

文章编号: 2095-4980(2019)03-0373-06

## 星载大口径太赫兹反射面天线设计与实现

施锦文, 周卫来\*, 禹旭敏, 马凤军

(中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 为解决大口径太赫兹反射面天线工程实现的难题, 提出了一套口径 2.5 m 的星载太赫兹天线系统。该天线由大口径反射面天线和准光学馈电网络组成, 可以接收 183 GHz 微波电磁信号。详细介绍了天线系统电性能仿真分析与大口径反射器的结构方案, 对加工完成的大口径太赫兹天线系统进行了电性能测试, 实测天线主波束效率达到 90.2%, 能够满足静止轨道卫星载荷的应用需求。

**关键词:** 反射面天线; 准光学馈电网络; 电性能仿真; 结构方案; 电性能测试

**中图分类号:** TN82

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201903.0373

## Design and implementation of a space-borne reflector antenna operating at terahertz frequency

SHI Jinwen, ZHOU Weilai\*, YU Xumin, MA Fengjun

(China Academy of Space Technology, Xi'an Shaanxi, 710100, China)

**Abstract:** A THz space-borne reflector antenna with an aperture of 2.5 m is presented. The antenna, which could receive electromagnetic signals at 183 GHz, is composed of the reflector antenna and quasi-optical feeding network. Its electrical performance is given, and the structural scheme is presented as well. The measurement of main beam efficiency achieves 90.2%, which could meet the specification of the GEO remote sensing satellites. It realizes a space-borne reflector antenna operating at terahertz frequency.

**Keywords:** reflector antenna; quasi-optical network; electrical simulation; structure scheme; electrical performance measurement

太赫兹频段是介于微波与光学频段之间的一段电磁频谱, 近年来太赫兹技术的研究逐渐成为国内外的热点。星载太赫兹技术在卫星通信、卫星遥感以及雷达等领域都有广阔的应用前景, 目前国际上已经有多颗卫星实现了太赫兹载荷的星载应用<sup>[1-2]</sup>, 当前在轨的太赫兹载荷主要应用在低轨或是深空探测中, 静止轨道的太赫兹载荷还未有在轨应用的先例。静止轨道太赫兹辐射计的研究目前是国际上的一个热点<sup>[3-4]</sup>, 太赫兹辐射计需要一个大口径的反射面天线实现较高的对地分辨力。欧洲的 GOMAS<sup>[4]</sup>探测器采用了口径为 3 m 的卡塞格伦天线, 目前项目仅停留在方案论证阶段; 国内仅研制了小口径的太赫兹反射面天线<sup>[5]</sup>, 针对静止轨道大口径太赫兹反射面天线的星载应用还未见报道。本文给出了静止轨道星载应用的大口径太赫兹反射面天线的方案及结构设计, 并成功研制了国内口径最大的太赫兹星载反射面天线(口径 2.5 m), 在太赫兹天线测试场地对天线进行了电性能测试, 实测结果与设计仿真结果一致性较好, 能够满足系统指标要求。

### 1 天线系统方案设计

太赫兹反射面天线主要由反射面和准光学馈电网络组成, 其中反射面天线采用正馈式卡塞格伦反射面天线, 主反射面为标准抛物面, 副反射面为标准双曲面。为获得较高的遥感成像分辨力, 天线主反射面设计为 2.5 m 入

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-01-13

基金项目: 国家“十二五”民口 863 重点预研资助项目(Y13-863M-01)

\*通信作者: 周卫来 email:28440333@qq.com

射孔径<sup>[6]</sup>。准光学馈电网络采用单通道自由空间馈电结构,用于接收入射到反射面天线的电磁波信号。根据星载遥感载荷的应用需求,天线系统需具备高主波束效率,以及线极化工作模式,系统主要设计指标见表 1。

表 1 天线系统主要设计指标  
Table 1 Primary design index of antenna system

parameter	$f/\text{GHz}$	antenna form	aperture size/m	main beam efficiency/%	beam width/(°)	polarization
index	183	reflector antenna	2.5	$\geq 90$	$\leq 0.06$	linear

天线系统主反射面接收到来自地面与大气中的辐射与散射流量中的电磁信号,经过副反射面进入准光学馈电网络,最终进入馈源喇叭。天线系统仿真模型示意图 1。

## 2 天线仿真与分析

对图 1 所示的天线系统模型进行仿真计算,先进行馈电系统仿真设计,然后进行整个天线系统的仿真分析并给出仿真结果,验证天线系统的设计指标。

### 2.1 馈电网络仿真

天线准光学馈电网络主要包括 1 个椭球面反射镜和 1 个 183 GHz 波纹喇叭馈源。根据椭球面反射镜相位匹配条件,当椭球面波束入射中心位置  $O$  与椭球镜 2 个焦点之间的距离( $R_1, R_2$ )分别等于入射波束和出射波束的曲率半径时,高斯波束经过椭球面反射镜反射后表现出无相差特性。其中,可以根据参数  $R_1$  和  $R_2$  设计数值,确定椭球面的几何参数。波纹喇叭与高斯基模的能量耦合可以达到 98% 以上,准光学馈电网络设计中采用纵向槽波纹喇叭馈源,该喇叭具有低旁瓣、低交叉极化的特点且具有稳定的相位中心,使用 HFSS 软件对喇叭进行仿真设计,波纹喇叭远场辐射方向图与驻波比的仿真结果见图 2。

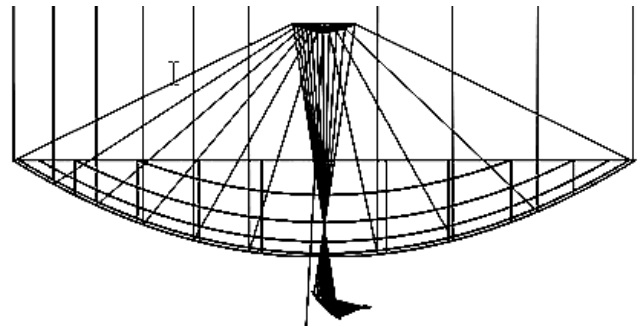


Fig. 1 Antenna simulation model  
图 1 天线系统仿真模型示意图

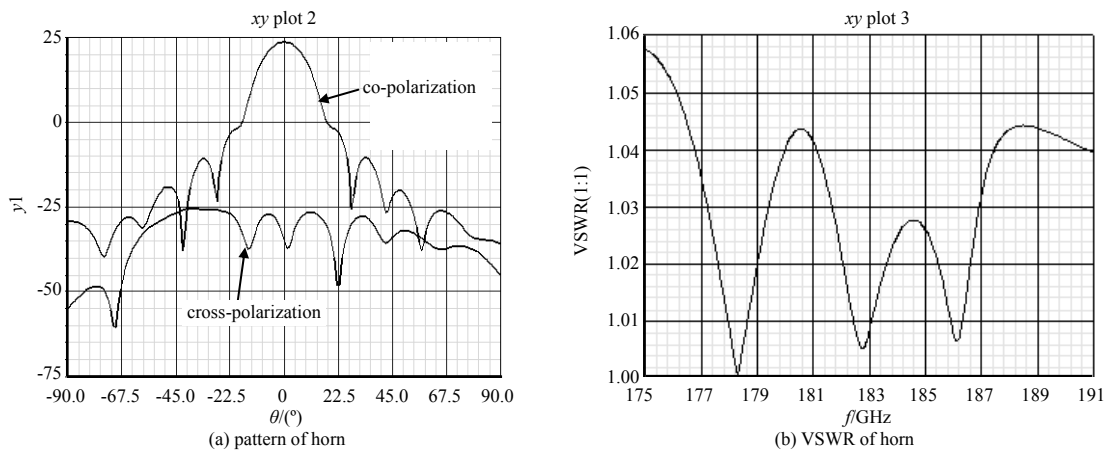


Fig. 2 Simulation results of corrugated horn  
图 2 波纹喇叭的电性能仿真结果

馈电波纹喇叭展示出良好的高斯特性,副瓣电平可以达到  $-30$  dB 以下,喇叭驻波比小于 1.05。准光学馈电网络的照射半张角为  $16.5^\circ$ ,照射电平为  $-20$  dB,束腰半径为 2.75 mm。

### 2.2 天线系统仿真

在完成馈电网络仿真的基础上,采用商用 GRASP 软件对整个反射面天线进行仿真分析,仿真需要考虑实际反射面形面精确度(形面精确度值为  $50 \mu\text{m}$ )的影响,根据图 1 中的天线仿真模型,对 183 GHz 频段天线的远场辐射方向特性进行仿真计算,仿真结果见图 3。

从天线系统的仿真结果来看:口径为 2.5 m 的反射面天线在 183 GHz 的波束宽度为  $0.049^\circ$ ,满足指标要求的  $\leq 0.06^\circ$ ;天线的主波束效率的仿真结果为 92.2%,满足指标要求的  $\geq 90\%$ 。验证了天线系统设计的合理性。

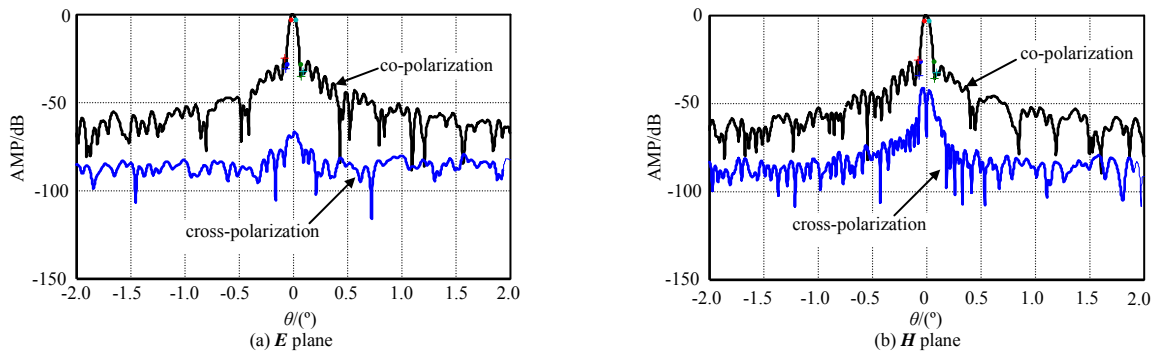


Fig.3 Far-field pattern of antenna simulation  
图3 天线远场方向图的仿真结果

### 3 天线结构设计与加工

#### 3.1 天线结构设计

天线主要由主反射器、副反射器、椭球反射镜和波纹喇叭等几部分组成，副反射器通过3根支撑杆连接在主反射器上，而椭球反射镜和波纹喇叭安装在主反射器内部。

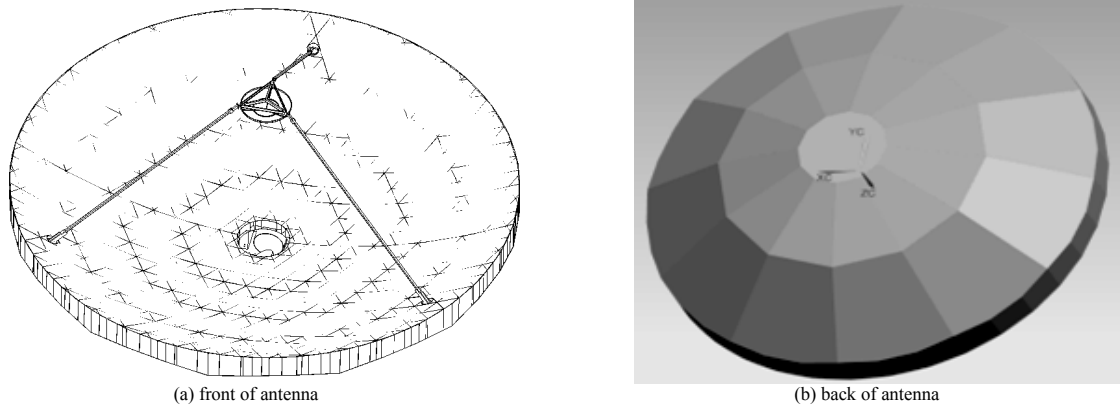


Fig.4 Structural representation of antenna system  
图4 天线系统的结构示意图

天线主反射器形面精确度达到  $50\ \mu\text{m}$ ，大口径反射器的实现是整个结构设计的难点，在静止轨道上高精度反射器的形面精确度需要保持稳定。为进一步提高反射器热变形性能，并减小反射器成型时的热应力，主反射器材料采用碳纤维复合材料，蜂窝夹层选用碳纤维格栅结构形式。天线系统的主反射器主要由前反射面、夹心格栅、背板和连接埋件等组成，各部分均使用高热稳定碳纤维复合材料。夹心格栅为具有一定厚度的三角形网格，前反射面由多个子块拼接成形，相邻子块纤维铺层角度相互垂直。通过合理设计每一层及相邻子块铺层角度，确保前反射面厚度方向的对称性。

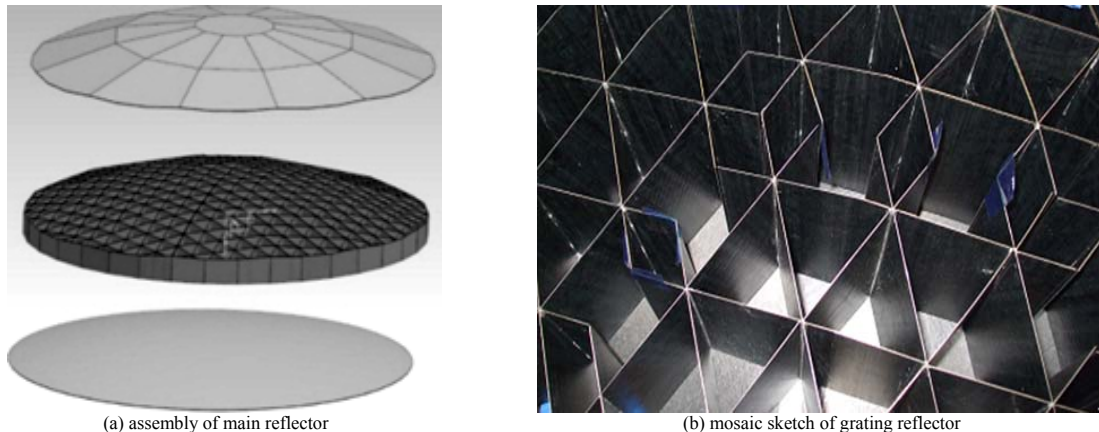


Fig.5 Structural representation of main reflector  
图5 高精度主反射器的结构示意图

天线系统副反射器组件主要由副反射器、调整背架和支撑杆等组成。副反射器采用铝板加工而成,形面精确度优于  $50\ \mu\text{m}$ ;支撑杆用于连接副反射器与主反射器;调整背架用于校准副反射器的安装精确度和指向,见图 6。

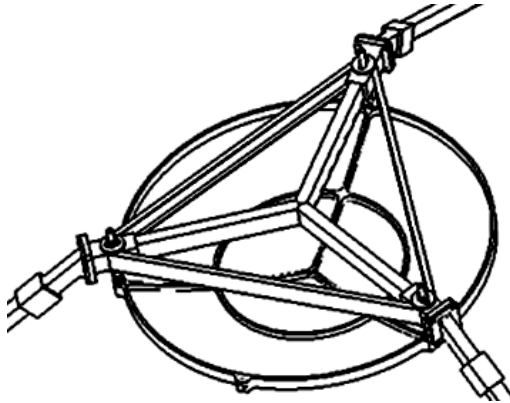


Fig.6 Structural representation of sub reflector  
图 6 副反射器结构示意图

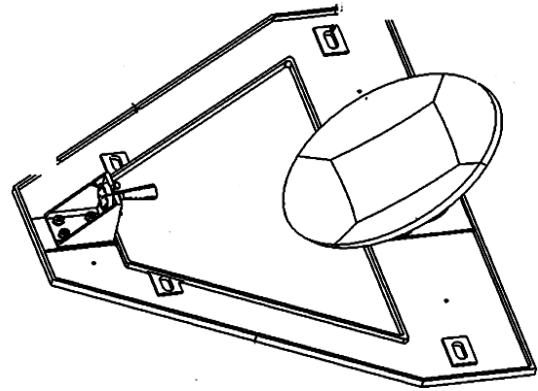


Fig.7 Structural representation of quasi-optical feeding network  
图 7 准光馈电网络结构示意图

馈电网络系统主要由波纹喇叭组件、椭球反射镜和安装板等组成。为便于安装和校准,将波纹喇叭和椭球反射镜组装于同一安装板上,其结构示意图见图 7。

### 3.2 高精度反射器的加工

在完成大口径太赫兹反射面天线设计后,2.5 m 口径高精度反射面的加工制造是整个天线研制的关键。加工的关键技术主要有:高精度模具的加工;高精度反射器的结构优化;高精度反射器的形面精确度测试。

1) 高精度模具的加工:2.5 m 高精度反射器加工使用一套铸铁模具,通过不同的型面设计和二次机械加工,使铸铁模具分别满足固化模具和装配模具的使用要求。作为前反射面固化模具使用时,先对铸铁模具进行补偿设计,补偿设计后可以确保前反射面固化后的型面为目标型面(即理想的标准抛物面)。作为装配模具使用时,通过二次机加工将铸铁模具型面加工为理想的标准抛物面。由于模具补偿和机加工的精确度都很高,因此装配模具和固化后的前反射面型面可以很好地匹配,此时装配格栅及背板可以使反射面的装配应力近似为零或极小,确保了反射器精确度。

2) 高精度反射器的结构优化:反射器结构优化以提高反射器的结构性能为目标,分别基于反射器在轨热变形和制造误差进行优化分析。2.5 m 反射器格栅高度是影响反射器整体性能的主要因素,反射器结构优化主要围绕格栅高度进行。最终的优化结果是三角形格栅边长 105 mm,各组件复合材料厚度均为 0.6 mm。

3) 高精度反射器的形面精确度测试:高精度反射器精加工完成后需要对反射器的形面精确度进行测试,依据实际的工程经验,三坐标测量机、摄影测量系统和激光跟踪测量系统是测量高精度反射面和高精度模具型面的较好方法,本项目采用摄影测量方法进行反射器与模具的形面精确度测试。

## 4 天线电性能测试

在完成加工装配、反射器形面测试与校准测试后进行天线电性能测试。2.5 m 口径太赫兹天线电性能测试在国内属于首次,测试地点在中科院微波遥感技术重点实验室进行。实验室配备太赫兹及毫米波天线近场测试系统,测试频率覆盖 0.4~500 GHz。天线的电性能测试通过近场的探头测出天线口面的近场幅度与相位分布,再通过傅里叶变换得出天线的远场辐射方向图,天线的测试状态见图 8。

天线实测  $E$  面与  $H$  面的远场辐射方向图见图 9。

因太赫兹测试场地以及测试设备的测试误差影响,天线  $H$  面实测方向图出现了局部的不对称现象,对天线主波束效率的实测结果影响较小。太赫兹天线测试场实测的辐射特性统计结果见表 2。

天线电性能实测结果与仿真分析结果基本一致,均优于系统的指标要求,成功验证了 2.5 m 太赫兹高精度格栅反射面天线的创新设计方法。



Fig.8 Measurement of the THz reflector antenna  
图 8 太赫兹反射面天线的测试

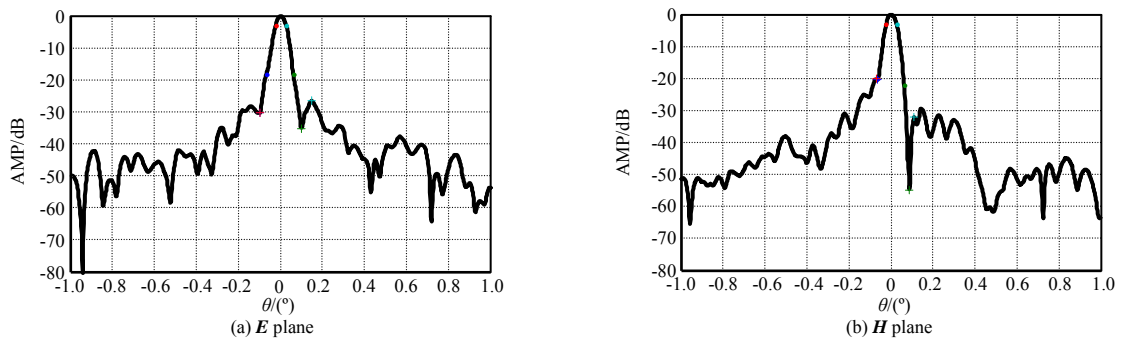


Fig.9 Measurement of far-field pattern of antenna

图9 天线实测远场方向图

表2 天线系统指标的测试结果

Table2 Measurement results of antenna system

parameter	f/GHz	antenna form	aperture size/m	main beam efficiency/%	beam width/(°)	polarization
index	183	reflector antenna	2.50	≥90	≤0.06	linear
measurement result	183	reflector antenna	2.51	90.2	0.05	linear

### 5 结论

本文成功设计并实现了一套口径 2.5 m 的太赫兹反射面天线,是国内最大口径的星载太赫兹反射面天线,天线的设计、加工与测试均是国内首例。为实现太赫兹天线的高主波束效率特性,创新性地采用了高热稳定碳纤维格栅结构替代传统铝蜂窝夹层结构形式,成功将高精度反射器设计成准各向同性结构,天线各部件热匹配性良好,保证了反射器形面精确度在轨稳定。在不断提高天线反射器形面精确度的前提下,增加准光馈电网络的频率通道与极化通道,可以实现单天线的多频率多极化<sup>[7-8]</sup>复用。大口径星载太赫兹天线的设计与实现为我国后续太赫兹卫星载荷的发展奠定了良好的基础。

### 参考文献:

[ 1 ] DOMINIC Doyle,GÖRAN Pilbratt,JAN Tauber. The herschel and planck space telescopes[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8):1403-1411.

[ 2 ] SCHOEBERL M R,DOUGLASS A R,HILSENATH E. Overview of the EOS Aura mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2006,44(5):1066-1074.

[ 3 ] ZHANG Yongfeng,MIAO Jungang,ZHAO Haibo,et al. A five-frequency bands quasi-optical multiplexer for geostationary orbit microwave radiometer[C]// 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich,Germany:[s.n.], 2012:4676-4679.

[ 4 ] BIZZARRI Bizzarro,GASIEWSKI Albin,STAELIN David. Initiatives for millimetre/submillimetre-wave sounding from geostationary orbit[C]// 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto,Ont.,Canada:[s.n.], 2002:548-552.

[ 5 ] 刘越东,杨雨田,许戎戎,等. 基于准光技术的 94 GHz 星载反射面天线设计[J]. 微波学报, 2012,28(s1):46-49. (LIU Yuedong, YANG Yutian,XU Rongrong,et al. Design of 94 GHz spaceborne reflector antenna based on quasi-optical technology[J]. Journal of Microwaves, 2012,28(s1):46-49.)

[ 6 ] MARTIN R J,MARTIN D H. Quasi-optical antennas for radiometric remote-sensing[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1996,8(1):37-48.

[ 7 ] 王新彪,李靖,张升伟. 毫米波/亚毫米波临边探测仪准光技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(4):595-600. (WANG Xinbiao,LI Jing,ZHANG Shengwei. Quasi-optical technology in millimeter/sub-millimeter limb sounder[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):595-600.)

[ 8 ] JORGENSEN Rolf,PADOVAN Gilbert,DE Maagt Peter,et al. A 5-frequency millimeter wave antenna for a spaceborne limb sounding instrument[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001,49(5):703-714.

## 作者简介:



施锦文(1981-),男,山西省朔州市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为航天器天线技术,担任多项型号及预研课题天线负责人,曾获航天科技集团公司科学技术进步一等奖,国防科学技术进步二等奖。

周卫来(1983-),男,安徽省滁州市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为航天器天线技术, email:28440333@qq.com.

禹旭敏(1973-),女,陕西省渭南市人,博士,研究员,主要研究方向为星载微波有效载荷系统技术。

马凤军(1982-),男,山东省泰安市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为航天器天线技术。

## 2019 IEEE 信号、信息及数据处理国际会议征稿通知

2019 IEEE 信号、信息及数据处理国际会议(IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing 2019)是由 IEEE 北京分会和北京理工大学联合创办,旨在介绍信号、信息及数据处理领域的最新技术进展、学术研究热点和前沿问题,特别是民用技术的最新研究成果和应用等。

首届会议由 IEEE 主席福田敏男院士、北京理工大学校长张军院士、毛二可院士担任名誉主席,北京理工大学副校长龙腾教授担任大会主席、杨小鹏教授担任程序委员会主席,将于 2019 年 11 月 6~8 日在中国重庆召开,涵盖学术交流、展览展示等内容,欢迎国内外广大科技工作者及各界人士踊跃投稿并积极参会。

### 一、征文议题

- 1) Speech, Audio, Acoustic and Sonar Processing
- 2) Image, Video, and Multimedia Processing
- 3) Signal Processing for Communications and Networks
- 4) Remote Sensing and Signal Processing
- 5) Sensor Array and Multichannel Signal Processing
- 6) Artificial Intelligence for Signal Processing
- 7) Signal Processing for Big Data
- 8) Photon/Quantum Signal and Information Processing
- 9) Bio-imaging and Biomedical Signal Processing
- 10) Design and Implementation of Signal Processing Systems
- 11) Signal Processing Theory and Methods
- 12) Signal Processing for Cyberspace Security
- 13) The Internet of Things
- 14) GNSS Signal Processing and Positioning

### 二、征文要求

1. 英文撰稿,具备真实性和原创性。论文请勿涉及保密内容。
2. 论文模板、提交方式详见会议网站, [www.icsidp.org](http://www.icsidp.org)。
3. 论文全文页数不少于 4 页,不超过 6 页。
4. 论文提交截止时间:2019 年 4 月 30 日。

### 三、论文出版

本届会议论文将收录在会议论文集中,会议结束后将送 IEEE Xplore 和 EI Compendex 检索。

### 四、会议时间地点

时间:2019 年 11 月 6~8 日  
地点:中国·重庆 融汇丽笙酒店

### 五、联系方式

联系人:田琳琳 +86 10 68911162/68918380  
会议网址: <http://www.icsidp.org>  
电子邮箱: [admin@icsidp.org](mailto:admin@icsidp.org)

2019 IEEE 信号、信息及数据处理国际会议组委会  
二〇一九年四月