

文章编号: 2095-4980(2017)05-0711-05

## 太赫兹目标 RCS 测量误差估计方法及其应用

李东起<sup>1</sup>, 李彦鹏<sup>1</sup>, 宋 炎<sup>1</sup>, 徐金钟<sup>2</sup>

(1.国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2.91024 部队, 广东 台山 529266)

**摘 要:** 太赫兹频段下非标准体目标的雷达散射截面(RCS)较难通过电磁散射计算的方式得到结果, 实验测量得到目标 RCS 成为该频段下的可行方案。然而, 目前尚不具备系统性的估计指标来分析实测结果的误差特性。相比于目前较为简单的测量误差分析方式, 本文提出 3 种太赫兹目标 RCS 测量误差估计指标; 随后结合具有 RCS 解析解的目标, 验证、分析所提估计指标的实用性和有效性。实测数据分析结果表明, 本文提出的测量误差估计指标能够反映测量数据的误差规律与误差水平, 具有实用性, 有助于发现实验系统及实测数据处理中的有待优化之处。

**关键词:** 太赫兹; 雷达散射截面(RCS); 非标准体目标; 测量误差估计; 特征选择验证(FSV); 估计指标

中图分类号: TN973

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0711

## Application of measurement error estimation method for Terahertz target's RCS

LI Dongqi<sup>1</sup>, LI Yanpeng<sup>1</sup>, SONG Yan<sup>1</sup>, XU Jinzhong<sup>2</sup>

(1.School of Electrical Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;  
2.Unit 91024, Taishan Guangdong 529266, China)

**Abstract:** In Terahertz band, the Radar Cross Section(RCS) of an irregular target can hardly be acquired by electromagnetism calculation. Therefore, the method of measuring their RCS becomes a feasible solution. However, there is no systemic error estimation index to analyze the identity of measured results. Compared with the present simplex measurement error estimation indexes, this paper puts forward three kinds of error estimation index for measuring the RCS of terahertz targets. Then it combines the target's RCS resolution with its measurement results and analyzes the practicability and efficiency of the estimation indexes. According to the data analysis, the advanced error estimation indexes can reflect the measurement error's orderliness and standard, which shows the proposed method is practical and can contribute to discover the weakness of the measurement system and the data processing.

**Keywords:** Terahertz; Radar Cross Section(RCS); irregular target; measurement error estimation; Feature Selective Validation(FSV); estimation index

随着太赫兹波产生、探测、传输等技术的逐步发展, 太赫兹频段已成为电子技术领域研究热点<sup>[1-3]</sup>。太赫兹频段下的目标电磁散射特性分析是该方向的技术基础。雷达散射截面(RCS)是度量雷达目标对照射电磁波散射能力的一个重要物理量。在目标太赫兹频段 RCS 测量过程中, 需要分析 RCS 数据误差特性<sup>[4]</sup>。

目前, 评估 RCS 数据误差特性的主要方式是利用标准体目标(或目标模型), 比较定标后的 RCS 测量数据与电磁计算解析解结果, 计算评估指标, 得出评估结论。现行的 RCS 数据误差估计方法包括统计学方法<sup>[5]</sup>和 FSV 方法<sup>[6]</sup>。

自 RCS 测量初期, 就有统计学方法评估测量误差的处理方式, 包括计算测量数据的均方误差、相关系数等。FSV 方法由 A.J.M.Martin 于 1999 年提出, 经过不断修正, 成为 IEEE1597.1 & 1597.2 计算电磁学建模与仿真验证标准的核心内容<sup>[7]</sup>。2 类方法中, 统计学方法原理清晰, 便于实现, 反映数据的数字特征, 但不易反映数据的局部特征; FSV 方法则可通过模拟人类视觉, 反映数据在量级、趋势、特征等方面的差异<sup>[6]</sup>。

## 1 太赫兹目标 RCS 测量技术

### 1.1 太赫兹目标 RCS 测量系统

目前,太赫兹频段雷达系统按所用太赫兹源可划分为 3 类:时域光谱系统、远红外激光器系统、微波倍频源系统<sup>[8]</sup>。其中,微波倍频源系统通过在微波段产生宽带射频信号,经过倍频器多次倍频到太赫兹波段,并经功率放大输出太赫兹波,可产生调制的相干信号。本文的测量与验证均以该类系统为例进行说明,所有指标均可在其他类型系统测试结果中进行运用。

### 1.2 太赫兹目标 RCS 测量原理

RCS 作为表征目标后向散射特性的物理量,针对窄带雷达或点频系统,其定义可由电磁散射理论给出:

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为目标定义在距离雷达无穷远处的 RCS,在实际测量中满足远场条件即可<sup>[9]</sup>;  $E_s$ 为接收天线处的散射场强;  $E_i$ 为目标处的入射场强;  $R$ 为雷达天线与目标距离。

### 1.3 太赫兹目标 RCS 定标与误差估计

本文使用相对定标法<sup>[4]</sup>,以金属铝球为定标体(极化散射特性已知的标准目标),以  $\sigma = \pi r^2$  为其理论解<sup>[9]</sup>,并测量了圆锥标准体的后向 RCS。为了评估标准体 RCS 的测量误差,需将其测量 RCS 与通过电磁仿真计算的 RCS 进行比较。本文利用了 CST 电磁仿真软件计算圆锥的 RCS,并将其视为圆锥标准体 RCS 的理论解。

## 2 太赫兹目标 RCS 测量误差估计指标

### 2.1 基于 FSV 方法的测量误差估计指标

FSV 方法将数据向量分解为直流、低频和低频分量,然后分别计算幅度差分度量(Amplitude Difference Measure, ADM)、特征差分度量(Feature Difference Measure, FDM)和全域差分度量(Global Difference Measure, GDM)<sup>[6]</sup>。针对 RCS 数据则将其随角度变化的 RCS 向量视为时间域信号<sup>[10]</sup>,可利用该方法对其进行分析,并使用 ADM、FDM 和 GDM 对其进行评估。

通过统计逐点的 FSV 值,并做相应的可信度直方图,可对 RCS 的理论曲线和测量曲线的局部和整体拟合程度进行评估。但 FSV 方法中参数选取的合理性有待进一步研究,例如,计算 GDM 时使用修正因子的理论依据尚不够充分。同时,其在处理噪声干扰比较严重的信号时,会出现评估失效。

### 2.2 基于误差分段统计的估计指标

基于统计学方法误差估计,包括计算 2 组对比数据的均方误差、相关系数和 K-S 距离<sup>[11]</sup>,可从数值上反映数据的整体拟合程度。然而,目前的太赫兹实验系统输出信号的信噪比不高,在低信噪比时,测量值与理论值的接近程度很差,而高信噪比时二者接近程度较好,直接计算总体数字特征会掩盖局部数字特征。

针对该问题,本文对数据进行分组,在各组数据内分别进行均方误差和相关系数的计算。为了满足检验精确度和计算量两方面需求,数字特征的计算需要一定的数据量,在分段统计中需要考虑这些因素。通过计算相应的分段均方误差、相关系数和 K-S 距离,并绘制对应的误差特性曲线,可对 RCS 的测量值与理论值在各姿态角度的差异及接近程度进行分析和评估。

## 3 测试实验与指标验证

### 3.1 测试条件与步骤

本文实验系统中,使用微波倍频源产生宽带太赫兹信号,采用线性调频方式,中心频点 440 GHz,带宽 25.6 GHz,通过零中频混频和双路正交解调,得到抗混叠后的复信号。整个实验测量过程在覆盖吸波材料的暗室内进行,定标体、参考角反射器与目标放置于二轴精密转台平面上。令俯仰角为  $0^\circ$ ,使目标在二维平面内转动,采用走停的运动方式,测量目标的后向散射场。定标方法是相对定标,依次采集背景回波、定标体回波、参考角反射器回波和目标回波;利用参考角反射器校正宽带信号的非线性,并将背景回波与定标体和目标回波

分别作相关抵消<sup>[12]</sup>，得到目标回波的估计数据；滤除该数据功率谱的高频分量，得到其低频包络，找到所求的对应频段并计算其 RCS；所求 RCS 经过定标就是 RCS 测量结果。其中，由于球体呈现良好的对称性，其 RCS 在各姿态角下稳定，因此本文实验采用与目标尺寸可比拟的球体作为定标体。在本实验中，使用对称的圆锥作为研究目标，主要考虑到其 RCS 随目标姿态变化的特征可预测，且经电磁计算可得到高置信度的解，相对于圆柱和球体的对称性较差，更易反映其 RCS 随姿态角度变化的特征。所用圆锥目标表面粗糙度为 1.6  $\mu\text{m}$ ，看不见加工刀痕，微辨加工方向，其表面起伏远小于 440 GHz 频段下的波长，可视为光滑目标。其次，暗室背景具有一定的噪声电平，圆锥在其镜面反射角度下具有较大的 RCS，在 RCS 随姿态起伏的曲线中能更加直观地反映出来。实验中，圆锥的放置姿态如图 1 所示，使用了聚乙烯泡沫用于支撑圆锥，对于圆锥的水平姿态定位存在一定的误差，反映到 RCS 测量结果中，则表现为理论值与测量值在姿态角度上存在偏差。

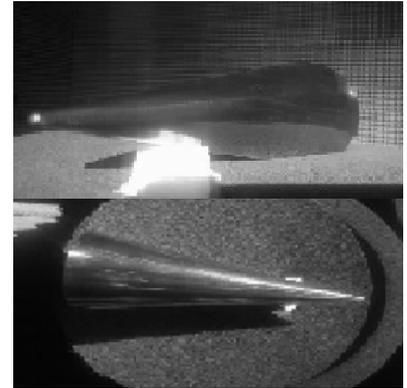


Fig.1 Schematic diagram of the placement of the cone  
图 1 圆锥放置示意图

在实验的处理过程中，考虑到目标与背景支架之间可能存在耦合的情况，如果直接使用矢量信号相减的方式，会使背景的抑制效果不佳。因此，假定背景信号和采样信号相关，与实际情况比较相符。本文使用了相关抵消<sup>[12]</sup>的方法，削弱背景支架的散射对测量结果的影响，其具体处理过程如下。将背景信号矢量表示为  $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ，目标和背景信号矢量表示为  $\mathbf{Y}=[y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ ； $\mathbf{X}$  与  $\mathbf{Y}$  彼此相关，适当选择变换矩阵  $\mathbf{H}$ ，使随机矢量  $\mathbf{e}=\mathbf{Y}-\mathbf{H}\mathbf{X}$  与  $\mathbf{X}$  不相关，即从  $\mathbf{Y}$  中消除与  $\mathbf{X}$  相关的部分，其中  $\mathbf{H}=\mathbf{R}_{XY}\mathbf{R}_X^{-1}$ ， $\mathbf{R}$  表示相关矩阵。通过相关抵消的方式，能从一定程度上抑制背景电平对测量 RCS 的影响。

### 3.2 目标测量 RCS 误差指标验证结果

本节中，实验测量 RCS 与理论 RCS 对比如图 2 所示。其中，理论 RCS 为利用电磁计算软件 CST 计算得到，测量 RCS 为利用相对定标计算得到。由图 2 易知，测量 RCS 在目标与雷达视线方向呈近似垂直的角度下，与理论 RCS 有较好的吻合，而在其他角度下则存在较大偏差。由于 RCS 是使用 dB 表示，其他角度下 RCS 的绝对误差相对 RCS 值本身较小，在低信噪比条件下可接受。

本文分别使用了 FSV 方法和分段统计误差方法，对测量 RCS 的误差性能进行了评估。结合 RCS 的测量和理论对比结果，进行了 2 种方法所提指标的性能评估。

图 3 和图 4 为采用 FSV 方法得到的分析结果，其中图 3 为逐点统计的 ADM, FDM 和 GDM 随角度变化的特性曲线，而图 4 则对整体的 FSV 值进行分布统计，做出整体质量评估。

计算 ADM 时，使用了 RCS 数据的直流分量和低频分量，从一定程度上反映了数据趋势的拟合性能；计算 FDM 时，使用了数据低频分量的一阶差分和高频分量的一阶差分和二阶差分，反映 RCS 随角度剧烈变化的特征；计算 GDM 时，使用了 ADM 和 GDM 及其统计分布，综合考虑了趋势与特征变化，给出整体的视觉评估，并从整体反映了 RCS 测量值与理论值的拟合性能。

由于存在较大的基底噪声，致使系统在测量较小 RCS 时存在较大偏差。FSV 方法从整体上给出了较为客观合理的性能评估，但没能准确反映在各角度下的拟合趋势。如图 2 所示，在  $60^\circ\sim 70^\circ$  姿态角下，从视觉上应能看出有较好的拟合趋势。而在图 3 中对应角度下，ADM 有着相对更差的评价，与实际视觉评估不一致。

图 5 为采用分段统计的误差估计方法得到的结果，分别逐段统计了目标 RCS 测量值与理论值的均方误差、相关系数和 K-S 距离特性曲线。根据现有太赫兹系统测量结果，本文选取分组长度为数据总长度的 1/8，一共分为 15 组，相邻组的重复部分长度为总数据长度的 1/16，并将预处理的数据用于分段统计误差分析。均方误差统计的样本数据从  $0^\circ$  到  $255^\circ$ ，反映了数据在各段的拟合情况。从均方误差的变化曲线上看，在  $60^\circ\sim 70^\circ$ 、 $170^\circ\sim 190^\circ$  姿态角下，均方误差相对较小，而在其他角度下的均方误差较大，与实际的视觉评估结论一致。针对均方误差的取值范围，暂无对应的语言描述符对其作定性评估，只能通过特性曲线的趋势评估其局部性能。

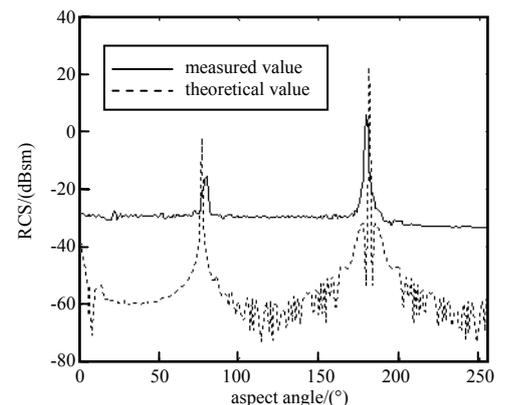


Fig.2 Comparison of the measured and theoretical values of the regular cone's RCS  
图 2 标准体圆锥 RCS 测量值与理论值对比

相关系数统计的样本与前者一致,反映了数据整体和局部的线性关系,且随姿态角变化的趋势与实际视觉评估结论基本一致,从整体上看,RCS 测量值与理论值体现出较好的线性相关性质。

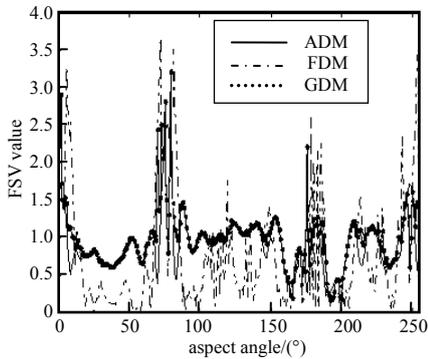


Fig.3 Characteristic curves for FSV  
图 3 FSV 特性曲线

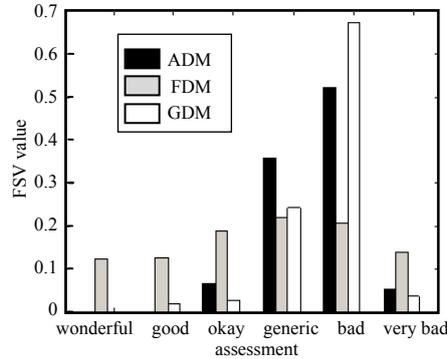


Fig.4 Credibility histogram for FSV  
图 4 FSV 可信度直方图

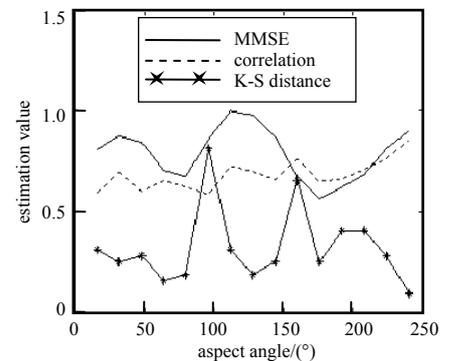


Fig.5 Characteristic curves for the estimation index  
图 5 估计指标特性曲线

K-S 距离反映了 RCS 测量值与理论值的差异程度,且其随姿态角的变化趋势与全局差分度量 GDM 一致,如图 3 所示。该指标在各数据段内进行独立计算,较好地反映了数据间局部的差异特性。

#### 4 结论

综上所述,本文所提出的分段统计指标与 FSV 所提出的指标相比,在数据性能整体评估结果上基本一致,也能较为准确地反映出测量 RCS 误差的局部特征,为分析 RCS 误差来源提供依据,也为进一步提高 RCS 测量精确度提供支持。但是分段统计使用了相对较长的数据段,在 RCS 随姿态角剧烈变化的点附近,评估质量下降。使用更少的数据,来得到相对准确的局部评估结果的估计指标,是下一步工作的方向。

#### 参考文献:

- [1] 高敬坤,王瑞君,邓彬,等. THz 频段粗糙导体圆锥的极化成像特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):401-408. (GAO Jingkun,WANG Ruijun,DENG Bin,et al. Characteristics of polarized imaging of a conducting cone with surface roughness at terahertz frequencies[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3): 401-408.)
- [2] 段素青,楚卫东,杨宁,等. 太赫兹量子级联激光器有源区增益分析和设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(1):16-20. (DUAN Suqing,CHU Weidong,YANG Ning,et al. Design of the active region gain of the terahertz quantum cascade lasers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):16-20.)
- [3] 刘盛纲,钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(5):481-486. (LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009,38(5):481-486.)
- [4] 聂在平,方大纲. 目标与环境电磁散射特性建模——理论、方法与实现(基础篇)[M]. 北京:国防工业出版社, 2009:367-380. (NIE Zaiping,FANG Dagang. The Electromagnetic Scattering Characteristics Modeling of the Target and Environment, Theory, Methodology and Realization[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2009:367-380.)
- [5] DUFFY A,ORLANDI A. A review of statistical methods for comparing two data sets[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2008,23(1):90-97.
- [6] DUFFY A P,MARTIN A J M,ORLANDI A. Feature Selective Validation (FSV) for validation of computational electromagnetic (CEM). Part I—the FSV method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006,48(3):449-459.
- [7] IEEE Std.1597.2-2010. IEEE Recommended Practice for Validation of Computational Electromagnetic Computer Modeling and Simulations[S]. New York:IEEE, 2011:1-124.
- [8] 蒋彦雯,邓彬,王宏强,等. 基于时域光谱系统的太赫兹 RCS 测量[J]. 红外与激光工程, 2014,43(7):2223-2227. (JIANG Yanwen,DENG Bin,WANG Hongqiang,et al. RCS measurement of cylinders in terahertz band based on the time-domain spectroscopy system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014,43(7):2223-2227.)
- [9] 何国瑜,卢成才,洪家才,等. 电磁散射的测量与计算[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006:34-40,244-250. (HE Guoyu,LU Chengcai,HONG Jiakai,et al. The Measurement and Calculation of Electromagnetic Scattering[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006:34-40,244-250.)

[10] 肖舒文,李柏文,陈晓盼,等. 面向目标 RCS 仿真数据验证的 FSV 改进方法[J]. 计算机仿真, 2016,33(11):14-19. (XIAO Shuwen,LI Bowen,CHEN Xiaopan,et al. An improved FSV method for targets' simulation data validation[J]. Computer Simulation, 2016,33(11):14-19.)

[11] 李国汉,王可人,金虎. 一种基于 K-S 距离的 OFDM 子载波数估计法[J]. 计算机工程, 2012,38(21):100-102. (LI Guohan,WANG Keren,JIN Hu. An OFDM sub-carrier number estimation method based on K-S distance[J]. Computer Engineering, 2012,38(21):100-102.)

[12] 皇甫堪,陈建文,楼生强. 现代数字信号处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2003:14-16. (HUANG Fukan,CHEN Jianwen,LOU Shengqiang. Modern Digital Signal Processing[M]. Beijing:Electronics Industry Press, 2003:14-16.)

作者简介:



李东起(1992-), 男, 四川省南充市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹 RCS 测量.email:2279624415@qq.com.

李彦鹏(1972-), 男, 河北省衡水市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为目标识别效果评估、自适应信号处理.

徐金钟(1981-), 男, 辽宁省鞍山市人, 学士, 主要研究方向为军事通信.

宋 炎(1993-), 男, 黑龙江省鹤岗市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹 RCS 测量.

\*\*\*\*\*

### “雷达的未来”高峰论坛征文通知

为深入贯彻党中央、国务院、中央军委提出的加快实施科技创新驱动发展战略和加快推进军民融合发展战略, 展望雷达未来在哪里, 在工业和信息化部电子科技委、中国电子学会和中国雷达行业协会的指导下, 中国电科集团科技部联合中国电子学会无线电定位技术分会拟定于 2017 年 12 月中下旬共同举办“雷达的未来”高峰论坛, 邀请国内外相关领域专家学者, 围绕未来雷达的应用、未来雷达的形态以及雷达新技术等方向, 汇集全球雷达技术等相关领域专家智慧, 畅谈雷达未来发展趋势, 提出雷达应用新方向、雷达形态发展和雷达技术创新等方面的发展倡议。现将有关事宜通知如下:

**一、论坛主题**

加强军民融合, 拓宽感知边界, 汇集全球精英, 畅谈雷达未来

**二、论坛组织单位**

指导单位: 工业和信息化部电子科学技术委员会、中国电子学会、中国雷达行业协会

主办单位: 中国电科集团科技部、中国电子学会无线电定位技术分会

协办单位: 略

承办单位: 略

**三、特邀报告**

围绕未来雷达应用、未来雷达形态和雷达新技术等方面, 邀请国内外雷达相关领域权威专家作主题报告。

**四、征文主题**

1、**未来雷达应用**: 瞄准雷达在目标探测、环境感知、地理测绘、空域管理以及大气海洋监测等领域的应用需求, 展望未来雷达新应用, 提出雷达军民融合发展新方向, 探索智慧感知应用新领域。

2、**未来雷达形态**: 立足雷达发展现状, 结合分布式体系, 开放式架构, 综合一体化、软件定义以及微系统技术发展趋势, 展望未来雷达新形态, 提出雷达形态发展的新方向。

3、**雷达新技术**: 结合雷达技术发展趋势, 研究雷达与量子、微波光子、生物交叉、云计算、大数据、人工智能等跨学科交叉融合技术, 催生雷达探测新技术, 拓宽感知边界。

**五、投稿方式**

1、投稿网址: 中国电子学会工作系统 <http://www.cie-info.org.cn/cieinfo/app/common/memberservice/index>

2、投稿方式: 先在上述投稿网址注册, 然后登录, 在“会议管理”模块下面打开“会议论文模块”, 点击“发布会议论文”, 再在“所属分会”中选择“无线电定位技术分会”, 在会议名称中选择“雷达的未来高峰论坛”, 再点击“发布”, 填写完成后点击“保存”, 在更新后的页面中, 确认无误后, 点击“操作”下面的“提交”, 即完成投稿。

3、纸质摘要和保密审查单邮寄地址

地址: 安徽省合肥市 9023 信箱 60 分箱 邮编: 230031 联系人: 祝清松 联系电话: 055165391270

4、投稿截止日期: 2017 年 9 月 30 日; 录用通知时间: 2017 年 11 月 15 日之前; 论坛召开时间: 2017 年 12 月中下旬。

5、论坛详细安排见中国电子学会([www.cie-info.org.cn](http://www.cie-info.org.cn))或《太赫兹科学与电子信息学报》编辑部网站([www.iaeej.com](http://www.iaeej.com))。