

基于混合电磁超材料的宽角扫描相控阵天线

王 蔚,董元旦

(电子科技大学电子科学与工程学院(示范性微电子学院),四川成都 611731)

摘 要: 本文提出了一种新颖的基于混合电磁超材料的小型化低成本宽角扫描相控阵天线. 通过在介质谐振器上加载电磁超表面,引入额外的容性加载,实现了一种新型的小型化混合电磁超材料辐射体结构(电尺寸仅为 $0.39\lambda_0 \times 0.27\lambda_0 \times 0.09\lambda_0$). 同时,由于混合电磁超表面的小型化和周期特性,阵间距缩短为 $0.40\lambda_0$,增大了波束的扫描范围. 此外,混合超材料辐射体中嵌入的空气孔和地板上开设的T形槽,能够提高阵元间的隔离度. 基于混合电磁超材料、紧间距布阵和去耦设计,对一个五元宽角扫描线阵进行了设计与测试. 该阵列各端口的 -10 dB阻抗带宽均大于 $3.30\sim 3.80$ GHz (14.1%),带内隔离度均优于13 dB,最大辐射增益10.1 dBi,主波瓣扫描范围为 $[-81^\circ, 84^\circ]$,3 dB波束宽度覆盖范围为 $[-111^\circ, 105^\circ]$. 该阵列具有小型化、宽带宽、宽扫描范围以及低成本等优点,适用于低成本、高可靠性和智能化的无线通信应用.

关键词: 电磁超材料;小型化;介质谐振器;宽角扫描阵列;相控阵天线

基金项目: 国家自然科学基金(No.62171091, No.62161160310)

中图分类号: TN821+.8

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)02-0267-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220798

A Hybrid Metamaterial-Based Wide-Angle Beam-Scanning Phased Array Antenna

WANG Zhan, DONG Yuan-dan

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: A novel miniaturized, low-cost, wide-angle beam-scanning phased array antenna based on hybrid metamaterial is proposed in this paper. By loading the metasurface on the dielectric resonator (DR), a novel hybrid metamaterial radiator with a compact size of $0.39\lambda_0 \times 0.27\lambda_0 \times 0.09\lambda_0$ is implemented owing to the extra capacitive loading. Based on the miniaturization and periodicity of the metasurface, the array spacing is reduced to $0.40\lambda_0$. As a result, a wider beam-scanning range is realized. Besides, the isolation between different elements is improved by loading the air vias on the DR and etching the T-shaped slots on the ground. Based on the hybrid metamaterial radiator, the compact array design method and the decoupling scheme, a miniaturized five-element linear array is fabricated and measured. The measured -10 dB impedance bandwidth is $3.30\sim 3.80$ GHz (14.1%), the port isolation is greater than 13 dB, and the realized peak gain is 10.1 dBi. The main lobe can scan from -81° to 84° , and the 3 dB beam-width coverage range is $[-111^\circ, 105^\circ]$. The proposed array has the advantages of compact size, broadband, low-cost, and wide-angle beam-scanning capability, which makes it suitable for intelligent, low-cost, and robust wireless communication applications.

Key words: dielectric resonator; metamaterial; miniaturization; phased array antenna; wide-angle beam-scanning array

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62171091, No.62161160310)

1 引言

宽角扫描相控阵天线由于具有大角度波束扫描、大范围波束覆盖以及波束灵活切换等优点,在无线通信、雷达系统、卫星导航以及自动驾驶系统等场景中被

广泛应用^[1],在过去的二十年里,国内外众多学者对其进行了研究和探索.按照实现方式,宽角扫描相控阵天线可大致分为4类:(1)宽波束阵元^[2,3];(2)方向图可重构阵元^[4];(3)紧耦合阵列^[5];(4)宽角匹配层加载^[6]等.

宽波束阵元通常利用电小的电流源或者磁流源实现,虽然具有宽波束的特性,但是由于电小天线的限制,其带宽较窄,难以满足实际通信应用^[2].在方向图可重构阵元中,可利用阵元的多个可切换的辐射模式进行波束分段扫描,进而组合出宽角扫描覆盖^[4].方向图可重构阵元由于通常需要电子开关或机电装置来进行波束重构,因此存在结构复杂和损耗大的问题.紧耦合阵列是一种通过增强阵元间耦合来实现宽带宽角扫描的新型阵列,但是其需要大量的阵元来维持周期性,因此成本较高^[5].通过在阵列的上方加载宽角匹配层,如介质层、频率选择表面及超表面等,能够明显改善阵列的大角度扫描性能^[6].然而,宽角匹配层通常会带来结构笨重和尺寸大的问题.通过对现有技术的分析,目前宽角扫描阵列通常存在带宽受限、尺寸大、成本高和结构复杂等问题,难以满足5G无线通信和智能天线广泛应用的需求.

电磁超材料因其特有的左手频带和零阶谐振特性等,被广泛应用到各类小型化天线中^[7-10],例如基于复合左右手传输线的小天线^[8]、基于开口分裂环的谐振天线^[9],以及采用近场谐振寄生结构的电小天线等^[10].虽然基于电磁超材料的小天线具有电尺寸紧凑和波束波瓣宽的优点,但是通常存在带宽较窄、结构复杂和损耗大等问题,难以直接作为阵元来实现宽角波束扫描.因而,目前基于电磁超材料的相控阵天线研究主要集中在阵列去耦和宽角匹配层方面^[11-13].这类工作实现了波束大角度扫描,但是并没有利用到超材料的小型化特性,因此存在尺寸大和阵列规模大(成本高)等缺点^[12,13].此外,传统的宽带电磁超表面天线由于其大于半波长的尺寸,在相控阵应用中,需要采用低损耗、高介电常数基板来实现小型化,这将导致阵列出现成本高且扫描能力受限等问题^[14].因此,将电磁超材料谐振器作为阵元直接应用到宽角扫描阵列中,前提是设计实现尺寸紧凑、宽带化、简洁化和损耗低的电磁超材料辐射体.除此之外,在实际的应用中,为了满足对宽频带、高速率,以及高稳定性的通信需求,通常需要宽带天线,特别是5G和物联网系统.综上所述,目前小型化、宽频带、低成本的宽角扫描相控阵天线是难以设计实现的,但该类天线是非常适合智能无线通信应用的.

基于以上问题和需求,本文提出了一种新型低剖面混合电磁超材料谐振器结构,用于实现低成本宽角扫描相控阵天线.该低成本宽角扫描阵列阻抗带宽为14.1%,主瓣扫描范围达到了 $[-81^\circ, 84^\circ]$,半功率波瓣覆盖为 $[-111^\circ, 105^\circ]$.本文中,对天线的电磁仿真使用的是Ansys-HFSS 2020软件,对等效电路模型的仿真使用的是ADS 2016软件,对测试方向图的计算使用的是

Matlab 2020.r1软件.

2 小型化混合电磁超材料辐射体

图1是小型化混合电磁超材料辐射体结构图.图1(a)为常规的采用缝隙耦合激励的介质谐振器.介质谐振器材料为氧化铝陶瓷(介电常数为9.4,损耗角正切为0.005),其放置在厚度为0.508 mm的旺灵F4BM220基板上.利用缝隙耦合馈电,激励起介质谐振器的 TE_{111} 模式,辐射出蘑菇状的侧射方向图^[15].为了减小介质谐振器的尺寸,将金属贴片加载到介质谐振器的上表面,如图1(b)所示.金属贴片的加载引入了并联容性分量,使得谐振器谐振频率向低频移动.虽然整块金属贴片加载能够实现小型化,但面积过大的贴片会使谐振器的场分布畸变,从而影响辐射能力.基于经典的电磁超表面天线辐射场调控机制,将金属贴片改为 3×3 的电磁超表面结构,电磁超表面结构被加载到传统的介质谐振器上表面,新的辐射体结构被命名为混合电磁超材料结构,如图1(c)所示.电磁超表面结构同样引入了容性分量加载,使得新的辐射体实现了小型化(电尺寸仅为 $0.39\lambda_0 \times 0.27\lambda_0 \times 0.09\lambda_0$, λ_0 是3.30 GHz对应的自由空间波长).此外,电磁超表面的加载,不仅通过引入并联容性分量来减小尺寸,同时周期性的左手缝隙电容结构使得辐射体的口径场分布更为均匀^[16].

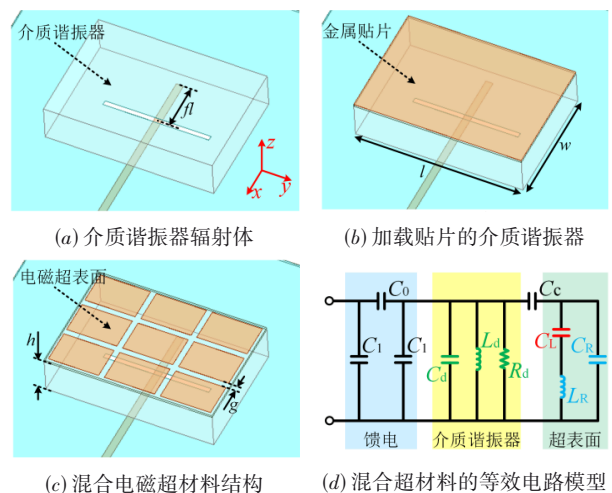


图1 混合电磁超材料结构

图1(d)给出了混合电磁超材料辐射体的等效电路模型.当混合电磁超材料谐振器作为天线辐射时,可分为缝隙耦合馈电结构、介质谐振器和电磁超表面三部分,进而可对辐射体的三部分分别等效.缝隙耦合馈电结构可以等效为一个PI型电路模型(C_0 和 C_1),其中电容 C_0 和 C_1 分别用以表示耦合缝隙的容性效应和微带馈电线与地板之间的容性分量^[17].因此,它们可以由缝隙

电容(C_g)和叠层电容(C_m)计算^[18],即

$$C_g = \frac{\pi \epsilon a}{\ln(sg/t)} \quad (1)$$

$$C_m = \frac{\epsilon S}{4\pi k d_m} \quad (2)$$

其中, a 为缝隙的长度; sg 为缝隙的间隙宽度; t 为金属层的厚度; S 为叠层电容的交叠面积; d_m 为叠层电容两侧金属的间距. 介质谐振器可以等效为一个高 Q 值的RLC谐振器,其中 L_d 和 C_d 分别表示介质谐振器等效电感和电容, R_d 用来表示等效辐射电阻,它们可定义如下^[19]:

$$L_d = \frac{2W_e}{M^2} S_M^2 = \frac{2W_e}{M^2} (wl)^2 \quad (3)$$

$$C_d = \frac{1}{\omega_r L_d} \quad (4)$$

$$R_d = \frac{\omega_r L_d}{Q_u} = \omega_r L_d \tan \delta \quad (5)$$

其中, W_e 为电场储能; M 为磁矩; ω_r 为介质谐振器谐振频率; $\tan \delta$ 为介质谐振器材料的损耗角正切. 基于介质谐振器的尺寸、介电常数、损耗角正切以及所激励起的模式(TE_{111} 模式),介质谐振器的电场分量被求解出来,从而计算出 W_e 、 M 和 ω_r ,进而得到等效的集总参数 L_d 、 C_d 和 R_d ^[20]. 电磁超表面可以等效为一段容性加载超材料传输线结构,即由串联的左手电容 C_L 、并联的右手电容 C_R 和串联的右手电感 L_R 表示^[21]. C_L 为缝隙电容,可由式(1)计算; C_R 为叠层电容,可由式(2)计算; L_R 为金属小贴片电感效应,可由下式计算^[17]:

$$L_s = 2l_s \left(\ln \frac{l_s}{l_s + t} + 0.5 + \frac{w_s + t}{3l_s} \right) \quad (6)$$

其中, l_s 为金属小贴片的长度; w_s 为金属小贴片的宽度. 电磁超表面与介质谐振器之间的耦合,则由一个串联电容 C_c 表示^[22]. 由于电磁超表面与介质谐振器之间近乎1:1的电磁耦合,因此耦合电容 C_c 的数值将通过电路拟合确定. 通过以上参数计算式和对应的物理参数,等效电路中元件的大致数值将被计算出来. 由于分布式参数带来的寄生特性,等效电路的具体数值将利用电路和电磁仿真进行拟合和调整^[23]. 通过计算和拟合,等效电路模型的数值被确定: $C_0 = 1.2$ pF, $C_1 = 0.2$ pF, $L_d = 0.8$ nH, $C_d = 1.15$ pF, $R_d = 70$ Ohm, $C_L = 1.0$ pF, $L_R = 1.6$ nH, $C_R = 1.2$ pF, $C_c = 0.8$ pF.

图2整理了不同辐射体结构对应的反射系数($|S_{11}|$)和阻抗特性,以便进一步说明混合超材料辐射体的工作机理. 当介质谐振器上表面加载金属贴片或电磁超表面时,额外的容性分量被引入,此时新的辐射体(混合电磁超材料)的谐振频率将向低频偏移^[22]. 混合超材料的等效电路的 $|S_{11}|$ 参数响应与其对应的三维电磁仿真相吻合. 因此,在实际中,可利用等效电路来对

混合超材料的频率和带宽进行分析和设计.

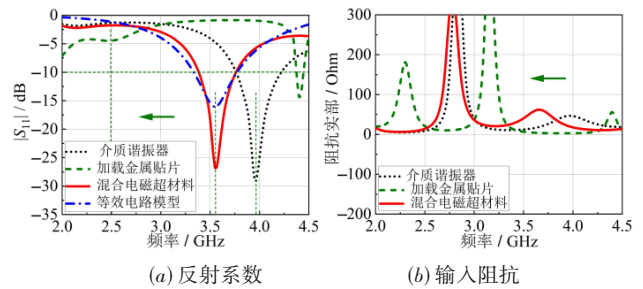


图2 不同辐射体对应的反射系数和阻抗性能

为了进一步说明辐射特性,图3和图4分别给出了辐射体在3.55 GHz对应的电场分布图和辐射方向图. 由图3可知,混合超材料辐射体激励起一个环状的电场分布,与经典的小环磁偶极子类似,因此该模式仍由介质谐振器的 TE_{111} 模式主导. 此外,电磁超表面上呈现出均匀的电场分布,使得辐射体在小型化的同时,表面电场分布得以调控,进而辐射口径仍得以改善,如图3(b)所示. 图4为3.55 GHz处的对应的辐射方向图,显示出辐射体在带内激励出一个蘑菇状的侧射方向图,这与经典的 TE_{111} 模介质谐振器天线以及半波长贴片天线相类似. 图4中,混合电磁超材料辐射体的最大辐射增益为6.8 dBi,主辐射方向上的交叉极化分量被抑制到-20 dB以下,辐射体实现了高纯度的线极化辐射波. 所提出的混合电磁超材料辐射体,在小型化的同时,实现了稳定的侧向辐射,因此其适合低成本宽角扫描阵列和相控阵应用.

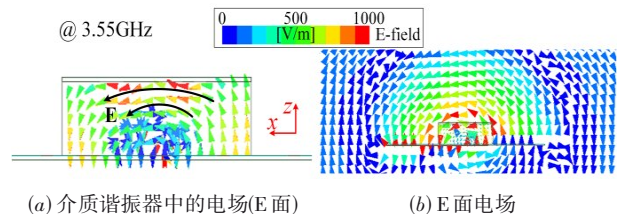


图3 混合电磁超材料在谐振频率3.55 GHz处对应的电场分布

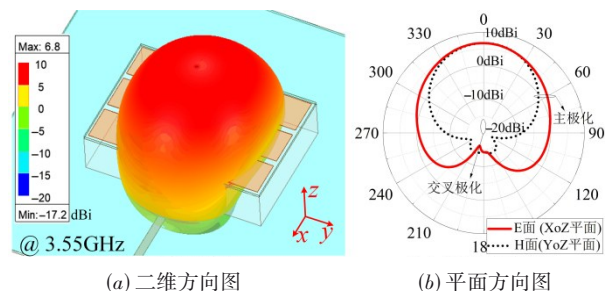


图4 混合电磁超材料在谐振频率3.55 GHz处对应的方向图

图5给出了混合电磁超材料辐射体关键尺寸参数对应的反射系数研究. 当增大介质谐振器的宽度(w)或高度(h)时,介质谐振器的等效电容(C_d)和电感(L_d)

随之增大,谐振频率将向低频移动,如图5(a)和(b)所示.当增大电磁超表面的表面缝隙(g)时,左手电容(C_L)将减小,辐射体的谐振频率将随之抬高,如图5(c)所示.此外,图5(d)给出了馈电枝节长度(ℓ)变化对应的 $|S_{11}|$ 参数,通过调整耦合馈电结构,辐射体将获得良好的阻抗匹配.

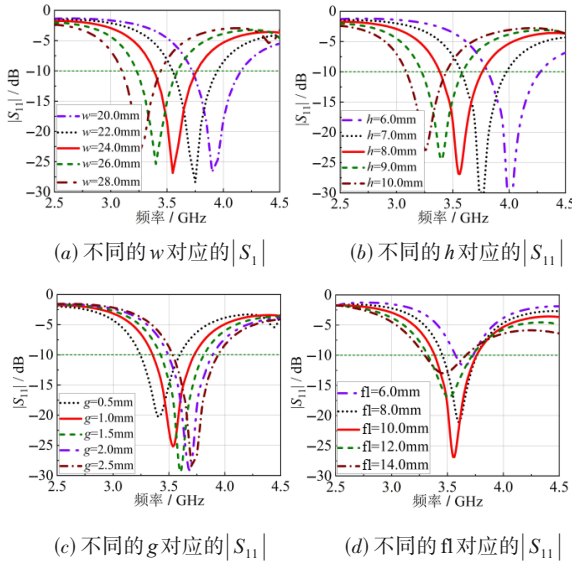


图5 混合电磁超材料辐射体关键尺寸(图1)对应的反射系数

3 混合电磁超材料宽角扫描相控天线

图6是基于混合电磁超材料的宽角扫描相控阵天线.图6中各尺寸参数如表1所示.基于所提出的小型化混合电磁超材料谐振体,将多个谐振体呈“一”字排列成线阵形式.与传统半波长阵元不同,得益于混合电磁超材料的周期性和边缘场分布弱的特点,将阵元以较小的间距排列,此时阵间距缩短为 $0.40\lambda_0$.阵列的波

束偏转角度(θ)与激励相差(δ_ϕ)和阵元间距(d)之间关系如下所示^[24]:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\delta_\phi}{kd} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{\delta_\phi \cdot \lambda_0}{2\pi d} \right) \quad (7)$$

由式(7)可知,当减小阵元间距(d)的时候,波束的偏转角度(θ)将增大,即宽角波束扫描.常规的阵列,受振子或贴片阵元半波长的限制,阵间距通常大于半波长,限制了波束扫描范围^[1,24].所提出的混合电磁超材料阵列,利用了混合电磁超材料的小型化和周期特性,实现了阵元的紧密排列,将阵元间距减小,进而从阵因子的角度为实现波束宽角扫描提供了可行性.此外,高 ϵ_r 介质结构能够引入一个朝着端射方向(即低仰角区域)传播的能量,从而有助于波束在大角度区域实现辐射和宽角扫描^[1].为了降低紧密间距布局带来的强烈耦合,在混合超材料中嵌入空气孔以及在地板上蚀刻T形槽.不同于传统相控阵列中阵元分离的形式,混合电磁超材料阵元集成为一体,同时实现了小型化、低成本和宽角波束扫描.

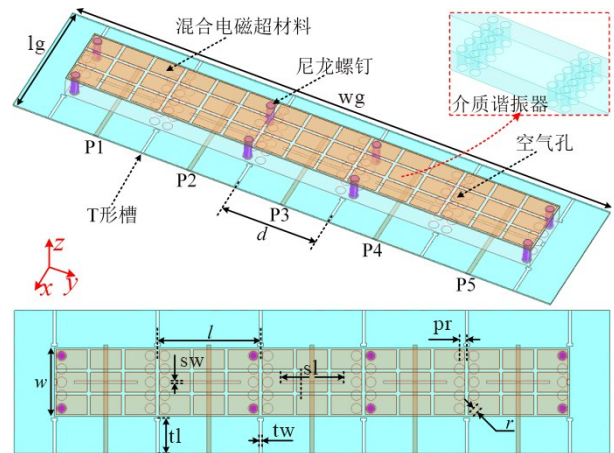


图6 基于混合电磁超材料的宽角扫描阵列

表1 宽角扫描阵列所对应的尺寸参数

单位:mm

h	g	ℓ	wg	lg	l	w	sw	sl	tl	tw	r	pr
8	1.2	13	210	50	36	24	1	22	12.5	1	1.8	2.5

为了进一步说明去耦结构的工作机理,图7给出了当且仅有中间阵元P3激励时,有无去耦结构前后的电场分布以及对应的阵列 S 参数变化.由图7(a)和(c)可知,去耦前,阵元间由于紧密间距和高 ϵ_r 介质结构连接,阵列中存在着强烈的耦合电场分布,此时阵元间隔高于10 dB.当加载空气孔和T形槽以后,首先高 ϵ_r 介质结构被空气孔近似切断,减弱了内部能量耦合;再者,T形槽有效地阻断了地板边沿的电流分布;最终阵元间耦合电场分布被减弱,此时带内隔离度优于15 dB,如图7(b)和(d)所示.此外,混合电磁超材料中嵌入的空气孔,使得各阵元彼此分离,阵元的有效尺寸

减小,使得辐射体的谐振频率向高频移动,与馈电缝隙的自谐振频率相靠近,进而耦合出匹配良好的宽频通带.各阵元实现了宽频阻抗带宽,且在带内获得良好的隔离度,这将有利益于阵列实现宽频带宽角波束扫描.

图8为宽角扫描阵列中不同的空气孔半径尺寸(r)和不同的与阵元中心偏离距离(pr)所对应的 S 参数.图8(a)为不同的 r 对应的 S 参数,当增大空气孔半径(r)时,各阵元被进一步分离,因而阵列的隔离度随之增加,且各阵元的阻抗匹配将变好.当空气孔向阵元中心移动时(即增大偏离距离 pr),对于阵元中的介质谐振器结构的均匀性将变差,此时各端口的反射系数将变

差,阵元间的隔离度仅有轻微地变化. 通过调整加载空气孔的尺寸、位置以及数量,可以对阵列的隔离度和阻抗匹配性能进行有效的调控.

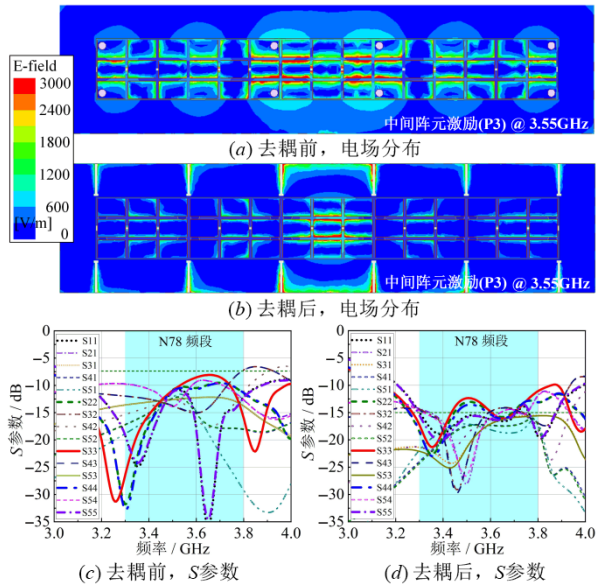


图 7 去耦前后对应的电场分布和 S 参数

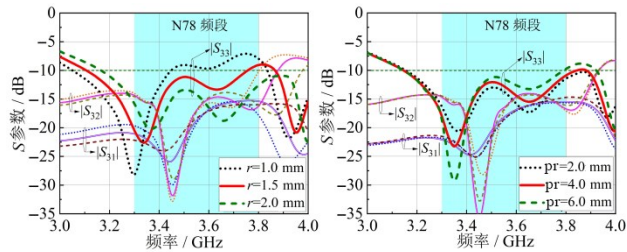


图 8 宽角扫描阵列中不同空气孔半径和摆放位置对应的 S 参数

图 9 给出了所提出的混合超材料宽角扫描阵列去耦前后对应的波束扫描性能. 去耦前,阵列间各端口的隔离度大致为 10 dB,当相邻阵元的馈电相差设置为 150° 时,此时阵列主波束扫描角度为 -50° 左右,如图 9(a) 所示. 当阵列加入空气孔和 T 形槽去耦结构以后,阵元间隔度改善到 15 dB,此时阵列主瓣的扫描指向提升至 -80° 方向. 由图 9 可知,引入去耦结构以后,混合超材料阵列的阵元间隔度被改善,波束扫描范围得到进一步拓展.

图 10 为所提出的混合超材料宽角扫描阵列波束扫描过程中在 3.55 GHz 处对应的电场分布和方向图. 当 5 个阵元等幅同相激励时,阵列上呈现出一个均匀的电场分布,此时阵列实现最大增益侧向辐射 (10.8 dBi),且主瓣指向 $+z$ 方向,如图 10(b) 所示. 当 5 个阵元激励幅度相等,但相邻阵元的馈电相差设为 $\delta_\varphi = 150^\circ$,此时阵列电场分布朝向 $-y$ 轴方向倾斜,对应的波束主瓣方向

偏转到 -80° 方向,如图 10(a) 所示. 同理,当馈电相差切换成 -150° ,此时阵列表面辐射场分布朝向 $+y$ 方向倾斜,其波束前倾,主瓣对准 $+80^\circ$ 方向,如图 10(c) 所示.

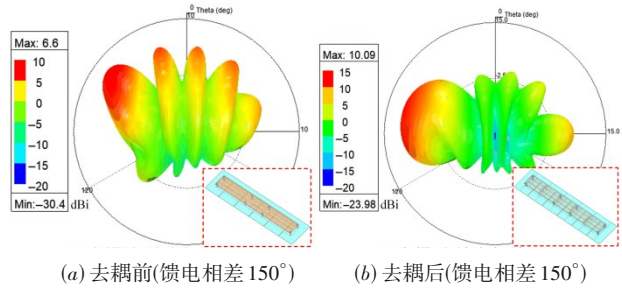


图 9 宽角扫描阵列去耦前后对应的最大波束扫描性能

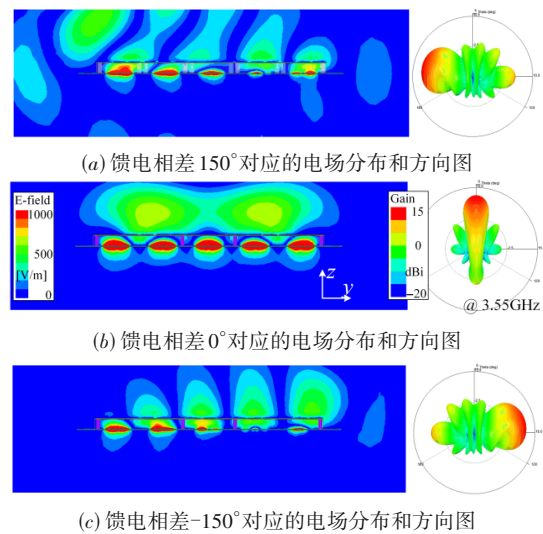


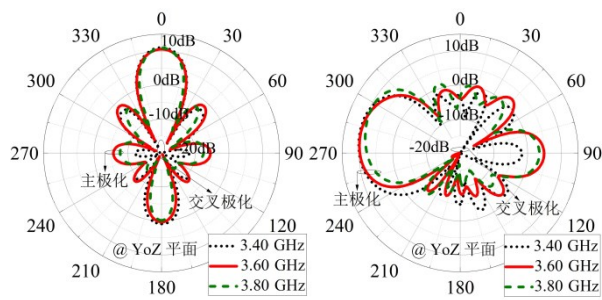
图 10 宽角扫描阵列不同状态下对应的电场分布和辐射波束

在实际应用中,无线通信系统为了实现大速率和高品质的收发交互,通常需要宽频宽且辐射稳定的天线. 因此,图 11 给出了所提出的宽角扫描阵列在不同频率处对应的方向图. 在阵列波束扫描过程中,阵列的方向图在不同频率下仅旁瓣和后瓣出现轻微的变化,主瓣指向均保持一致,且主瓣的辐射增益也较为稳定. 因此,通过相位调控,所提出的宽角扫描阵列能够在小型化和低成本的前提下,实现宽频带的大角度波束扫描,其广泛地适用于各类无线通信和探测系统.

4 结果和性能对比

4.1 测试结果

为了验证所提出的混合电磁超材料、紧间距布阵的宽角扫描机制以及去耦设计,本课题组加工实现了一个小型化低成本的五元线阵,如图 12 所示. 对于实物天线样机,采用了 R&S ZNB40 矢量网络分析仪和 SATIMO 球面近场测试系统,对阵列的 S 参数和辐射参数进行了测试.



(a) 相差 0° 对应的方向图 (b) 相差 150° 对应的方向图
图 11 宽角扫描阵列不同频率对应的方向图

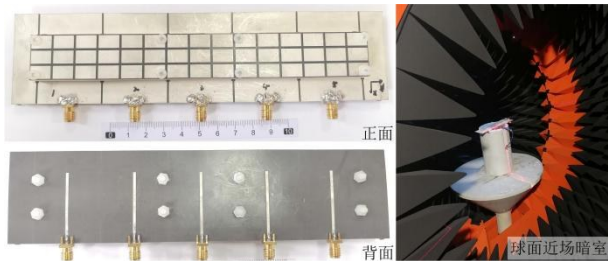
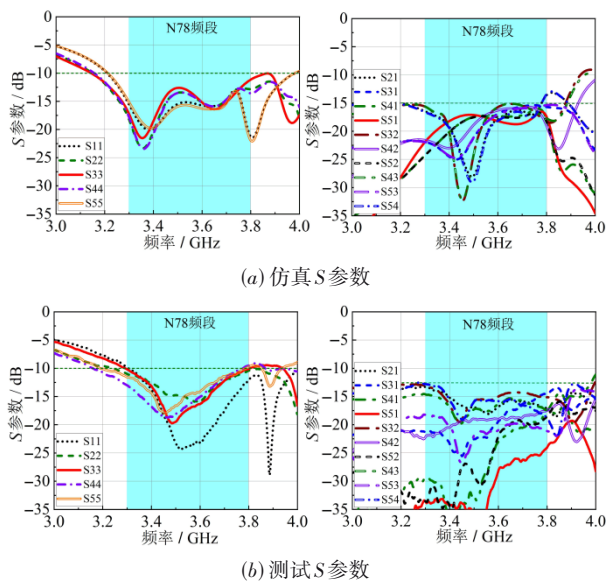


图 12 基于混合电磁超材料的宽角扫描阵列对应的实物和测试场景

图 13 为所提出的混合电磁超材料阵列对应的测试和仿真 S 参数. 阵列各阵元测试的 -10 dB 阻抗带宽为 3.30~3.80 GHz (14.1%), 覆盖了 LTE B42/B43 和 5G-N78 等 Sub-6GHz 应用主流频段. 此外, 阵列各端口之间测试的隔离度均优于 13 dB. 测试的阻抗带宽略窄于仿真值, 这主要是由介质谐振器的加工和天线装配误差造成的.



(a) 仿真 S 参数 (b) 测试 S 参数
图 13 宽角扫描阵列对应的仿真和测试 S 参数

为了验证阵列的波束扫描性能, 采用有源方向图方法, 对各阵元的有源方向图进行了测试和计算. 通过激励其中一个阵元, 匹配其他阵元, 依次获得各阵

元的有源方向图^[25]. 图 14 为各阵元在 3.55 GHz 处 H 面有源方向图, 各阵元的方向图仍为蘑菇状的侧射方向图. 阵列两侧单元的方向图存在轻微的偏移和畸变, 与中间阵元有所差异, 这主要是由阵列边缘截断效应引起的.

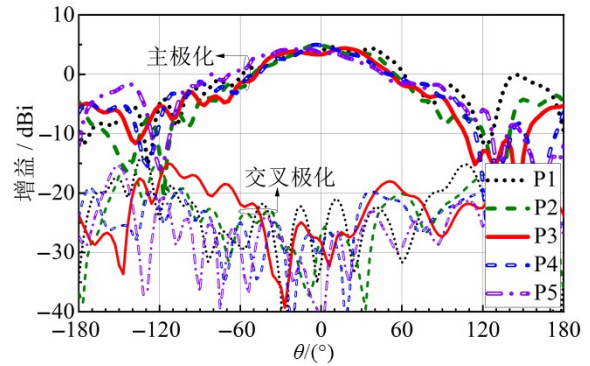
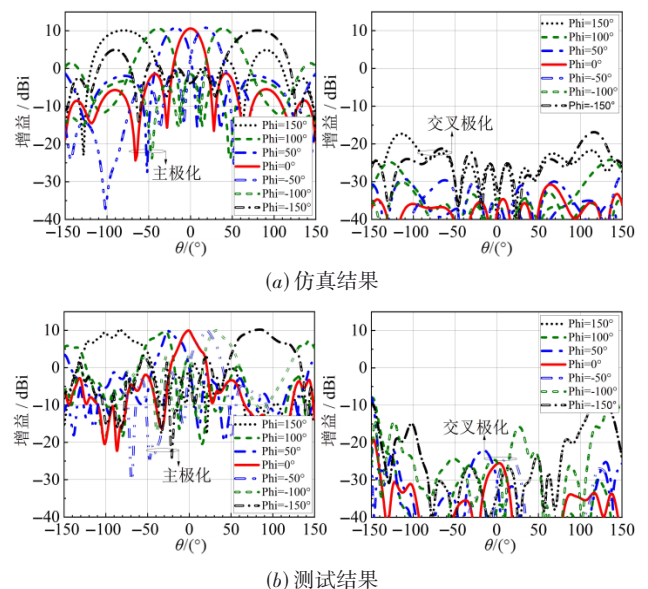


图 14 宽角扫描阵列各阵元对应的测试有源方向图(H面)

图 15 给出了所提出的宽角扫描阵列在中心频率 3.55 GHz 处对应的测试和仿真波束宽角扫描性能. 从测量结果可得, 在 3 dB 波束范围内, 主瓣的扫描范围为 $[-81^\circ, 84^\circ]$, 阵列实现的最大增益为 10.1 dBi. 阵列的半功率波束宽度覆盖区域为 $[-111^\circ, 105^\circ]$, 可见该阵列实现了宽角波束扫描和波束大角度动态连续覆盖. 阵列的测试增益略低于仿真值, 主要是因为加工误差以及来自 SMA 连接器的额外损耗. 此外, 本工作中为了简化控制和高效验证阵列的宽角波束扫描能力, 仅对阵元的相位进行了调控. 在实际应用中, 通过增大阵列规模或采取幅度-相位调控, 可进一步提升波束扫描性能以及改善副瓣电平.



(a) 仿真结果 (b) 测试结果
图 15 宽角扫描阵列对应的仿真和测试波束扫描性能

4.2 性能对比

表 2 整理了本文所提出的相控阵天线与现有宽角扫描阵列文献的性能对比,以进一步凸显本工作的新颖性和优势.此外,为了更加完整地进行对比,表 2 中添加了六单元和八单元的混合超材料宽角扫描阵列的仿真最大辐射增益.文献[11]和文献[14]提出两种基于电磁超表面的宽角扫描阵列.文献[2]和文献[25]为了改善波束扫描能力,分别采用了宽波束阵元 and 低耦合/低交叉极化阵元进行布阵.与现有的工作相

比,本文所提出的阵列创新性和优势包括但不限于:

(1)采用了混合电磁超材料,实现了阵元以及阵列的小型化,尺寸缩减和结构简化程度优于传统的电磁超表面阵列^[11,14];

(2)在小型化的同时,混合电磁超材料辐射体实现了宽频带,工作带宽大于文献[2]、文献[11]和文献[25],且辐射增益与同类宽角扫描阵列相持平;

(3)相比现有宽角扫描阵列^[2,14,25],混合超材料阵列在降低成本的同时(少量阵元),实现了波束宽角扫描和广域动态连续覆盖.

表 2 与现有宽角扫描阵列文献对比

参考文献	技术	阵元数	带宽/%	波束扫描范围	增益/dBi	评价
[11]	加载超表面折射层	6	3.0	$[-56^\circ, 60^\circ]$	10.6	剖面高,尺寸大,窄带宽
[14]	电磁超表面阵元	8 (1D)	22.0	$[-60^\circ, 60^\circ]$	12.9	尺寸大,波束扫描范围较小
[2]	宽波束磁流阵元	9 (E 面)	6.9	$[-76^\circ, 76^\circ]$	12.2	阵元多,窄带宽,成本高
[25]	低交叉极化阵元	8	8.1	$[-65^\circ, 65^\circ]$	15.3	带宽窄,多层结构复杂
本文	混合超材料阵元、紧阵间距、去耦设计	5	14.1	$[-81^\circ, 84^\circ]$	10.1 (5 元阵) 测试值 11.8 (6 元阵) 13.0 (8 元阵)	小型化,宽带宽,宽角扫描,低成本

本文所提出的基于混合电磁超材料的宽角扫描阵列,在实现低成本、小型化和宽频带的同时,实现了波束宽角扫描以及良好的辐射性能,因此适合无线通信和低成本阵列应用.

5 结论

本文提出了一种新颖的小型化混合电磁超材料结构,并用于实现低成本宽角扫描阵列天线.通过在介质谐振器上加载电磁超表面结构,实现了一种尺寸紧凑且易集成的混合超材料辐射体.利用混合超材料的紧凑尺寸和周期性,缩短了阵元间距,从而拓宽波束扫描范围.本文所提出的五元宽角扫描阵列采用了小型化宽带超材料阵元、紧间距布阵和去耦合设计,实现了 14.1% 的 -10 dB 阻抗带宽, 10.1 dBi 的最大辐射增益, $[-81^\circ, 84^\circ]$ 的主瓣扫描范围和 $[-111^\circ, 105^\circ]$ 的半功率波瓣宽度覆盖范围.此外,该阵列还具有成本低、易加工和结构形式灵活等优点.因此,所提出的混合电磁超材料天线及其阵列形式,可适用于低成本、高稳定性和智能化的无线通信应用.

参考文献

- [1] 王秉中, 丁霄, 肖绍球, 等. 平面相控阵宽角扫描技术[J]. 微波学报, 2020, 36(1): 38-44.
WANG B Z, DING X, XIAO S Q, et al. Wide-angle scanning techniques for planar phased arrays[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(1): 38-44. (in Chinese)
- [2] LIU C M, XIAO S Q, TU H L, et al. Wide-angle scanning

low profile phased array antenna based on a novel magnetic dipole[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1151-1162.

- [3] YANG G W, LI J Y, WEI D J, et al. Study on wide-angle scanning linear phased array antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(1): 450-455.
- [4] DING X, CHENG Y F, SHAO W, et al. A wide-angle scanning planar phased array with pattern reconfigurable magnetic current element[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1434-1439.
- [5] XIAO S W, YANG S W, ZHANG H Y, et al. Practical implementation of wideband and wide-scanning cylindrically conformal phased array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(8): 5729-5733.
- [6] 王晓晓, 张帅. 基于电阻型频率选择表面的超宽带紧耦合相控阵天线[J]. 微波学报, 2016, 32(S1): 123-125.
WANG X X, ZHANG S. An ultra-wideband tightly coupled phased array with resistive FSS[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(S1): 123-125. (in Chinese)
- [7] DONG Y D, ITOH T. Metamaterial-based antennas[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(7): 2271-2285.
- [8] 程强, 林先其, 秦瑶, 等. 平面左手结构在微波器件及天线设计中的应用[J]. 电子学报, 2007, 35(S1): 118-126.
CHENG Q, LIN X Q, QIN Y, et al. Application of planar left-handed circuits on the design of microwave components and antennas[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(S1): 118-126. (in Chinese)

- [9] WANG Z, DONG Y D, ITOH T. Ultraminiature circularly polarized RFID antenna inspired by crossed split-ring resonator[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(6): 4196-4207.
- [10] WU Z T, TANG M C, LI M, et al. Ultralow-profile, electrically small, pattern-reconfigurable metamaterial-inspired Huygens dipole antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 1238-1248.
- [11] LV Y H, DING X, WANG B Z, et al. Scanning range expansion of planar phased arrays using metasurfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 1402-1410.
- [12] ZHANG H Y, YANG S W, XIAO S W, et al. Low-profile, lightweight, ultra-wideband tightly coupled dipole arrays loaded with split rings[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 4257-4262.
- [13] ZHAO L Y, HE Y Q, ZHAO G, et al. Scanning angle extension of a millimeter-wave antenna array using electromagnetic band gap ground[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(8): 7264-7269.
- [14] LI Y, XIAO S Q. Wideband wide-angle scanning phased array based on miniaturized metasurface antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(2): 1107-1119.
- [15] AHMED K. Dielectric Resonator Antennas? [M]. Bal-dock: Research Studies Press, 2003.
- [16] YANG W C, CHEN S, XUE Q, et al. Novel filtering method based on metasurface antenna and its application for wideband high-gain filtering antenna with low profile [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(3): 1535-1544.
- [17] HONG J S, LANCASTER M J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [18] WANG Z, DONG Y D. Low-profile omnidirectional WIFI antennas with pattern reconfigurability inspired by meta-resonators[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(10): 6935-6942.
- [19] 张晓琳. 基于介质谐振器的天线及其阵列研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
ZHANG X L. Research on antenna and array based on dielectric resonator[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [20] 郭开周, L A Trinogga. 介质谐振器与微带线之间的耦合和计算机辅助分析[J]. 电子与信息学报, 1990, 12(4): 385-392.
- GUO K Z, TRINOOGA L A. Dr coupling with microstrip and computeraided analysis[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 1990, 12(4): 385-392. (in Chinese)
- [21] LIU W, CHEN Z N, QING X M. Miniature wideband non-uniform metasurface antenna using equivalent circuit model[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(7): 5652-5657.
- [22] ZHAO S K, LIU N W, CHEN Q, et al. A low-profile dielectric resonator antenna with compact-size and wide bandwidth by using metasurface[J]. IEEE Access, 2021, 9: 29819-29826.
- [23] IQBAL A, ALAZEMI A J, KHADDAJ MALLAT N. Slot-DRA-based independent dual-band hybrid antenna for wearable biomedical devices[J]. IEEE Access, 2019, 7: 184029-184037.
- [24] 梁仙灵, 钟顺时, 汪伟. 高隔离度双极化微带天线直线阵列的设计[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 553-555.
LIANG X L, ZHONG S S, WANG W. Design of a dual-polarized linear microstrip antenna array with high isolation[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 553-555. (in Chinese)
- [25] CHEN H, WU K L. A cross-polarization suppressed probe-fed patch antenna and its applications to wide-angle beam-scanning arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(9): 7636-7645.

作者简介



王 焜 男, 1995年12月出生, 四川绵阳人. 电子科技大学电子科学与工程学院(示范性微电子学院)博士研究生. 主要研究方向为天线与微波器件、电磁超材料天线、可重构天线与阵列、智能天线系统.
E-mail: zhanwang7323@163.com



董元旦(通讯作者) 男, 1983年1月出生, 江苏无锡人. 2012年获美国加州大学洛杉矶分校博士学位. 现为电子科技大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为天线、微波电路、射频前端模组、电磁超材料、声学滤波器件.
E-mail: ydong@uestc.edu.cn