

文章编号: 2095-4980(2019)01-0013-05

W 波段低电压三次谐波回旋振荡管

李志良, 冯进军, 刘本田

(中国电子科技集团公司 第十二研究所, 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

摘要: 回旋振荡管采用三次谐波工作方式的相互作用磁场只有基波状态磁场的三分之一, 可有效降低设计难度, 具有广阔的应用前景。通过对三段式单腔结构的耦合系数、起振电流、高频场分布、模式竞争以及注波相互作用研究, 确定了工作模式为 TE_{03} 的 W 波段低电压三次谐波回旋振荡管的基本工作参数; 通过粒子模拟软件(PIC)模拟分析, 在电子注电压、注电流及速度比分别为 35 kV、4 A 和 1.6 时, 在 93.7 GHz 频点处获得 15.57 kW 的输出功率, 效率约 11.1%, 且该管可在此工作模式下稳定工作。

关键词: W 波段; 低电压; 三次谐波; 回旋振荡管; 粒子模拟

中图分类号: TN129

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0013

Study of W-band low voltage third-harmonic gyrotron oscillator

LI Zhiliang, FENG Jinjun, LIU Bentian

(The 12th Research Institute of CETC, Vacuum Electronics National Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: The third harmonic operation is of special significance due to its low magnetic field requirement for a gyrotron oscillator. By using a single cavity theory to analyse couple factor, start current, mode completion and beam-wave interaction, the operating parameters of the W-band low voltage TE_{03} mode third harmonic gyrotron oscillator are determined. Employing a Particle In Cell(PIC) code, the gyrotron oscillator is simulated. The results show that this oscillator can generate 15.57 kW output power at 93.7 GHz with over 11% of efficiency in case of 35 kV, 4 A electron beam with a velocity ratio of 1.6, and a stable operation of the device is predicted.

Keywords: W-band; low voltage; third harmonic; gyrotron oscillator; particle simulation

回旋振荡管是一种基于电子回旋脉塞不稳定性机理的快波器件, 可在毫米波和亚毫米波波带产生高功率输出。目前, 在许多领域具有广阔的应用前途, 包括热核聚变、主动拒止系统(Active Denial System, ADS)、材料处理等^[1]。如回旋振荡管采用高次谐波工作, 能够大大降低相互作用工作磁场值, 如, 工作在给定频率的 n 次谐波回旋振荡管所需磁场比在基波时减小到 $1/n$, 从而有效降低了整管配套磁体的质量、体积和制管费用^[2]。同时, 通过使用具有小体积、低造价磁体(如永磁体)的高次谐波回旋振荡管使产生射频辐射成为可能。文献[3]报道了工作于 $TE_{0,2}$ 模式, 频率为 95 GHz 的三次谐波回旋振荡管, 利用永磁体提供磁场, 输出功率为 50 kW, 该管计划用于主动防御系统, 说明回旋振荡管工作在三次谐波条件下, 需提供约 1.2 T 的磁场时, 采用永磁体的可行性。本文以 ADS 所用 10 kW 量级输出作为设计目标, 采用 $TE_{0,3}$ 工作模式, 对 W 波段低电压三次谐波回旋振荡管的高频结构和注波相互作用进行设计分析。

1 理论分析

回旋管利用工作于 TE_{mn} 模式的波导模与电子回旋模式之间的相互作用产生耦合, 从而获得高功率相干辐射。根据文献[4], 第 s 次谐波的注波耦合系数公式为:

$$H_{sm} = J_s^2 (v_{mL} R_L / R_w) J_{m \pm s}^2 (v_{mL} R_c / R_w) \quad (1)$$

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-04-04

基金项目: 国防科技重点实验室资助项目(9140C050201150C05021); 科技部国家磁约束核聚变能发展研究专项资助项目(2013GB11003)

式中: R_w , R_c 和 R_L 分别表示波导半径、电子注引导中心半径和拉莫尔半径; v_{mn} 为第一类 m 阶 Bessel 函数的第 n 个导数根。根据式(1), 得到三次谐波条件下模式耦合系数与电子注引导中心半径的关系。当电子注半径 R_c 选择位于 $J_{m\pm s}^2(v_{mn}R_c/R_w)$ 的最大值处, 也就是 $J_{m\pm s}'(v_{mn}R_c/R_w)$ 的零点处时, 可以得到最佳注波耦合效果, 即注波相互作用效率最高。根据图 1 所给耦合系数分布曲线可见, 工作模式 $TE_{0,3}$ 的电子注引导中心半径取波导半径的 0.425 倍时, 模式耦合系数最大, 注波相互作用效率最高。另外, 图 2 给出了腔体截面上的电场分布图, 根据该图也可确定出电子注在波导中的最佳相互作用位置。

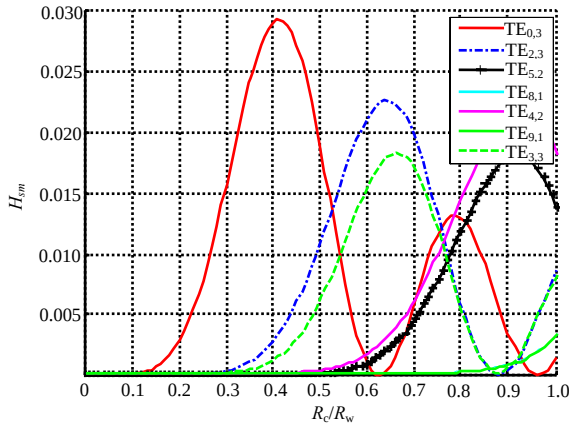


Fig.1 Coupling coefficient v/s beam radius to cavity radius ratio
图 1 模式耦合系数与引导中心关系图

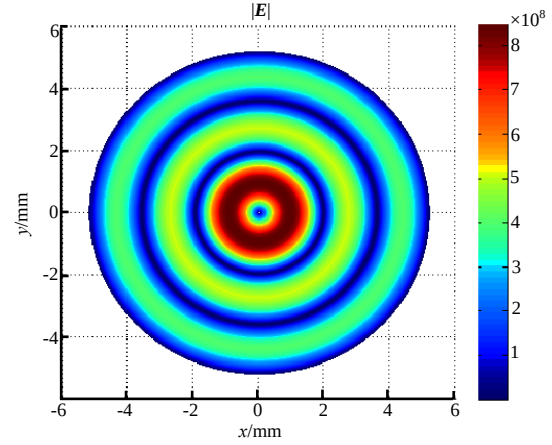


Fig.2 Radial profile of the electric field of $TE_{0,3}$ mode in the cavity
图 2 腔体截面上的电场分布图

考虑到高频系统持续振荡激励的稳定性, 需进一步分析腔体内工作模式与主要竞争模式的起振条件。根据线性化单模理论中起振电流表达式^[5]

$$\frac{-1}{I_{\text{start}}} = \left(\frac{QZ_0 e}{8\gamma_0 m_e c^2} \right) \left(\frac{\pi}{\lambda} \int_0^L |f_{mn}(z)|^2 dz \right)^{-1} \cdot (k_{mn} C_{mn} G_{mn} / \beta_{z0})^2 \left(1 + \frac{\omega \beta_{\perp 0}}{2v_{z0}} \frac{\partial}{\partial \Delta_s} \right) \left| \int_0^L f_{mn}(z) e^{i\Delta_s z} dz \right|^2 \quad (2)$$

可计算出各模式起振电流在腔体内随相互作用磁场 B_0 的变化情况。式中: $\Delta_s(z) = \omega / v_{z0} (1 - s\Omega_0 / \omega\gamma_0)$; $f_{mn}(z)$ 为归一化纵向场分布函数; $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \approx 377 \Omega$; $G_{mn} = J_{m-s}(k_{mn}R_c)$, 而 $C_{mn} = [\sqrt{\pi(v_{mn}^2 - m^2)} J_m(v_{mn})]^{-1}$ 为归一化常数; γ_0 , Q , m_e , k_{mn} 分别表示相对论因子、品质因数、电子质量和横向波数, 而 β_{z0} , $\beta_{\perp 0}$ 则分别表示电子归一化后的纵向和横向速度。

图 3 给出了在注电压和速度比分别为 35 kV 和 1.6 时, 工作模式 $TE_{0,3}$ 和主要竞争模式 $TE_{2,3}$, $TE_{5,2}$ 的起振电流曲线。由图可见, 通过选择合适的磁场值等参量, 可在一定磁场范围, 工作模式与其他竞争模式有一定的间隔度, 且起振电流低于竞争模式的起振电流, 不会受到竞争模式的干扰。从而实现工作模式稳定工作, 同时抑制竞争模式的目标。由图可见, 本文可取磁场值 $B_0 = 1.185$ T, 电流 4 A 作为工作参数。

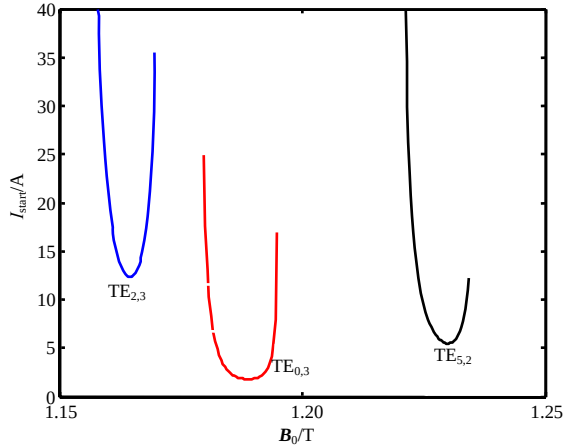


Fig.3 Dependence of the starting current on the magnetic field
图 3 起振电流与相互作用磁场关系图

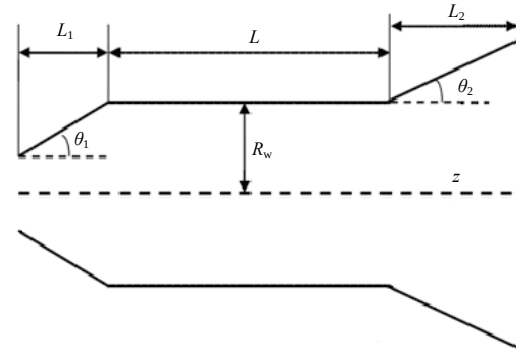


Fig.4 Schematic diagram of a single three-section cavity gyrotron oscillator
图 4 单腔回旋振荡管形状

本文设计的单腔回旋振荡管, 采用如图 4 所示的三段式谐振腔结构, 包括输入渐变段 L_1 、中间均匀段 L 和

输出渐变段 L_2 。通过冷腔计算方法，由无源波动方程及边界条件^[6]

$$\begin{cases} \frac{d^2 f(z)}{dz^2} + \left[\frac{\omega^2}{c^2} - k_{mn}^2(z) \right] f(z) = 0 \\ \frac{df(z)}{dz} - ik_z(z)f(z) \Big|_{z=z_{in}} = 0 \\ \frac{df(z)}{dz} - ik_z(z)f(z) \Big|_{z=z_{out}} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

可对参量进行选择、计算和优化，得出冷腔的纵向场分布函数，从而初步确定腔体的结构尺寸。式中： $k_{mn}(z)$ 为横向波数； $k_z(z)$ 为纵向波数。图 5 为利用线性理论计算得到的腔体结构与场幅值分布。根据单模非线性理论^[7-8]开发的非线性计算软件，计算优化给定注参数、频率和工作模式下的输出功率和效率。图 6 为电子通过腔体注波相互作用区，其电子能量演变趋势。可见，经调制后的电子到达输出口，大部分电子交出了能量，只有较少部分电子获得能量。图 7 为互作用输出效率沿轴向不同腔体位置的变化曲线，由图可见，该管非线性理论计算在腔体输出端达到最大，并稳定输出，在 93.7 GHz 频率处获得 18.35 kW 输出功率，13.3% 的效率。表 1 给出了高频腔体的主要设计参数。

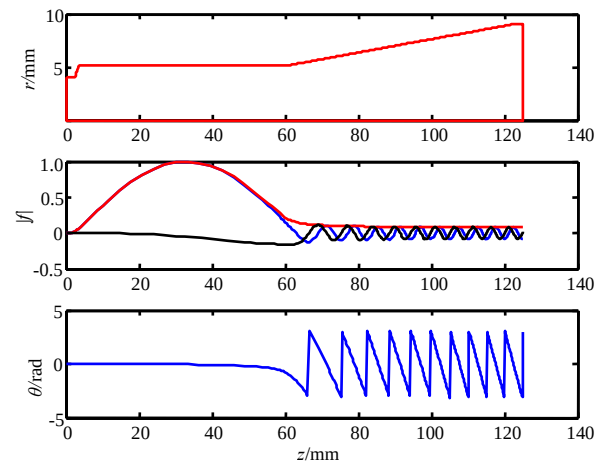


Fig.5 Axial distribution of the field and phase variation of cavity
图 5 回旋振荡管高频结构、场幅值分布和相位分布图

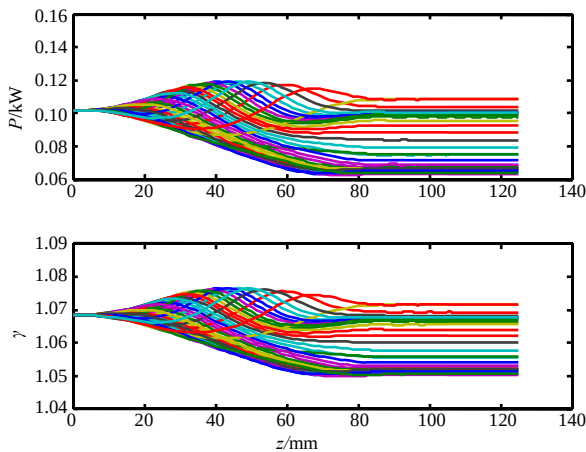


Fig.6 Electronic energy evolution along axes
图 6 电子归一化能量沿轴向变化

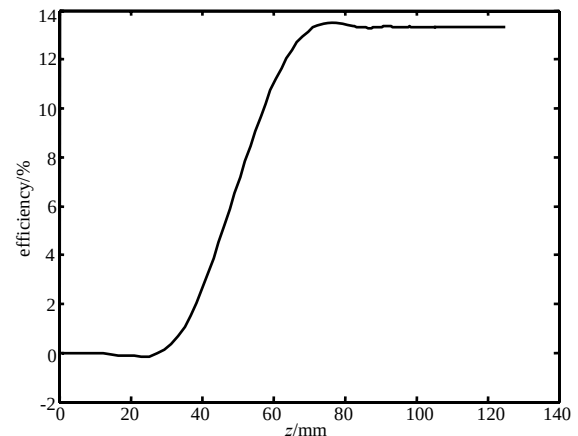


Fig.7 Output efficiency along axes
图 7 注波相互作用效率随纵向长度的变化曲线

表 1 W 波段 TE₀₃ 模三次谐波回旋振荡管设计参数

Table1 Design parameters for the W-band TE₀₃ third-harmonic gyrotron oscillator

beam voltage U_0/kV	beam current I_0/A	guiding center R_c	velocity radio α	operating mode	circuit radius R_w/mm	cavity length L/mm	magnetic field B_0/T
35	4	$0.425 R_w$	1.6	TE ₀₃	5.2	48	1.185

2 注波相互作用模拟计算结果

为了验证上述回旋管理论计算的高频腔体输出结果，按照上述非线性理论优化得出的设计参数，通过 PIC(MAGIC 软件)建模进一步模拟分析，获得较为理想且参数较为一致的输出结果^[9]。

图 8 为腔内电场强度分布图，是通过 PIC 模拟得到的热腔场分布，可见工作模式为 TE₀₃ 模，且没有其他模式的干扰，这与上文模拟的冷腔结果一致性较好，

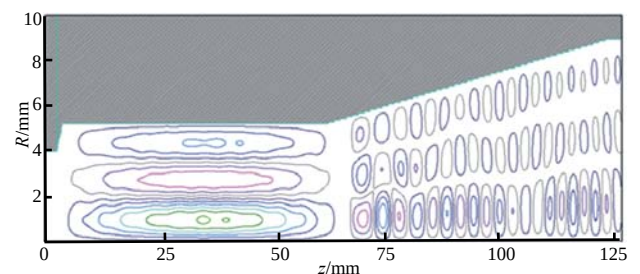


Fig.8 Contour of angular electric field of TE₀₃ mode in the cavity
图 8 腔体内角向场分布图

因此可以获得比较稳定的输出功率。结合图 9 中的对输出端口处取傅里叶变换得到频谱分析,可知谐振腔工作频率在 93.7 GHz,输出频谱比较稳定,没有其他杂模干扰,从而达到设计工作频率值。图 10 为在输出端口加滤波命令设置后的平均功率流随时间的变化曲线,可见电子进入输入渐变段后开始有部分电子把能量交给高频场,在 70 ns 后,输出渐变段位置处的功率流已经趋于稳定输出,达到 15.57 kW 输出功率,对应电子效率为 11.1%。图 11 给出了电子通过注波相互作用区时,其电子横向相空间演变情况,由图可知,调制后电子到达输出端口,大部分电子交出能量,只有较少部分电子获得能量,并形成 3 个角向群聚中心,即工作在三次谐波状态。

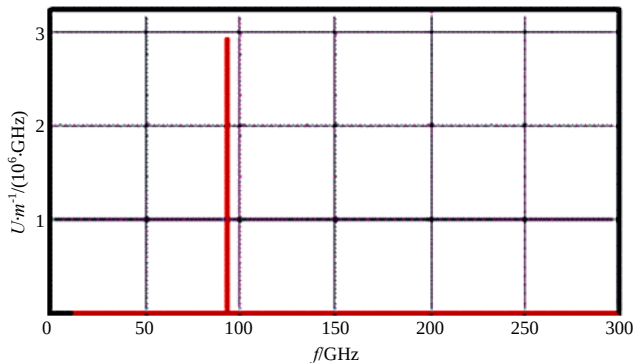


Fig.9 FFT frequency spectrum of the field at output port
图 9 输出端口电磁场频谱分析

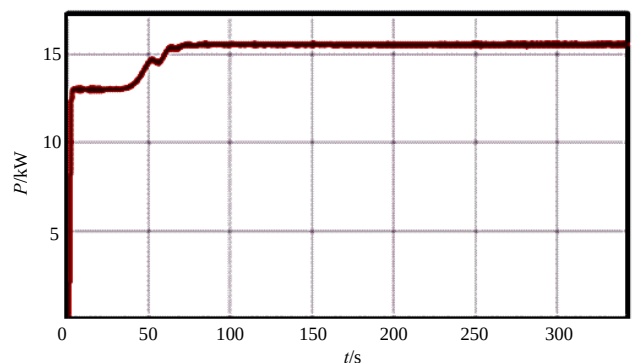


Fig.10 Simulated time evolution of output power in PIC code
图 10 平均功率随时间的变化曲线

通过上述 2 种计算结果的对比分析,发现 PIC 与非线性理论计算的电子效率约有 2.2% 的偏差。这主要是由于利用单模非线性理论开发的计算程序,仅计算了单一的工作模式,没有考虑多模及频移等因素的影响;而 PIC 计算时,考虑了多模多频等因素引起的非线性问题,故该偏差应在误差允许范围之内。

3 结论

本文以 $TE_{0,3}$ 作为工作模式,采用传统的三段式高频腔体结构,根据回旋振荡管的线性和非线性理论,对 W 波段低电压三次谐波单腔回旋振荡管进行了理论分析和数值模拟^[10]。经过计算,给出了该单腔回旋振荡管的优化设计参数,并通过 PIC 进一步分析对比。计算结果表明,该 $TE_{0,3}$ 模三次谐波回旋振荡管,可在 93.7 GHz 频率处获得 15.57 kW 的输出功率,11.1% 的效率。本文的计算结果将对用于主动防御系统的 W 波段回旋振荡管工程应用提供有益参考。

参考文献:

- [1] BRATMAN V, GLYAVIN M, IDEHARA T, et al. Review of subterahertz and terahertz gyrodevices at IAP RAS and FIR FU[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(1): 36–43.
- [2] MCDERMOTT D B, STATZMAN R C, BALKCUM A J, et al. 94 GHz 25 kW CW low voltage harmonic gyrotron[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(3): 402–408.
- [3] NEILSON J M, READ M, IVES L. Design and assembly of a permanent magnet gyrotron for active denial systems[C]// Proc. IEEE International Vacuum Electronics Conference. USA: [s.n.], 2010: 337–338.
- [4] MCDERMOTT D B, BALKCUM A J, LUHMANN N C Jr. 35 GHz 25 kW CW low-voltage third-harmonic gyrotron[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 24(3): 613–619.
- [5] BORIE E, JODICKE B. Comments on the linear theory of the gyrotron[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1988, 16(2): 116–121.
- [6] AIRILA M I, DUMBRAJS O. Stochastic processes in gyrotrons[J]. Nuclear Fusion, 2003(43): 1446–1453.
- [7] FLIFLET A W, READ M E, CHU K R, et al. A self-consistent field theory for gyrotron oscillator: application to a low Q gyromonotron[J]. International Journal of Electronics, 1983, 53(6): 505–521.

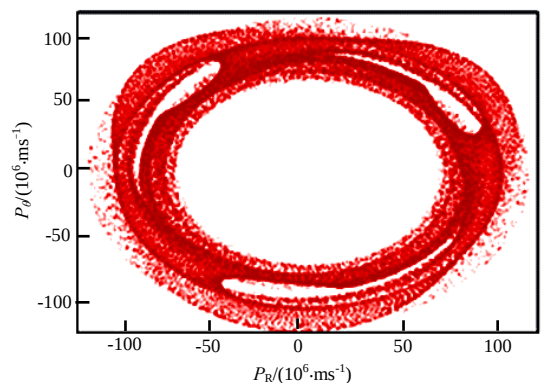


Fig.11 Transversal component of electron phase space
图 11 电子横向相空间分布

- [8] KARTIKEYAN M V,BORIE E,THUMM M K A. Gyrotrons:high power microwave and millimeter wave technology[M]. New York:Springer Press, 2004.
- [9] LI Zhiliang,FENG Jinjun,LIU Bentian,et al. Analysis of 94 GHz low voltage second-harmonic gyrotron[C]// Proceeding IEEE International Vacuum Electronics Conference. USA:[s.n.], 2012:509-510.
- [10] 李志良,冯进军,刘本田,等. W 波段二次谐波回旋行波管放大器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):365-368. (LI Zhiliang,FENG Jinjun,LIU Bentian,et al. Study on W-band second-harmonic wave gyrotron traveling wave amplifier[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):365-368.)

作者简介:



李志良(1979-), 男, 安徽省宿州市人, 高级工程师, 主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件.email:lizhiliang100@163.com.

冯进军(1966-), 男, 山西省运城市人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为毫米波/太赫兹真空功率器件、真空微电子学、微波管 CAD 和高功率回旋器件等.

刘本田(1971-), 男, 河南省安阳市人, 研究员, 主要从事微波毫米波回旋器件的理论和实验研究.

第二届现代雷达论坛—2019 国际智能化探测感知大会

各相关单位:

面向国家、军队、社会在探测与感知领域的重大需求, 探测感知的数据智能、自主智能、群体智能已经成为必然的应用方向; 同时探测感知的基础性、前沿性、创新性的热点技术也成为了行业内的研究焦点。2018 年《现代雷达》编辑部举办了首届“智能雷达与先进技术”论坛, 开启了向智能雷达与先进技术的深度和广度的探寻与研讨。

2019 年恰逢《现代雷达》杂志创刊 40 周年, 作为雷达领域里的核心期刊, 每一步的成长都离不开雷达界专家和同仁的支持。在中国电子科技集团公司第十四研究所和中国雷达行业协会的关心指导下, 我们特邀中国电子科技集团公司智能感知技术重点实验室、国防科技大学电子科学学院等, 于 6 月 10 日在贵州省贵阳市以“智能化探测感知”为主题, 共同主办第二届国际智能化探测感知大会。同期举办智能化探测感知技术与器件、雷达智能化分系统、智能传感器模块、特种电源展示。会议期间, 我们将围绕大会主题举办系列活动: 1、大会报告 2、分论坛 3、优秀论文评选 4、专家与企业对话沙龙 5、参展产品评比

我们拟邀请雷达领域德高望重的院士和国内外中青年专家莅临本次大会, 聚焦智能化探测与感知领域的最新研究成果, 分享新科技、新高度的精粹。期望能够广聚英才, 汇集智慧, 凝聚共识, 深入研讨, 共同推动国防事业的装备发展和技术进步。

贵阳市的国家级高新区和省级装备技术产业园区聚集了大批的中国航天、航空、电子信息、大数据和智能制造等领域里的研究院和企业。真诚邀请国内外科研院所、企业的专家、嘉宾、专业技术人员和科技管理人员前来参会参展, 交流促进、创新发展, 共创未来!

一、组织机构

大会名誉主席: 张光义院士 贇德院士

主办单位:

《现代雷达》编辑部

中国电子科技集团公司智能感知技术重点实验室

国防科技大学电子科学学院

二、会议地点:

贵州省贵阳市 中国航天科工集团二院二十三所

协办单位(特邀):

中国雷达行业协会资深专家委员会

中国航空学会信息融合分会

中国造船工程学会电子技术学会委员会

中国兵工学会电磁技术专业委员会

中国雷达行业协会海用电子分会

中国电子学会青年科学家俱乐部雷达与信号处理系统专委会

三、会议日期:

2019 年 6 月 10 日-12 日(6 月 10 日报到)

更多详情登录网站: <http://www.iaeej.com>