

X 波段超宽角扫描相控阵天线设计*

陆娇君¹, 吴鸿超^{1,2}

(1. 南京电子技术研究所, 南京 210039; 2. 天线与微波技术国家重点实验室, 南京 210039)

摘要: 为了实现 X 波段超宽角扫描, 提出一种新型的紧耦合阵列天线单元设计, 并结合等效电路分析优化天线参数。采用集成式 Marchand 巴伦馈电, 可以实现偶极子与巴伦共基板印刷, 进而减小天线的重量与成本。阵列口径上方加载垂直寄生覆层及水平单层电介质板, 两者共同作用以改善宽角扫描时阻抗变换。仿真结果表明该天线可实现 X 波段 (8~12 GHz) E 面 80°、H 面 70° 的扫描角, 且有源驻波比小于 3。该天线结构简单紧凑, 易于加工制作。

关键词: 紧耦合阵列; 宽带; 宽角扫描; 寄生层; 阻抗匹配

中图分类号: TN822

文献标志码: A **doi:** 10.11884/HPLPB201931.190226

Design of X-band ultra-wide angle scanning phased array antenna

Lu Jiaojun¹, Wu Hongchao^{1,2}

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China;

2. Science and Technology on Antennas and Microwave Laboratory, Nanjing 210039, China)

Abstract: –To realize X-band ultra-wide-angle scanning, the paper proposes a novel tightly coupled array antenna unit design, and combines the equivalent circuit to analyze and optimize antenna parameters. With the integrated Marchand balun, dipole and balun can be fabricated on the same PCB, thus reducing antenna's weight and cost. Introducing the vertical parasitic superstrate and horizontal dielectric layer above the antenna aperture, the two work together to improve the impedance transformation during wide-angle scanning. The results show that the scanning angle ranges up to 80° in E-plane while 70° in H-plane, with an active VSWR<3, in X-band (8–12 GHz). The antenna is simple, compact and easy to fabricate.

Key words: tightly coupled dipole array; wide band; wide-angle scanning; parasitic layer; impedance matching

PACS: 41.20.-q; 41.20. jb

日益严重的电磁环境对现代雷达相控阵天线性能提出更高的要求。为了扩大自身的目标搜索范围、提高其生存能力和作战能力, 人们期望将波束扫描范围扩展至全半球域或准半球域空间, 因此宽带、宽角扫描相控阵成为当前研究热点。Munk^[1] 提出了紧耦合偶极子阵列 (TCDA), 通过相邻单元之间的电容耦合来抵消地平面引入的电感分量。由于单元间距小且紧密耦合, 偶极子上的电流几乎是恒定的, 实现了 Wheeler 的表面电流。紧耦合单元结构按其耦合方式可分为层叠型^[2] 与交指型^[3]。

Munk 提出的 TCDA 可以实现 4.5 倍的阻抗带宽, 在阵列孔径上方添加两层电介质板可扩展为 9 倍阻抗带宽, 扫描角度达 60°^[4]。但是需要外部宽带 180° 混合器以抑制相邻馈线的共模谐振。为了避免安装复杂的平衡不平衡变换器, 文献 [5] 中采用不平衡馈电, 并在偶极子和地板之间放置短路枝节, 以将共模谐振移出工作频带; 但阵列的基板和覆层结合在一起导致介质层过厚, 即使对于中等扫描角度, 也会出现表面波。为了解决这个问题, 文献 [6] 中提出了介质层的穿孔以降低有效介电常数并将表面波移出扫描范围和频带。然而, 实际阵列扫描角仍然限于 60°, 因此不适合更宽的扫描角。文献 [7] 中引入金属迹线附接在双引线馈线上, 解决了文献 [6] 中背板匹配网络带来的结构复杂, 交叉极化增大的问题, 可实现 6 倍阻抗带宽, 但扫描角仅 45°。为了减少输入阻抗便于匹配, 文献 [8-10] 中采用双偶极子形式及 Wilkinson 功分器馈电, 但会导致 E 平面大角度扫描时电阻损失过大, 扫描角限制在 45°。

* 收稿日期: 2019-06-20; 修订日期: 2019-08-29

基金项目: “十三五”装备预研共用技术项目 (41413060404)

作者简介: 陆娇君 (1994—), 女, 硕士研究生, 从事宽带宽角扫描相控阵研究; saraeling@163.com。

为了实现超宽角扫描,本文提出一种新型的 TCDA 结构,采用集成式 Marchand 巴伦馈电,类似于文献 [8],但具备改进结构,以便移除 Wilkinson 功分器。为了改善大角度扫描时阻抗变换,在阵列口径上方加载垂直寄生覆层及水平单层电介质板。相较于传统的电介质覆层,这种结合大大降低重量及成本,并且实现更大的扫描角度。仿真结果表明,该阵列可实现 X 波段(8~12 GHz) E 面 80° 、 H 面 70° 的扫描角,且有源驻波比小于 3。天线剖面高度仅 $0.65\lambda_{\text{high}}$ (高频波长),相比于 Vivaldi 天线,该天线具有低剖面、小型化的特点。

1 天线结构设计

本文所提出的紧耦合天线单元结构如图 1 所示。天线由偶极子辐射层、宽带巴伦、金属反射板及宽角匹配层(WAIM)四个部分组成,采用三层 PCB 工艺实现。两层基板由半固化片粘合,基板均为 RT6002,相对介电常数 $\epsilon_r=2.94$,厚度为 0.254 mm;半固化片为 FR28,厚度 0.1 mm,因此 PCB 总厚度为 0.608 mm。偶极子分别印刷在两层基板上,相互层叠部分形成平板电容结构,以增加耦合电容。与末端加载交指电容的偶极子天线相比,这种设计简化了天线结构。

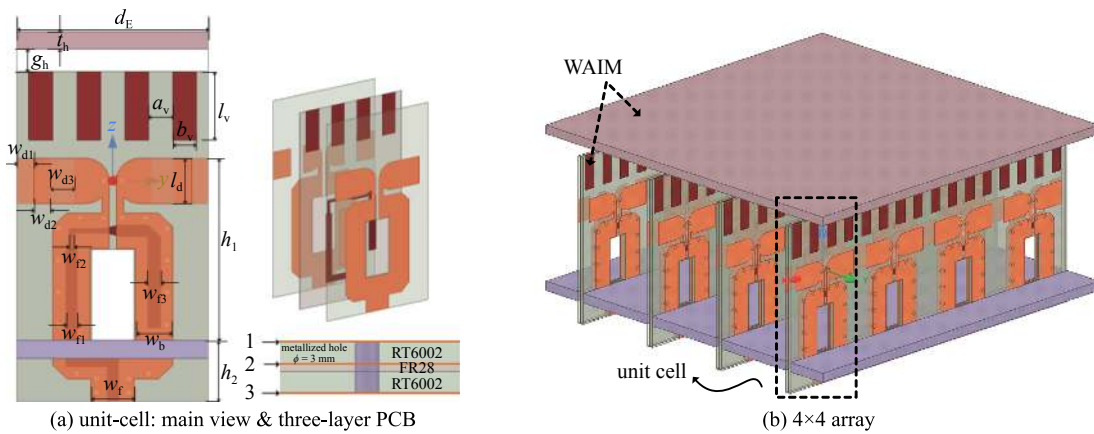


Fig. 1 TCDA with WAIM

图 1 加载宽角匹配层的 TCDA

图 2 给出加载宽角匹配层的 TCDA 等效电路,其中介质层、覆层及自由空间均由传输线表示,特性由每个相应层内的传播 Floquet 模式确定。 L_{dipole} 表示偶极子自感,与偶极子长度有关; C_{coupling} 表示单元间耦合电容,取决于重叠面积,两者共同作用抵消由地平面引入的电抗分量,以进一步扩宽带宽。

本文所提出的 TCDA 为方形, E 面及 H 面尺寸为 $d_E=d_H=8\text{ mm}$,天线输入阻抗约为 $150\ \Omega$ 。由于辐射层为偶极子,若采用同轴非平衡馈电会导致电流分布不均,方向图畸变。因此巴伦在实现宽带阻抗变换的同时还需实现平衡不平衡转换。TCDA 采用折叠 Marchand 巴伦带状线形式馈电,带状线作为输入信号的传输线,可以避免馈线带来的单极辐射问题,减小馈线对天线辐射特性的影响。如图 2 等效电路所示,该巴伦可看作由阻抗变换传输线 Z_1 、开路传输线 Z_{oc} 、短路传输线 Z_{sc} 构成的串联电路,相当于三阶匹配网络。并与 L - C 电路级联,实现馈电端口 Z_{feed} 至负载 Z_L $50\sim 150\ \Omega$ 的阻抗变换。

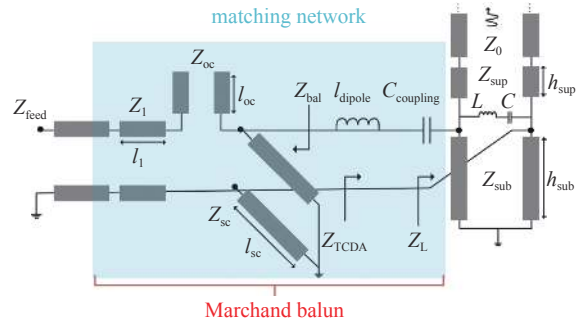


Fig. 2 Equivalent circuit of TCDA with WAIM

图 2 加载宽角匹配层的 TCDA 等效电路

单元间的互耦使得阵列单元输入阻抗会随着扫描角度发生变化,为了实现超宽角扫描,在阵列口径上方引入宽角匹配层,用于改善这种阻抗变化。宽角匹配层由垂直寄生覆层及水平电介质板两者构成。垂直覆层结构非常简单,仅有周期排列的垂直贴片构成。贴片沿着 E 平面周期为 $d_E/4$,沿着 H 面周期为 d_H ,如图 1 所示。垂直覆层可视作预选表面,等效为 L - C 串联电路。但谐振频率正比于单元结构的周长,因此该结构工作于低于其谐振频率的频段,旨在为沿 z 轴传播的平面波提供电容负载。这以与电介质覆层相同的方式降低了介质的特征阻抗,并且增加的电容减轻了接地平面引入的电感分量^[1]。从等效传输线观点看,宽角匹配层相当于阻抗渐变线,将天线与真空中的阻抗进行阻抗变化,而这种组合结构比传统电介质层增加了多个设计自由度,使得阻抗随角度变化更加稳定,因此匹配效果更好。

2 仿真结果与分析

2.1 天线参数优化仿真

为了实现天线设计指标,在周期边界条件下,使用 HFSS 电磁仿真软件对无限阵列进行仿真。在确定宽角匹配层的结构及参数之前,先是对未加载宽角匹配层的天线进行参数分析与优化,以得到最佳参数值。仿真发现,当天线馈电形式与总体结构确定后,天线有源驻波系数随大部分参数变化敏感度不高,稳定性较好,但一些参数影响较大,如反射板与辐射层之间的距离 h_1 、偶极子长度 l_{dipole} 等。

图 3 为 E 面 45° 扫描时有源驻波系数变化曲线,可以看出 h_1 主要影响天线最高截止频率。当 h_1 较小时,低频失配,有源驻波系数变差;当 h_1 较大时,截止频率变小,带宽减小。因此,选择 $h_1=8\text{ mm}$ 作为最终值。

l_{dipole} 可以反映天线间耦合电容的大小。图 4 表明,当 l_{dipole} 较小时,耦合电容小,天线向高频端匹配变好,而在低频端失配增大;相反,当 l_{dipole} 较大时,耦合电容过大,导致高频端失配。因此,选择合适的耦合电容,可以增加天线带宽,还可以使带内起伏变得平坦。

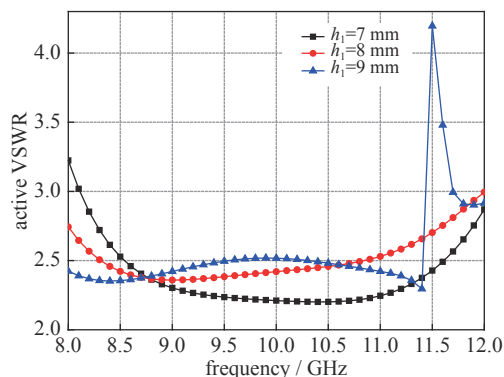


Fig. 3 The influence of h_1 values on TCDA VSWR

图 3 h_1 参数对 TCDA 驻波系数的影响

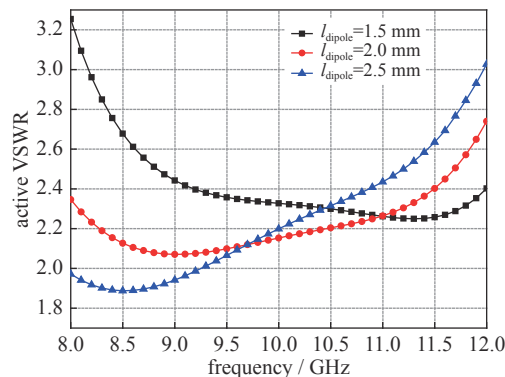


Fig. 4 The influence of l_{dipole} values on TCDA VSWR

图 4 l_{dipole} 参数对 TCDA 驻波系数的影响

为了实现高达 80° 的扫描角度,对所提出宽角匹配层进行参数优化。考虑到加工,水平覆层选用常用高频材料 RT6002 标准厚度 0.762 mm , $\epsilon_r=2.94$ 。需要注意的是,选用的电介质层若厚度过大或介电常数过高,均会激起表面波^[12]。垂直覆层由垂直贴片周期排列而成,可以实现与偶极子,巴伦共基板印刷,大大降低了重量及成本。以最大目标扫描角度 E 面 80° , H 面 70° 为基准,对垂直贴片间距 a_v , 宽度 b_v 及长度 l_v 三个参数进行优化,得到的最佳值见表 1。其中垂直覆层与电介质板的距离 g_h 对仿真结果影响非常小,因此可以允许稍大的误差存在,这给加工带来极大的便利。

表 1 优化参数值
Table 1 Optimized parameter values (mm)

d_E	d_H	w_{r1}	w_{r3}	w_{r2}	w_b	w_{d1}	w_{d2}	w_{d3}
8.0	8.0	0.45	0.52	0.19	1.56	0.7	0.7	1.0
a_v	b_v	l_v	t_h	l_d	g_h	h_1	h_2	w_r
1.0	1.0	3.0	0.762	2.0	1.0	8.0	2.69	1.8

2.2 天线特性仿真与分析

图 5 给出周期边界下无限阵列仿真结果,法向辐射时天线在 $8\sim 12\text{ GHz}$ 的频率范围内均可获得较好的阻抗匹配 ($\text{VSWR}<2$)。当天线进行波束扫描时,其驻波系数会随着扫描角发生改变。 E 面相扫时,可以看出在 87.5% 的带宽内,扫描角度高达 80° 时驻波仍小于 2。 H 面驻波变化形式一致,可以实现 70° 扫描 ($\text{VSWR}<3$)。如将驻波比放宽至 3.6,则可实现 E 面 85° 、 H 面 75° 的超宽角扫描。随着扫描角的增大, E 面高频处、 H 面低频处匹配变差,并且整个频带内驻波起伏变大。

图 6 给出使用 Ludwig 第三个定义^[13] 计算得到的 D 平面交叉极化电平。可以看出,在 75% 的带宽内,D 平面 45° 相扫时交叉极化电平低于 -15 dB ;而高频处,虽然交叉极化电平值有所增加,但仍低于 -10 dB ,是可以接受的。D 平面 60° 相扫时交叉极化电平值均低于 -10 dB ,优于理想的线性极化偶极子天线。

紧耦合天线阵由大量紧密排列的偶极子天线构成,为了加快仿真速度和节省计算资源,建立如图 7 所示无

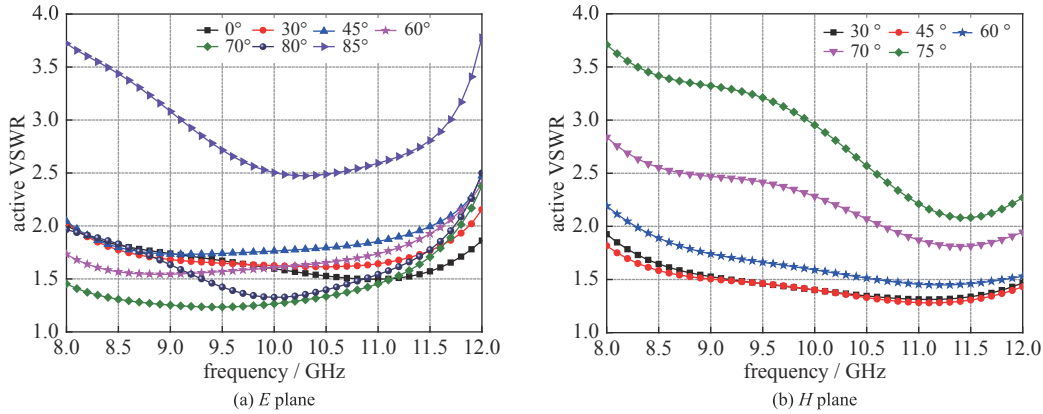


Fig. 5 Active VSWR characteristic curves of TCDA with WAIM

图 5 TCDA 加载 WAIM 时有源驻波系数特性曲线

限×有限阵列。有限维由 25 个元素组成，而无限维采用周期性边界条件，以达到近似全阵列仿真效果。阵列上方采用理想匹配层的边界条件，可以有效吸收阵列辐射。分别取 8, 10, 12 GHz 频点下对于 25×∞单元的行阵列与列阵列做波束扫描分析。波束激励幅度按照均匀直线阵设置，相位差

$$\Delta\varphi = 2\pi Df \sin(\theta_{\text{scan}})/c_0 \quad (1)$$

式中： D 为单元间距； f 为工作频率； θ_{scan} 为扫描角度； c_0 为自由空间波速。

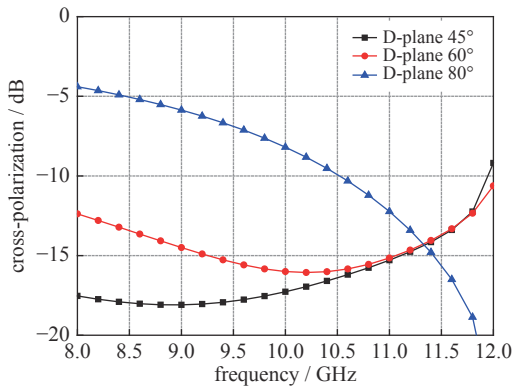


Fig. 6 Cross-polarization level along the diagonal plane

图 6 D 平面交叉极化电平

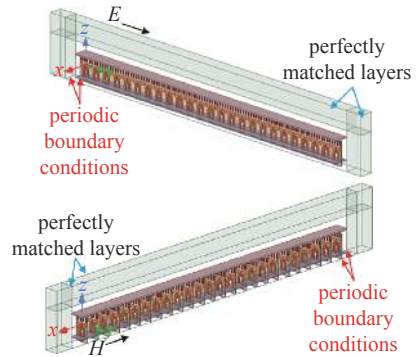


Fig. 7 25×∞ finite array

图 7 25×∞有限阵列

传统相控阵增益会随着扫描角的增大而降低，并且单元间互耦使得有源反射系数增加。当主瓣扫描至 60°时，增益下降 3 dB；扫描角超过 60°时，增益急剧下降；扫描至 80°时，增益下降 10 dB，严重限制了超宽角扫描。为了对比传统相控阵，图 8 给出 10 GHz 处阵列中心单元共面极化及交叉极化归一化实际增益方向图。可以看出方向图对称性较好，半功率波束宽度约有 120°；E 面 80°时实际增益下降约 5 dB，H 面 70°时实际增益下降约 4.25 dB。

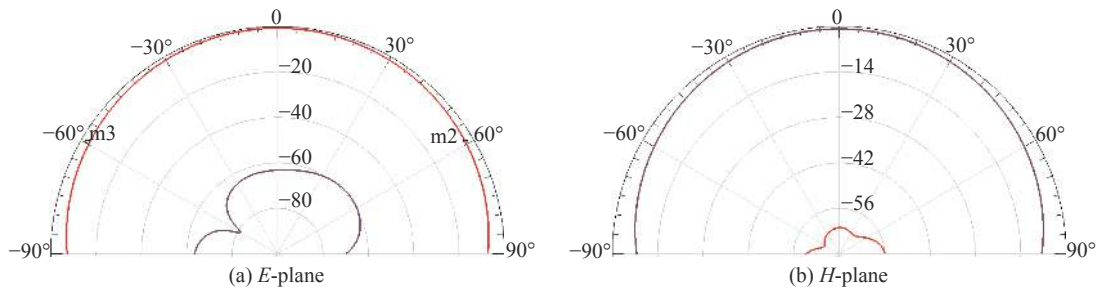


Fig. 8 Array center unit normalized realized gain pattern at 10 GHz

图 8 10 GHz 阵列中心单元归一化实际增益方向图

图 9 给出紧耦合天线阵相扫时归一化实际增益方向图，各频点处实际增益均与法向实际增益相归一化。可以看出 E 面 60°扫描时，实际增益下降在 3 dB 以内，当扫描角达到 80°时，峰值处增益下降约为 5.5 dB。H 面最大角

度 70° 扫描时, 增益下降在 4.5 dB 以内。对比可见, 紧耦合在实现超宽角扫描相控阵上具有非常大的优势。

同时在扫描波束范围内均未出现盲区, 共面极化与交叉极化相差约 20 dB, 保持了良好的交叉极化隔离。对于接近法向的扫描角, 旁瓣低于 -13 dB, 但对于较大的扫描角, 旁瓣略有增加。随着扫描频率的增大, 阵列尺寸与波长相比变大, 波束的宽度变窄, 方向性更好。

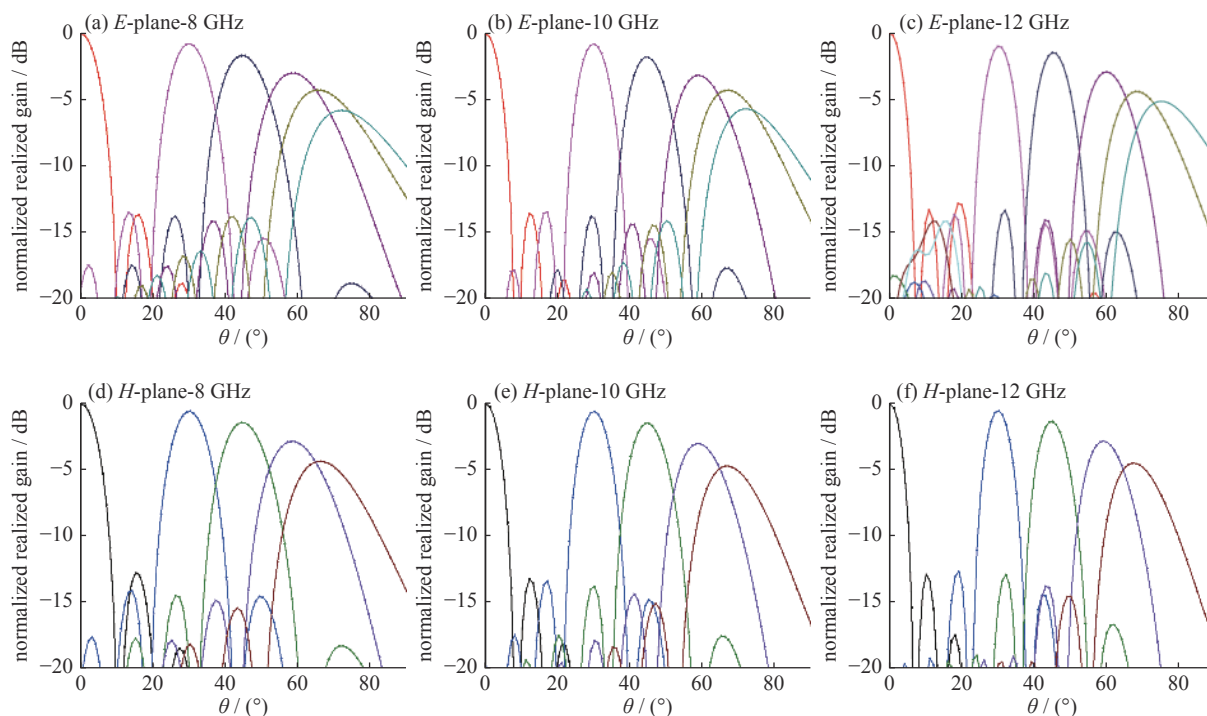


Fig. 9 $25 \times \infty$ finite array E and H plane radiation pattern

图 9 $25 \times \infty$ 阵列 E 平面和 H 平面辐射方向图

3 结论

紧耦合通常用于超宽带天线的设计, 在超宽角上研究的不是很多。本文提出一种紧耦合天线单元设计, 旨在实现 X 波段超宽角扫描。采用集成 Marchand 巴伦实现共基板印刷, 并在阵列口径上方加载垂直寄生覆层及水平电介质层来改善宽角扫描。最终实现 X 波段 E 面 80° 、 H 面 70° 超宽角扫描且有源驻波比小于 3 的性能指标。仿真 $25 \times \infty$ 阵列进行验证, 相扫过程中, 交叉极化始终低于 -20 dB, 旁瓣低于 -13 dB。综上, 所提出的 TCDA 设计满足宽带宽角扫描特性, 且结构简单, 易于加工制作, 在解决雷达相控阵天线全半球域扫描上具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] Munk B, Pryor J, Durham T, et al. A low-profile broadband phased array antenna[C]//Antennas & Propagation Society International Symposium. 2003: 448-451.
- [2] Cedric W L, Dimitris P, Asimina K, et al. Body-worn 67: 1 bandwidth antenna using 3 overlapping dipole elements[C]//11th European Conference on Antennas and Propagation. 2017: 1557-1558.
- [3] Xiao S, Yang S, C Y, et al. An ultra-wideband tightly coupled dipole array co-designed with low scattering characteristics[J]. *IEEE Trans Antennas and Propagation*, 2019, 67(1): 676-680.
- [4] Doane J. Wideband low-profile antenna arrays: fundamental limits and practical implementations[J]. *Dissertations & Theses-Gradworks*, 2013, 76(5): 265.
- [5] Holland S S, Vouvakis M N. The planar ultrawideband modular antenna (PUMA) array[J]. *IEEE Trans Antennas and Propagation*, 2012, 60(1): 130-140.
- [6] Elsallal M W, Mather J C. An ultra-thin, decade (10 : 1) Bandwidth, modular "BAVA" array with low cross-polarization[C]//IEEE International Symposium on Antennas & Propagation. 2011.
- [7] Lee M Y, Logan J T, Kindt R W, et al. Simplified design of 6:1 PUMA arrays[C]//IEEE International Symposium on Antennas & Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. 2015.
- [8] Papantonis D, Volakis J. Dual polarized tightly coupled array with substrate loading[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 325-328.
- [9] Zhou W, Chen Y, Yang S. Dual-polarized tightly coupled dipole array for UHF-X band satellite applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(3): 467-471.
- [10] Zhang H, Yang S, Chen Y, et al. Wideband dual-polarized linear array of tightly coupled elements[J]. *IEEE Trans Antennas and Propagation*, 2018, 66(1): 476-480.

- [11] Yetisir E, Ghalichechian N, Volakis J L. Ultrawideband array with 70° scanning using FSS superstrate[J]. *IEEE Trans Antennas and Propagation*, 2016, 64(10): 4256-4265.
- [12] Novak M H, Volakis J L. Ultrawideband antennas for multiband satellite communications at UHF-Ku frequencies[J]. *IEEE Trans Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1334-1341.
- [13] Ludwig A C. The definition of cross polarization[J]. *IEEE Trans Antennas and Propagation*, 1973, 21(1): 116-119.

《强激光与粒子束》持续保持中国科技核心期刊收录

据 2019 年 11 月中国科学技术信息研究所发布的《2019 年版中国科技期刊引证报告（核心版）自然科学卷》，由中国工程物理研究院主办的期刊《强激光与粒子束》在“核科学技术类”期刊中核心总被引频次排名第 1，核心影响因子排名第 3，综合评价总分排名第 2。在全部 2049 种核心期刊中的综合评价总分排第 349 位。

核科学技术类期刊主要指标

刊名	核心总被引频次		核心影响因子		综合评价总分	
辐射防护	314	5	0.228	7	33.7	8
辐射研究与辐射工艺学报	209	7	0.519	1	60.6	1
核动力工程	720	3	0.213	8	40.1	5
核化学与放射化学	191	8	0.286	5	35.5	7
核技术	612	4	0.373	2	51.3	3
核科学与工程	279	6	0.205	9	20.5	10
强激光与粒子束	1782	1	0.358	3	57	2
同位素	146	9	0.353	4	43.3	4
原子核物理评论	129	10	0.082	10	31	9
原子能科学技术	993	2	0.243	6	39.1	6
10种期刊平均值	538		0.286			

2019 年 11 月
《强激光与粒子束》编辑部