

文章编号: 2095-4980(2017)04-0640-06

24 GHz 微带阵列天线设计与实现

孙元¹, 胡欣², 廖鹏¹, 王昌¹, 孙梧雨¹

(1.西南科技大学 国防科技学院, 四川 绵阳 621010; 2.四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 根据矩形贴片的腔膜理论, 以 Rogers(5880)作为介质基板材料, 设计了中心频点在 24 GHz 的贴片结构, 用数值仿真方法进行了研究; 按照阻抗匹配和天线增益要求, 借助 Matlab 和 ADS 软件, 设计了功分网络; 最后采用 HFSS 软件对 6×14 微带阵列天线进行了系统仿真, 计算了该天线阵的增益、带宽、电压驻波比、方向图等参数, 并在中物院 5 所微波暗室平台进行测试, 各参数都达到要求。

关键词: 微带天线; 功率分配; 相控阵技术

中图分类号: TN821⁺.8

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0640

Design and implementation of 24 GHz microstrip antenna array

SUN Yuan¹, HU Xin², LIAO Peng¹, WANG Chang¹, SUN Wuyu¹

(1.School of National Defense Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;
2.School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: A microstrip antenna array is designed based on the theory of cavity and mode of rectangular patch. The array is constructed on the Rogers(5880) as dielectric substrate material; and operating center frequency is 24 GHz. Research is conducted by using electromagnetic simulation software, such as A Dissertation Submitted(ADS), High Frequency Structure Simulator(HFSS), as well as Matrix Laboratory(MATLAB) programming. According to the requirements of antenna's impedance match and gain, a power divider network is also designed. Finally, the microstrip antenna array with 6×14 units is simulated by using the HFSS software, some core parameters of the array including in gain, bandwidth, voltage standing wave ratio, and emission patterns, are obtained. Fabricated sample is tested in the platform of microwave dark room of Institute of Electronic Engineering in China Academy of Engineering Physics. Results are in very good agreement with requirements.

Keywords: microstrip antenna; power divider; phased array technology

毫米波具有波长短、穿透力强、分辨力高等优点, 一直是世界各国关注的研究热点^[1-6]。天线作为毫米波收发系统的重要组件, 对系统性能起决定作用。作为毫米波天线的首选, 低成本、高效率微带阵列天线已成为毫米波关键技术。微带阵列天线具有频率高、尺寸小、阵元数量多、功率分配网络复杂等特殊特性, 仅靠理论分析几乎不可能得到解析解, 这给设计工作带来极大挑战; 靠反复实验修正设计势必带来开发周期长、费用高等问题。面对难于计算和工程实现的诸多问题, 仿真技术应运而生。在电磁计算和仿真领域, HFSS, CST, ADS 等软件, 其仿真结果与实验测试结果高度吻合, 已成为天线设计首选工具, 得到行业的广泛认可。

微带天线因为其成本低的独特优势, 在仅仅需要少量资金的情况下就可以对微带贴片天线技术进行更加仔细深入的研究。经过近几十年来的努力深入探讨, 微带天线的许多问题已被认识清楚并得到解决, 但是还有一些技术难以攻克, 比如微带天线的小型化、高增益、宽频带、多功能、高性能等技术问题, 所以在以后的发展过程中, 在微带贴片天线这个领域里还将拥有广阔的发展前景。微带天线的辐射单元大致可以划分为以下 4 种: 微带贴片天线、微带行波天线(也叫微带线型天线)、微带振子天线以及微带隙缝天线。上述的微带辐射单元作为基本单元

收稿日期: 2017-03-01; 修回日期: 2017-04-15

基金项目: 四川省大学生创新创业训练计划资助项目(201610619048, 201610619047, 201710619077); 四川省科技创新苗子工程重点基金资助项目(2017RZ0058); 绵阳市科技计划基金资助项目(16G-01-13); 四川省科技创新苗子工程培育基金资助项目(2016012); 四川省教育厅重点实验室基金资助项目(16zd1121); 西南科技大学大学生创新基金项目精准资助专项(jz17-082 & jz17-84)

进行测试时,它的增益仅仅只能达到 3 dB 左右。但是如果把这些微带辐射单元组成微带天线阵列,比如微带贴片阵、微带缝隙阵以及微带振子阵等平面阵列天线,就可以获得更高的增益以及更好的方向性。进入 21 世纪以来,在约 100 MHz 至 100 GHz 的宽广频域上,微带天线正以其独特的优点得到越来越广泛的应用。国内外相关研究^[7-13],采用天线阵列方法所设计的天线,增益、功耗等各项指标不均衡。本文通过深入研究,设计出了一款 24 GHz 微带阵列天线,其阵元数目少,功耗低,增益高,体积小,更便于集成化,可作为 24 GHz 车载毫米波防撞雷达系统的前端毫米波微带天线单元以及阵列。

1 矩形微带天线的特性参数

1.1 微带辐射贴片尺寸估算

如果要设计一个微带天线,首先需要考虑的是介质基片的选取。设介质的介电常数为 ε_r ,对于工作频率为 f_0 的矩形微带天线,利用式(1)确定单元宽度 W ,即为:

$$W = \frac{c}{2f_0} \left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: c 是光速; f_0 是中心频率。

辐射贴片的长度一般取为 $\lambda_c/2$,这里的 λ_c 是介质内的导波波长,即为:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_0 \sqrt{\varepsilon_e}} \quad (2)$$

$$L = L_c - 2\Delta L = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_r} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_0} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_e}} - 2\Delta L \quad (3)$$

式中: ε_e 是有效介电常数; ΔL 是等效辐射缝隙长度。它们可以分别用下式计算,即为:

$$\Delta L = 0.412 \frac{(\varepsilon_e + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\varepsilon_e - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (4)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12W/h \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中 ε_e 为有效介电常数。

介质基板尺寸的确定:

$$\begin{cases} LG = L + 0.2\lambda_g \\ WG = W + 0.2\lambda_g \end{cases} \quad (6)$$

1.2 微带天线的辐射场

矩形微带天线可以视作一段长 L 为 $\lambda/2$ 的低阻抗微带传输线,它的辐射场被认为是由传输线 2 段开路处的缝隙所形成的。因此,矩形微带天线可以等效为长 w 、宽 h 、间距为 L 的二元缝隙天线阵。

单个缝隙天线的方向函数为:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin\theta \cos\varphi\right)}{\frac{kh}{2} \sin\theta \cos\varphi} \frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \cos\theta\right)}{\frac{kw}{2} \cos\theta} \sin\theta \quad (7)$$

因此,矩形微带天线的辐射场只需在单缝隙天线的表达式中乘以二元阵的阵因子就可以了。这样,矩形微

$$\text{带天线的方向性函数可以表示为: } F(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin\theta \cos\varphi\right)}{\frac{kh}{2} \sin\theta \cos\varphi} \frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \cos\theta\right)}{\frac{kw}{2} \cos\theta} \sin\theta \cos\left(\frac{kL}{2} \cos\varphi\right) \quad (8)$$

工程设计关心较多的是 E 面($\theta=90^\circ$)和 H 面($\varphi=90^\circ$)方向图, 于是由式(2)~式(8)可得 E 面的方向性函数为:

$$F_E(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{kh}{2}\cos\varphi\right)}{\frac{kh}{2}\cos\varphi} \cos\left(\frac{kL}{2}\cos\theta\right) \quad (9)$$

H 面的方向性函数为:

$$F_H(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{kW}{2}\cos\theta\right)}{\frac{kW}{2}\cos\theta} \sin\theta \quad (10)$$

1.3 方向性系数

天线的方向性系数 D 是指在远场区的某一球面上天线上的辐射强度与平均辐射强度之比。根据方向性系数的定义, 可以给出微带天线的方向性系数为:

$$D = \frac{8}{I} \left(\frac{\omega\pi}{\lambda} \right)^2 \quad (11)$$

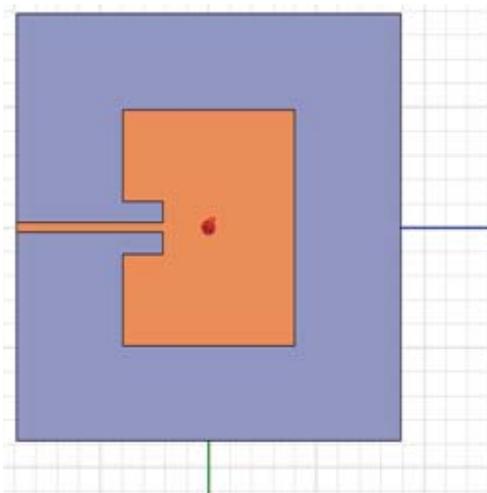


Fig.1 Single element model
图 1 单个阵元模型

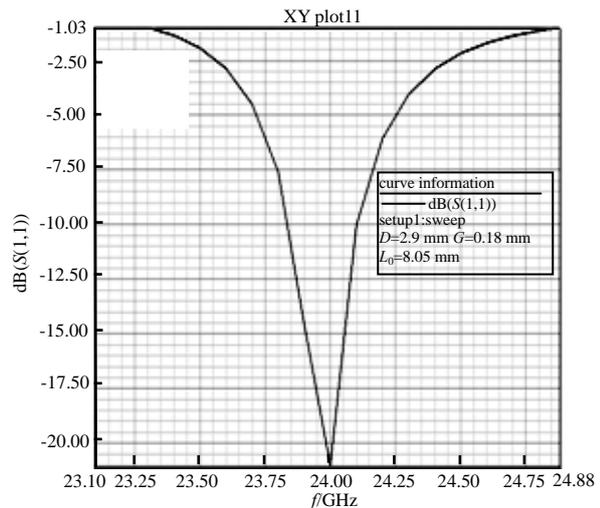


Fig.2 S_{11} sweep analysis results
图 2 S_{11} 扫频分析结果

2 天线仿真与设计

2.1 单个阵元电磁仿真模型

从前面的天线理论可知, 得到图 1 所示单阵元时天线达到最佳性能。图 2 为该参数下的 S_{11} 扫频分析结果, 由图 2 可知, 此时谐振频率为 24 GHz。且在谐振频率为 24 GHz 处, S_{11} 值约为 -21 dB。综上满足设计要求, 可以将其作为阵列的基本单元。

对于多个阵元, 需要根据天线馈电电流、间距、电长度等不同参数来构成阵列, 以获取最好的辐射方向性。

2.2 功分网络模型的设计

根据天线对波束方位角、设计频率等相关要求设计功分网络。首先理论计算初值, 重点考虑阵元数量、各个阵元功率分配比, 以及输入匹配等影响平面阵列天线整体性能的功分网络参数。理论计算: 功分网络设计中, 考虑对天线方向角 E 面和 H 面角度要求, 设计适当的功分网络结构, 确定功分网络输入谐振频率、频率带宽、分配到各个阵元的功率比, 保证各个阵元相位一致性等, 用于下一步天线综合中功分网络初值要求。

通过 ADS 对功分网络的计算,可以计算得到 14×6 阵元(或者任意其他数量元)的功分网络参数初值(如图 3 所示),以用于在仿真软件中的优化及验证。

2.3 天线综合仿真设计

该天线由 2 副相同天线实现信号的一发一收。需要在带有导体接地板的介质基片上贴加导体薄片而形成辐射体;利用多个辐射体结构设计以及延时功分网络形成特定波束和指标要求的微带阵列天线,如图 4 所示。

图 5 为 3 dB 带宽内增益,由图 5 可知波束宽带、旁瓣抑制、增益仿真结果:a) 方位约 16° ,俯仰约 6° ;b) 旁瓣抑制大于 $18 \sim 25$ dB;c) 在中心频点 3 dB 带宽内,增益大于 23 dB。上述结果都满足天线设计指标要求。

3 天线加工与测试

图 6 为本次设计作品的实物图——微带阵列收发互易天线。该天线由 $84(6 \times 14)$ 个阵元构成,达到国外同等水平的情况下,所需的阵元数目少,成本低,功耗小,更便于集成化,有着广阔的市场前景。

在微波全暗室对天线进行全面测试过程中,以增益为 24 dB 的喇叭天线为基准,对本次设计的 24 GHz 的微带阵列天线进行测量。从上述结果报告中可以看出,本次设计的天线 E 面、 H 面(如图 7,8 所示)增益在 200 MHz 带宽内都达到了 25 dB 以上,达到了总体设计要求。

对比仿真结果与测试结果,如图 5、图 7 以及图 8 所示,测试结果俯仰角与带宽增益都与仿真结果保持一致,结果表明本设计有效,设计达到了天线指标要求。

4 结论

本文在深入调研电磁场及天线理论、微带贴片及相控阵技术、ADS 功分网络设计、HFSS 器件综合仿真方法的基础上,根据矩形贴片的腔膜理论,以 Rogers(5880)作为介质基板材料,设计了一款中心频点在国家开发频点——24 GHz 车载毫米波防撞雷达系统的前端毫米波微带天线单元以及阵列。

近些年来,交通问题已经成为影响社会经济发展以及人民生活安全的一项重大问题。为了能够有效地降低交通事故的发生率以及保护人身安

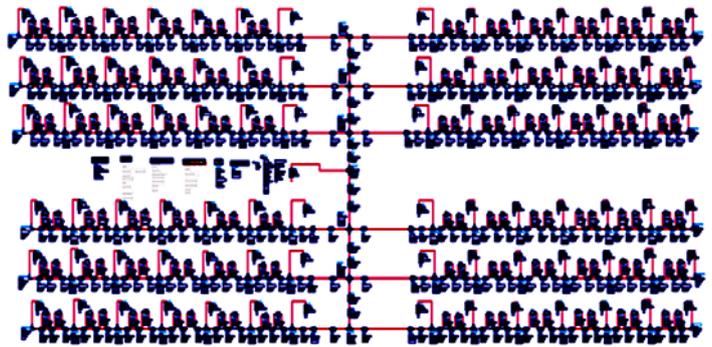


Fig.3 Power division network model

图 3 功分网络模型

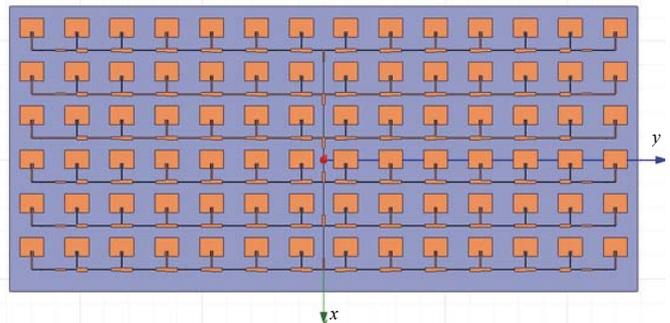


Fig.4 Microstrip array antenna full electromagnetic simulation structure

图 4 微带阵列天线全电磁仿真结构图

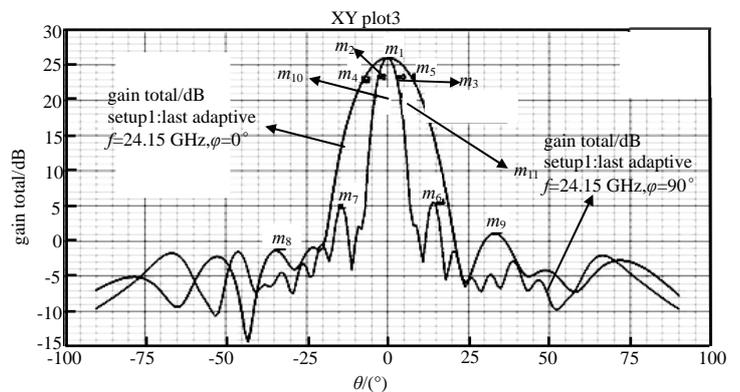


Fig.5 3 dB bandwidth gain

图 5 3 dB 带宽内增益

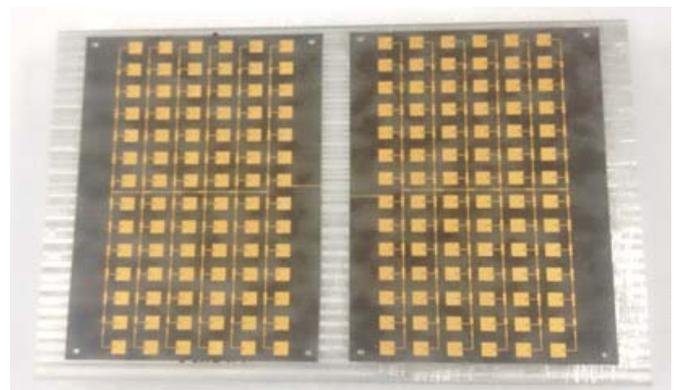


Fig.6 Microstrip array transceiver photo

图 6 微带阵列收发互易天线实物照片

全, 车载毫米波防撞雷达系统已经备受消费者以及汽车厂商的关注。但是由于其价格昂贵, 现在还无法普及应用到中低档车辆。

如何降低其成本, 在性能和价格中间寻找最佳折中点是本文的出发点。本文研究的微带天线成本很低且满足性能, 可以代替现在毫米波防撞雷达中普遍使用的口径天线或机械扫描天线。

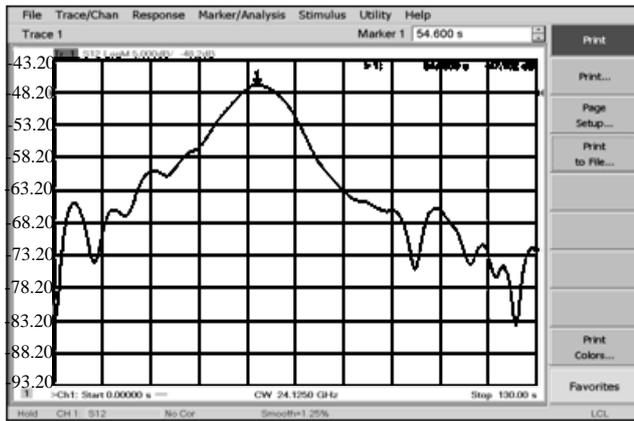


Fig.7 Antenna horizontal angle test
图 7 天线水平角测试

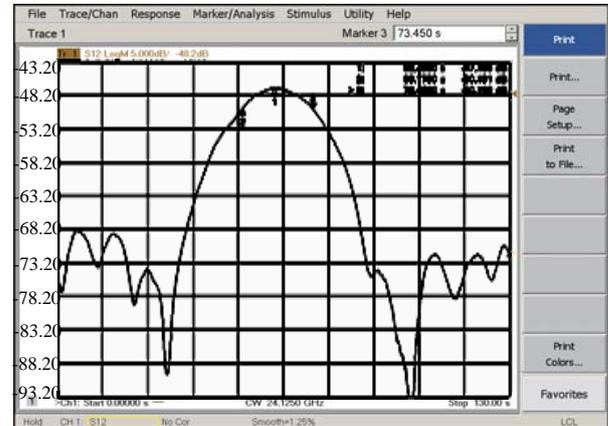


Fig.8 Antenna high and low angle test
图 8 天线高低角测试

参考文献:

- [1] 朱辉,刘经银. 基于微带阵列的天线设计与仿真[J]. 计算机仿真, 2011,28(5):148-150. (ZHU Hui,LIU Jingyin. Antenna design and simulation based on microstrip array[J]. Computer Simulation, 2011,28(5):148-150.)
- [2] (美)梅洛克斯(R.J.Mailloux).相控阵天线手册 [M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2007. (MAILLOUX R J. Handbook of Phased Array Antennas[M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2007.)
- [3] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1991. (ZHONG Shunshi. Microstrip Antenna Theory and Application[M]. Xi'an, China:Xidian University Press, 1991.)
- [4] 汪茂光,吕善伟,刘瑞祥. 阵列天线分析与综合[M]. 成都:电子工业出版社, 1989. (WANG Maoguang,LYU Shanwei, LIU Ruixiang. Array Antenna Analysis and Synthesis[M]. Chengdu, China:Publishing House of Electronic Science and Technology Press,1989.)
- [5] 李恒城,敬守钊. 24 GHz 微带贴片天线阵的仿真与设计[J]. 微波学报, 2010(s2):211-214. (LI Hengcheng, JING Shouzhao. Simulation and design of 24 GHz microstrip patch antenna array[J]. Journal of Microwaves, 2010(s2):211-214.)
- [6] 李艳,戴亚文. 基于 HFSS 矩形微带贴片天线的仿真设计[J]. 机电工程技术, 2010,39(10):40-41. (LI Yan,DAI Yawen. Simulation design of rectangular microstrip patch antenna based on HFSS[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2010, 39(10): 40-41.)
- [7] 陈腾博,焦永昌,张福顺. 一种宽频带圆极化微带天线的设计[J]. 空间电子技术, 2006,3(3):61-64. (CHEN Tengbo, JIAO Yongchang,ZHANG Fushun. Design of a broadband circularly polarized microstrip antenna[J]. Space Electronics, 2006,3(3):61-64.)
- [8] JAMES J R. Microstrip Antenna Theory and Design[M]. London:Institution of Engineering and Technology, 2006.
- [9] RICHARDS W F,LO Y T. An improved theory for microstrip antennas and applications[J]. Antennas & Propagation IEEE Transactions on, 1981,17(1):113 -116.
- [10] HAN C. A C/Ka dual frequency dual layer circularly polarized reflectarray antenna with microstrip ring elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004,52(11):2871-2876.
- [11] 彭金花. 毫米波微带阵列天线的优化与设计[D]. 福州:福州大学, 2006. (PENG Jinhua. Optimization and design of millimeter wave microstrip antenna array[D]. Fuzhou, China:Fuzhou University, 2006.)
- [12] 张均. 微带天线理论与工程[M]. 北京:国防工业出版社, 1988. (ZHANG Jun. Microstrip Antennas,Theory and Engineering[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 1988.)
- [13] 蓝桥龙,樊勇,张永鸿,等. 毫米波微带谐振式串馈贴片线型阵列的仿真及实验研究[D]. 深圳:中国电子学会, 2006. (LAN Qiaolong,FAN Yong,ZHANG Yonghong,et al. Simulation and experimental study of millimeter wave microstrip resonant patch fed linear array[D]. Shenzhen,China:The Chinese Institute of Electronics, 2006.)

作者简介:



孙元(1994-),男,安徽省马鞍山市人,在读本科生,主要研究方向为微波射频.email:15284031994@163.com.

胡欣(1987-),男,四川省遂宁市人,在读研究生,主要研究方向为图像处理.

廖鹏(1992-),男,成都市人,在读研究生,主要研究方向计算机应用、信号处理、数据分析.

王昌(1997-),男,安徽省池州市人,在读本科生,主要研究方向为数值分析.

孙梧雨(1994-),男,四川省南充市人,在读本科生,主要研究方向为雷达信号处理、数值模拟.

中国电子学会电路与系统分会第二十八届学术年会征文通知(第一轮)

中国电子学会第二十八届电路与系统学术年会将于2017年10月在重庆召开。会议由中国电子学会电路与系统分会主办,重庆邮电大学承办。我们真诚地邀请电路与系统及相关领域的科研工作者莅临本次年会!

一、征文范围

本次年会诚征有关电路与系统及相关领域最新研究进展的学术论文(中英文均可)。征文方向主要包括(但不限于)以下主题:1.电路与系统理论与技术(非线性电路系统理论与应用、功能集成电路与系统、低功耗电路与系统、分布式电路与系统、射频、微波电路与系统);2.大规模集成电路设计与制造技术(集成电路设计自动化理论与CAD技术、通用处理器芯片架构与设计技术、纳电子学与吉规模系统、SoC/NoC设计方法、验证与测试理论、MEMS/MCM/生物芯片建模与模拟、纳米结构信息器件与纳电子技术);3.传感器、无线传感网和物联网(生物信息传感机理、检测及传感器技术、微弱信息检测与微纳传感器技术、传感器网络与多源信息融合、物联网信息感知、传输及处理技术);4.信号与信息处理系统(通信信号处理、雷达、声纳信号处理、医学图像处理、地质信号处理、语音信号处理、大数据处理技术);5.音频、视频、3D视频系统技术(视频A/D、D/A转换、视频信号处理、视频压缩技术、多媒体信息处理);6.神经网络、图论与系统优化(神经网络理论与应用、神经元系统和应用、移动神经网络和阵列计算、模糊逻辑与电路、学习与智能系统、图论与系统优化);7.非传统电路与系统(量子计算与信息处理、生物计算机、纳米信息处理、仿生电子学);8.先进网络技术(高速光通信与光网络技术、第五代移动通信技术、异构网络融合技术)。

二、征文要求

1.来稿必须是未曾在国内外公开发表过的文章,无弄虚作假,无一稿多投,不得涉及国家秘密。

2.以正式论文的形式(包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键词、正文、参考文献)书写应征论文。中文论文请包括英文题目、作者、作者单位、摘要和关键词;英文论文请附上中文题目、作者、作者单位、摘要和关键词。论文摘要应包括目的、方法、结果、结论四部分。

三、论文提交

采用中科院国际会议服务平台<http://cscas28.csp.escience.cn/dct/page/1>投稿。登录网站后请先注册,后投稿。

四、重要日期

提交论文截止日期:2017年8月30日

通知论文接收日期:2017年9月15日

提交论文修改稿日期:2017年9月30日

五、论文评奖

1.年会评选大会优秀论文并颁发证书。

2.会议特别优秀的论文推荐到《电子与信息学报》、《雷达学报》、《太赫兹科学与电子信息学报》正刊评审发表。

六、会议日程

会场地址及详细日程另行通知。

七、会务组联系方式

重庆邮电大学联系人:吴大鹏 联系电话:023-62460815

联系地址:重庆市南岸区崇文路2号重庆邮电大学

邮编:400065

电路与系统分会办公室联系人:陈倩、张燕

会议网址:<http://cscas28.csp.escience.cn/dct/page/1>

联系电话:(010)58887066(陈),(010)58887064(张)

会议邮箱:cscas@mail.ie.ac.cn

联系地址:北京市海淀区北四环西路19号中国科学院电子学研究所 邮编:100190