ground plane [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(10): 7179–7183.
- [36] JOHNSON A D, ZHONG J N, VENKATAKRISHNAN S B, et al. Phased array with low-angle scanning and 46:1 bandwidth [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(12): 7833–7841.
- [37] CARVALHO M, JOHNSON A D, ALWAN E A, et al. Semi-resistive approach for tightly coupled dipole array bandwidth enhancement [J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 2: 110–117.
- [38] WANG B J, YANG S W, ZHANG Z C, et al. A ferrite-loaded ultralow profile ultrawideband tightly coupled dipole array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(3): 1965–1975.
- [39] ROBINSON E D, RAPPAPORT C M. A lossy transmission line model for the scan impedance of the infinite dipole array[J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2022, 3: 1242–1252.
- [40] YANG F, WANG B J, CHEN Y K, et al. An effective optimization methods for the suppression of edge effects in ultrawideband tightly coupled antenna arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(12): 11639–11652.
- [41] ZHOU W Y, CHEN Y K, YANG S W. Efficient design of tightly coupled dipole array using an equivalent circuit-based approach[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 14013–14023.