

文章编号: 2095-4980(2021)02-0265-06

一种低剖面紧耦合超宽带天线设计

刘腾元, 杜宝晨, 屈晓斌

(中国船舶集团有限公司 第八研究院, 江苏 南京 211106)

摘要: 设计一种新型紧耦合天线阵列(TCA)。该阵列单元采用平面蝶形偶极子, 利用单元之间的耦合效应以达到展宽天线频带的效果。通过在天线阵列与导体接地板之间加载阻性频率选择表面(RFSS)来抑制导体接地板对天线造成的短路点, 进一步增加阻抗匹配带宽。本文设计寄生层以代替传统的介质板宽角匹配层, 大大降低天线的剖面高度及质量, 改善阵列的扫描特性。仿真实验结果表明: 设计的紧耦合阵列在 1.5~14 GHz 频带内有良好的阻抗匹配(电压驻波比(VSWR)<2), 可实现 *E* 面、*H* 面 45° 宽角扫描。

关键词: 紧耦合; 低剖面; 频率选择表面; 超宽带; 阻抗匹配; 寄生层

中图分类号: TN822

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019449

Design of a low-profile tightly coupled ultra-wideband antenna

LIU Tengyuan, DU Baochen, QU Xiaobin

(No.8 Research Institute of CSSC, Nanjing Jiangsu 211106, China)

Abstract: A novel Tightly Coupled Array(TCA) is proposed in this paper. The array element is made of bow-tie dipole, and the array realizes ultrawideband by increasing the coupling between the units. By loading Resistive Frequency Selective Surface(RFSS) between array and ground plane, the antenna short-circuit point can be suppressed, and the impedance matching bandwidth can be increased significantly. In addition, the parasitic layer is designed to replace traditional dielectric-slab wide-angle matching layer, which makes the height and weight of the antenna are greatly reduced and the scanning characteristics of the array are improved. The simulation results show that the antenna achieves 1.5–14 GHz bandwidth for Voltage Standing Wave Ratio(VSWR)<2, and realizes 45° scanning range at *E*-plane and *H*-plane.

Keywords: tightly coupled; low profile; frequency selective surface; ultra-wideband; impedance-matching; parasitic layer

目前无线通信和雷达技术快速发展, 天线作为重要的组成部分, 对其有了更高的要求, 小型化、超宽带、低剖面^[1]、一体化逐渐成为了发展方向, 而传统的阵列天线并不能很好地满足这些条件。有国外学者提出基于紧耦合技术的阵列天线^[2]。与传统的宽带天线阵列不同, 紧耦合阵列天线是有效利用单元之间的强耦效应来拓展天线带宽, 并且具有加工简易、宽角扫描、易于共形的优点, 使其在无线通信及小型化雷达设计应用中有着良好的发展前景^[3]。

紧耦合阵列天线的理想模型是 WHEELER^[4]在 1965 年提出的连续电流片(Continuous Current Sheet Array, CCSA)。之后 MUNK 等^[5]在此基础上, 最早设计了以偶极子天线为单元的紧耦合阵列, 并实现了 9:1 的阻抗带宽。通过进一步研究发现, 当阵列与接地板之间的距离为工作波长的一半时会引起短路效应, 限制阻抗带宽的拓展。为了实现阵列的宽角扫描特性, 通常在阵列上方加载单层或多层介质板作为宽角匹配层。宽角匹配层往往会增加天线的剖面高度和质量, 不利于小型化设计。

为解决以上 2 个问题, 设计了一种新型紧耦合阵列天线。天线单元采用蝶形偶极子, 通过偶极子末端相互交叠产生耦合电容, 达到 3.7:1 的宽带阻抗匹配。为进一步拓展带宽, 在接地板与阵列之间加载单层阻性频率选择表面(RFSS)^[6], 以消除接地板在特定频段所引起的短路效应。同时, 根据文献[7–8]中所设计的引向层结构, 本文

收稿日期: 2019-11-03; 修回日期: 2020-01-05

作者简介: 刘腾元(1993–), 男, 硕士, 主要研究方向为相控阵天线. email:ltytoyork@163.com

设计金属贴片寄生层代替介质板宽角匹配层,极大地降低了天线的剖面高度。使用高频电磁仿真软件 Ansoft HFSS 对所设计紧耦合阵列天线进行建模仿真,设计的紧耦合阵列具有 9.3:1 的阻抗匹配带宽(1.5~14 GHz), E 面 45° , H 面 45° 扫描范围,并在 2.8~9 GHz 的频带内可实现 E 面、 H 面 60° 的扫描。此外,阵列剖面高度仅为 $0.15 \lambda_t$,其低剖面平面化的设计相比传统阵列天线更加有利于共形设计。

1 紧耦合阵列基本原理

紧耦合阵列的结构如图 1 所示,从图中可以看出,紧耦合阵列天线与传统阵列天线不同,其单元紧密排列,使得相邻阵元之间产生很强的耦合电容 C ,而每个阵元可以等效为电感 L ,阵列距离接地板的高度为 h 。根据传输线理论,得到紧耦合阵列的等效电路图如图 2 所示。从图中得到,阵列的输入阻抗 Z_{in} 为:

$$Z_{in} = j\omega L + 1 / (j\omega C) + (Z_{GP}\eta_0) / (Z_{GP} + \eta_0) \tag{1}$$

式中: η_0 为自由空间的特性阻抗,约等于 377Ω ; Z_{GP} 为阵元对地等效阻抗^[9]; ω 为角频率。 Z_{GP} 可以表示为:

$$Z_{GP} = j\eta_0 \tan(2\pi h / \lambda) \tag{2}$$

当天线在较低频工作时,阵列与接地板之间的距离 $h < \lambda/4$,由式(2)可知 Z_{GP} 呈感性。此时,阵元之间的耦合电容 C 可以与感性电抗 Z_{GP} 和阵元自身等效电容 L 相互抵消,使得天线输入阻抗 Z_{in} 近似为一个纯电阻,从而让天线的阻抗匹配带宽向低频拓展。同理,当天线在较高频工作时,阵列与接地板之间的距离 $h > \lambda/4$, Z_{GP} 呈容性。此时,阵元之间的耦合电容 C 与容性电抗 Z_{GP} 相叠加,使得天线输入阻抗 Z_{in} 在高频频段失配,降低了高频段的截至频率。根据文献[10]可知,耦合效应对低频段影响较大,对高频段影响较小。因此,天线的总体带宽有所增加。

2 阵列单元设计

本文首先设计了一种未加载阻性频率选择表面的紧耦合阵列单元,其结构如图 3~图 4 所示。该阵列单元最上层为中间填充泡沫的寄生层,寄生层下方为蝶形偶极子,偶极子的两臂分别印刷在介质基板两侧,图中黑色结构代表印刷在正面的偶极子臂,灰色结构表示印刷在背面的偶极子臂。左右相邻的偶极子末端相互交叠,形成长度为 $2h_1$,宽度为 w 的平行耦合电容结构。其中介质基板选择介电常数为 3.55 的 Rogers4003,馈源为理想集总端口。与文献[11]中所采用的阵列单元相比,蝶形偶极子结构简单,且其馈电巴伦容易设计,更加有利于工程实现。阵列单元的寄生层为 2 个印刷在介质薄膜上的矩形金属贴片,长和宽分别为 b, a ,介质薄膜的厚度可以忽略不计,寄生层距离偶极子高度为 t 。相比于传统的介质基板宽角匹配层,寄生结构的设计减小了天线的剖面高度,有利于小型化设计。

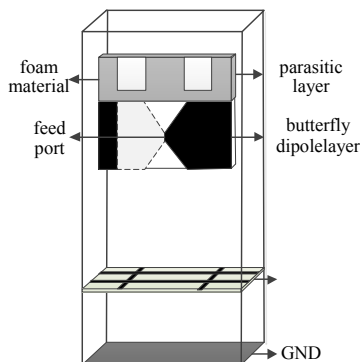


Fig.3 3D model of element without RFSS
图3 未加载阻性频率选择表面紧耦合阵列单元3D模型

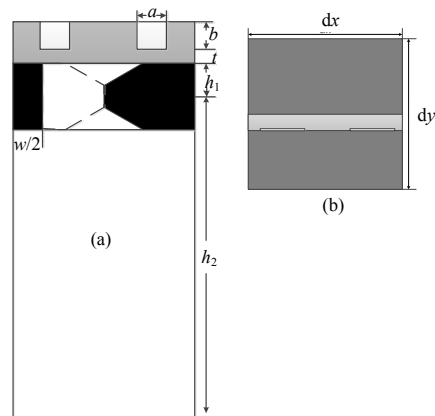


Fig.4 Front view of TCA(a); vertical view of TCA (b)
图4 TCA正视图(a);俯视图(b)

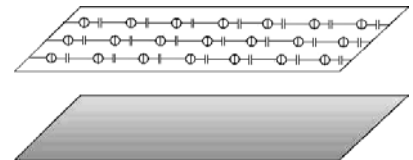


Fig.1 Structure of TCA
图1 紧耦合阵列结构

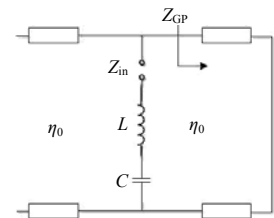


Fig.2 Equivalent circuit of TCA
图2 紧耦合阵列等效电路

本文使用高频电磁仿真软件 Ansoft HFSS 对所设计的紧耦合阵列单元建模, 并对阵列单元的结构参数进行仿真优化, 得到主从边界条件下的不同结构参数对无限大阵列驻波系数的影响, 如图 5~图 7 所示。图 5 为阵列与接地板之间的距离 h_2 对天线驻波系数的影响, 图中仿真结果表明: 当 h_2 较小时, 天线最低截止频率较大, 在低频段加速失配; 而当 h_2 较大时, 天线最高截止频率较小, 在高频端匹配性能变差。因此, 本文选择阵列到接地板的距离 $h_2=22$ mm。图 6 为寄生层与阵列之间的距离 t 对天线驻波系数的影响, 图中仿真结果表明: t 主要影响天线高频段的驻波系数, 当 t 较小时, 最高截止频率右移, 匹配带宽增大。且为了低剖面设计, 在不影响天线匹配与辐射特性的前提下, t 取最小值。本文根据设计仿真结果, 选择 $t=0.5$ mm。图 7 为蝶形偶极子上下两臂交叠宽度 w 对天线驻波系数的影响, 图中仿真结果表明: w 较小时, 阵列耦合电容较小, 根据式(1)天线在低频段加速失配; 当 w 较大时, 阵列耦合电容变大, 天线在高频段输入阻抗容性增大, 截止频率下降。因此阵列耦合电容的大小对阻抗带宽影响较大, 本文根据仿真优化, 选择 $w=4$ mm。

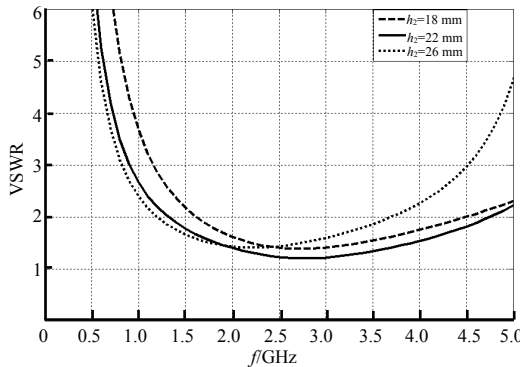


Fig.5 VSWR varying with h_2
图 5 驻波系数随阵列距接地板高度变化

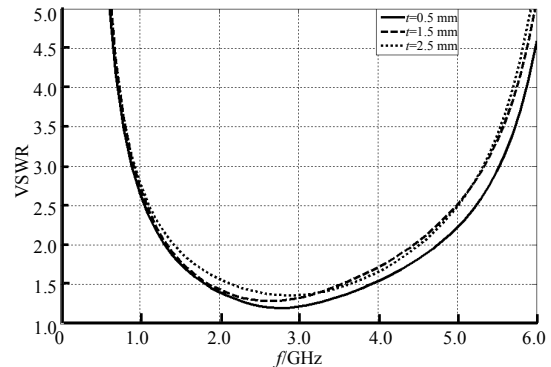


Fig.6 VSWR varying with t
图 6 驻波系数随寄生层与阵列之间的距离变化

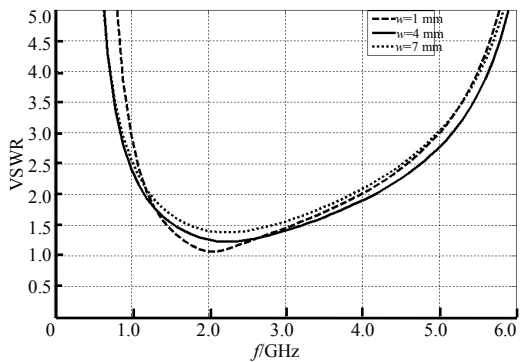


Fig.7 VSWR varying with w
图 7 驻波系数随偶极子两臂交叠大小变化

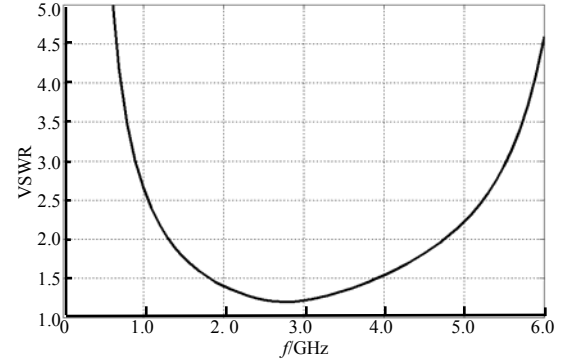


Fig.8 VSWR of TCA
图 8 紧耦合阵列驻波系数

利用 Ansoft HFSS 对阵列单元参数仿真优化后的结果如表 1 所示。根据表 1 的单元参数, 仿真得到无限大阵列驻波系数如图 8 所示。从图中可得, 本文设计的紧耦合阵列在未加载阻性频率选择表面时的最佳阻抗带宽(VSWR<2)为 3.7:1(1.3~4.8 GHz)。

已知当 $h_2 = \lambda/2$ 时会引起接地板短路效应, 天线在此波长对应频段失配, 限制了带宽。为了进一步拓展阻抗带宽, 本文设计了一种 RFSS 来消除接地板引起的短路效应, 其结构如图 9 所示。RFSS 为“#”型的电阻膜印刷在介电常数为 3.55 的 Rogers4003 介质基板上, 厚度 $l=0.5$ mm, 周期 $d=9$ mm, 选择电阻膜宽度 $s=0.4$ mm, 方阻 $R_S=40 \Omega$ 。使用 HFSS 将此 RFSS 与接地板结合建模仿真, 当 RFSS 与接地板之间的距离为 8 mm 时, 得到的 S_{11} 曲线如图 10 所示, 从图中得出, 所设计的 RFSS 在 3.8~14.2 GHz 频率范围内反射系数小于 0.6, 可以抑制接地板的短路效应, 拓展紧耦合阵列带宽。

表 1 紧耦合阵列单元参数(单位: mm)

Table 1 Element parameters of TCA(unit:mm)							
parameters	dx	dy	h_1	h_2	w	t	a b
numerical value	9	9	4	22	4	0.5	3 3

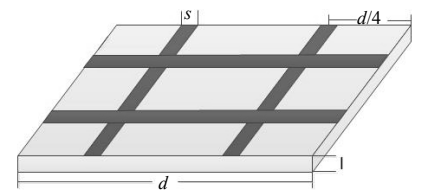


Fig.9 Structure of RFSS
图 9 RFSS 结构

3 阵列仿真与分析

将设计的 RFSS 加载于紧耦合阵列单元, 如图 11 所示。使用 HFSS 中的主从边界条件模拟无限大紧耦合阵列, 仿真得到其特性曲线如图 12 所示, 图中仿真结果表明: 加载 RFSS 的紧耦合阵列在 1.5~14 GHz 的频率范围内有着良好的阻抗匹配特性($VSWR < 2$), 阻抗带宽可达 9.3:1。根据阵列天线理论可知: 天线的驻波系数会随着其扫描角的变化而改变, 仿真得到天线在扫描时的驻波系数如图 13~图 14 所示。结果表明: 随着扫描角度的增大, 驻波系数在频段内变化较大。在 E 面扫描时的驻波系数如图 13 所示, 在 45° 的扫描角范围内, 驻波系数均小于 2.5。当扫描到 60° 时阻抗在高低频失配, 驻波系数在 2.8~9 GHz 频段内小于 3, 阻抗匹配带宽为 3.2:1。在 H 面扫描时的驻波系数如图 14 所示。在 30° 的扫描角范围内, 驻波系数均小于 2。当扫描角为 45° 时, 在 1.5~13 GHz 频段范围内, 驻波系数小于 2.5。当扫描到 60° 时, 阻抗在高频端加速失配, 在 1.5~9.3 GHz 频段范围内驻波系数小于 3。设计的紧耦合阵列可以实现 E 面和 H 面 45° 的扫描特性, 且在 2.8~9 GHz 范围内, E 面、 H 面 60° 扫描时驻波系数小于 3, 实现了宽角扫描特性。

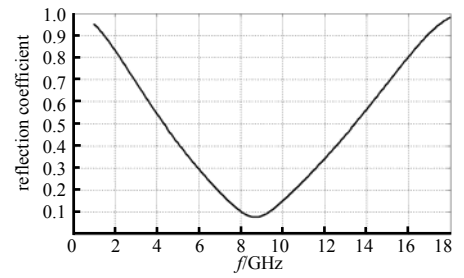


Fig.10 Reflection curves of RFSS
图 10 RFSS 的反射曲线

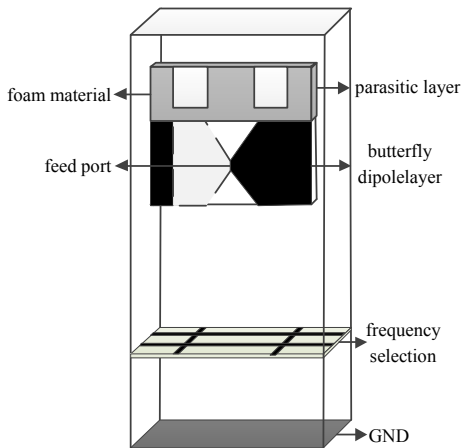


Fig.11 Element of TCA with RFSS
图 11 加载 RFSS 的紧耦合阵列单元

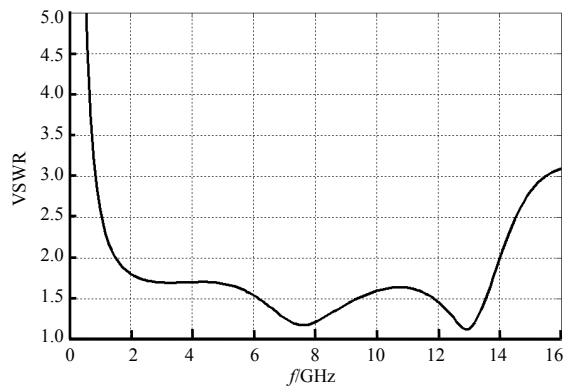


Fig.12 VSWR of TCA with RFSS
图 12 加载 RFSS 紧耦合阵列驻波系数

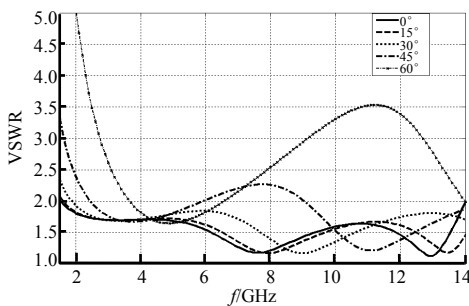


Fig.13 VSWR of E -scan
图 13 E 面扫描时驻波系数

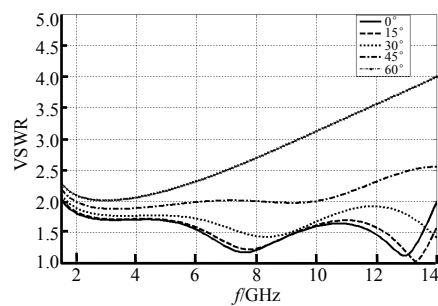


Fig.14 VSWR of H -scan
图 14 H 面扫描时驻波系数

使用上述阵列单元在电磁仿真软件中构建 10×10 紧耦合阵列模型, 该阵列的尺寸为 $90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 27.3 \text{ mm}$, 具体结构如图 15 所示。

图 16 为仿真得到的阵列在不同频点的远场辐射图。图中仿真结果表明: 随着工作频率的增加, 主瓣宽度越来越窄, 增益越来越大, 方向性越来越好。在 2 GHz 时, 阵列方向图很宽, 类似于加载接地板的偶极子辐射方向图, 增益约为 5 dB。在 6 GHz 时, 天线半功率波束宽度约为 40° , 增益为 10.6 dB。在 10 GHz 时, 半功率波束宽度为 14° , 增益为 17.3 dB, 但阵列副瓣与后瓣较大, 辐射性能较差。在 14 GHz 时, 半

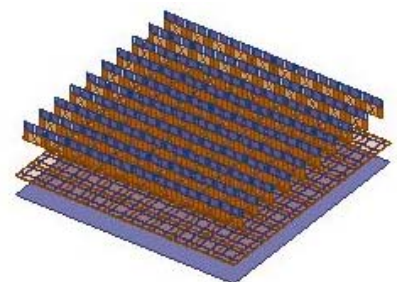


Fig.15 10×10 TCA
图 15 10×10 紧耦合阵列

功率波束宽度为 6.2° ，天线增益为 18.3 dB，且副瓣低，方向图较好。即当工作频率升高时，阵列电尺寸变大，辐射性能变好。阵列扫描方向图如图 17 所示。从图中可以看出，阵列在 2 GHz, 8 GHz, 14 GHz 时均可实现 $\pm 30^\circ, \pm 45^\circ$ 波束指向且指向性良好。因此，本文所设计的紧耦合阵列满足宽角扫描特性，适用于相控阵系统。

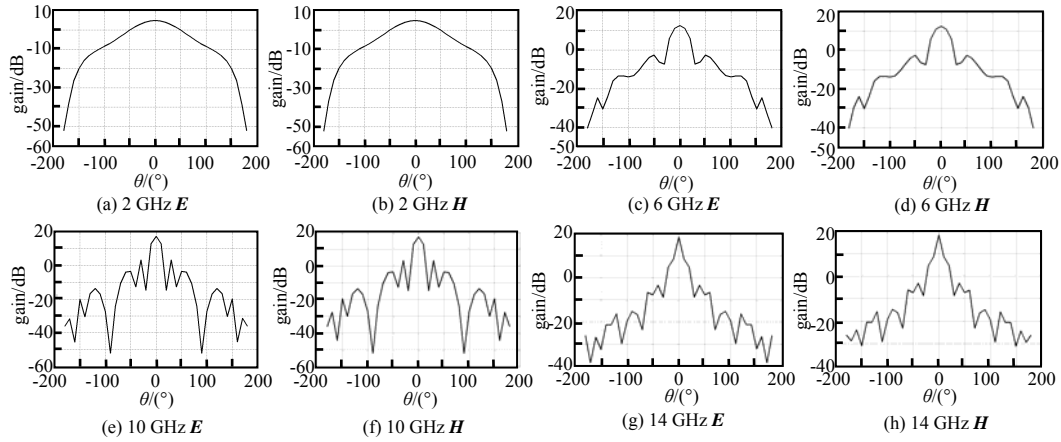


Fig.16 Radiation pattern of TCA

图 16 阵列辐射方向

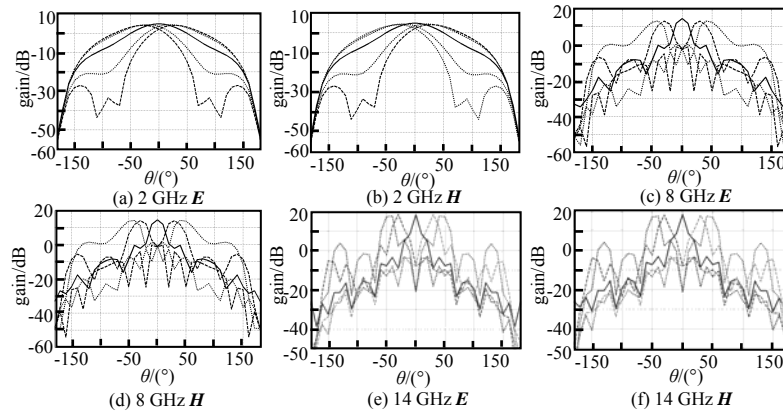


Fig.17 Scan pattern of TCA

图 17 阵列扫描方向

4 结论

本文首先设计了一种基于紧耦合结构的低剖面超宽带阵列天线，分析了天线参数对其性能的影响，使其在 1.3~4.8 GHz 频段内具有良好的阻抗匹配。为了改善紧耦合阵列与接地板的匹配问题，设计 RFSS 加载于阵列与接地板之间，进一步拓展了带宽性能，使阵列达到了 9.3:1 的阻抗匹配带宽。其次，将传统介质板宽角匹配层用所设计的金属贴片寄生层代替，减小了天线的体积和质量，剖面高度仅为 $0.15 \lambda_L$ ，并且在 1.5~14 GHz 频段内可实现 E 面、 H 面 45° 的扫描及 2.8~9 GHz 频段内 E 面、 H 面 60° 扫描，在未来雷达及通信领域有着很高的工程利用价值。

参考文献：

- [1] 朱文静,张海平,赵鹏,等. 低剖面宽带圆极化天线阵列[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(4):622-624. (ZHU Wenjing, ZHANG Haiping,ZHAO Peng,et al. Low-profile broadband circularly polarized antenna array[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(4):622-624.)
- [2] MUNK B A. Finite antenna arrays and FSS[M]. New York:Wiley, 2003.
- [3] HOLL S S,SCHAUBERT D H,VOUVAKIS M N. A 7-21 GHz dual-polarized planar ultra-wideband modular antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(10):4589-4599.
- [4] WHEELER H A. Simple relations derived from a phased-array antenna made of an infinite current sheet[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1965,13(4):506-514.

- [5] MUNK B,TAYLOR R,DURHARN T,et al. A low-profile broadband phased array antenna [C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Columbus,Ohio,USA:IEEE, 2003:448–451.
- [6] 王晓骁,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(8):123–125. (WANG Xiaoxiao, ZHANG Shuai. An ultra-wideband tightly coupled phased array with resistive FSS[J]. Journal of Microwaves, 2016(8): 123–125.)
- [7] 陈益凯. 基于四维天线理论和强互耦效应的阵列天线技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (CHEN Yikai. Studies on the antenna arrays based on four dimensional antenna theory and strong mutual coupling effect[D]. Chengdu,China: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [8] ERSIN Y,NIAM G,JOHN L. Ultrawideband array with 70° scanning using FSS superstrate[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2016,64(10):4256–4265.
- [9] MOULDER W F,SERTEL K,VOLAKIS J L. Super-strate-enhanced ultrawideband tightly coupled array with resistive FSS[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(9):4166–4172.
- [10] 李记任,孙磊. 一种超宽带紧耦合阵列天线单元设计[J]. 现代雷达, 2017,39(2):74–78. (LI Jiren,SUN Lei. Design of an ultra-wide band tightly coupled antenna array antenna element[J]. Modern Radar, 2017,39(2):74–78.)
- [11] STEVEN S,MARINOS N. The planar ultrawideband modular antenna array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(1):130–140.

(上接第 260 页)

- [16] 刘晓娣,周新力,金慧琴. 抛物方程的动态网格模型及其应用[J]. 电光与控制, 2017,24(6):88–90. (LIU Xiaodi,ZHOU Xinli,JIN Huiqin. Dynamic grid model of parabolic equation and its application[J]. Electronic Optics & Control, 2017,24(6): 88–90.)
- [17] 胡绘斌. 预测复杂环境下电波传播特性的算法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006. (HU Huibin. Algorithms on predicting characteristics of radio propagation in complex environments[D]. Changsha,China:National University of Defence and Technology, 2006.)