

文章编号:1001-893X(2011)06-0006-06

S/Ka 频段测控通信系统设计与关键技术分析^{*}

刘云阁

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:分析了 S/Ka 频段测控通信系统的组成、运行模式、天/地基测控体制兼容性设计,讨论了窄波束天线的角捕获与跟踪、Ka 频段信道及功放、高速调制解调、跳/扩频测控等关键技术,并给出了解决措施。分析计算和实物测试的结果证明系统设计方案有效可行。

关键词:S/Ka 频段;测控通信;天地一体化测控系统;体制兼容性

中图分类号:V556;V476 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.06.002

S/Ka Band TT&C Communication System Design and Key Techniques Analysis

LIU Yun-ge

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract:The system composition, operation mode and space&ground compatibility design of the S/Ka band TT&C communication system are analysed. Key techniques such as the angle acquisition and track of narrow beam antenna, Ka band channel and power amplifier, high rate data transfer, DS/FH TT&C are discussed and solutions are provided. Analysis and calculation are presented to verify the validity and feasibility of the proposed scheme.

Key words:S/Ka band; TT&C communication; integrated space&ground TT&C system; system compatibility

1 引 言

随着航天技术及其应用的蓬勃发展,建立空间实验室及进一步建立长期有人照料的空间站、高分辨率对地观测等后续计划将陆续启动,我国载人登月工程也已提上议事日程,这些工程的建设 and 应用对测控通信系统的数据传输速率、测轨精度、抗干扰能力等提出了更高的要求,我国现有测控手段已难以满足其需求。

(1)空间站工程

现阶段空间站工程提出的下行数据速率的需求高达 600 Mbit/s 以上,我国现有的 S 频段测控系统已无法满足这一要求,采用 Ka 频段后,可用频段扩

宽到 1.5 GHz,则较易满足这一要求。

载人航天交会对接时,要求地面测控站提供高精度测轨,采用 Ka 频段后,为提高系统测速和测角的精度提供了有利条件^[1]。

(2)高分辨力对地观测

高分辨力对地观测要求数传速率达到 2 Gbit/s,这样高的数传速率在今后升级的 TDRSS 中也是无法完全满足的,在一些应用场合需要采用天-地“直达”传输的 Ka 频段测控通信系统^[2]。

(3)军用测控网

Ka 频段带宽宽、波束窄、空间抗干扰能力强、机动能力好,能够实现宽带直扩和混合跳扩频,有效提高系统抗干扰能力,可成为军用测控网有效组成部分。

^{*} 收稿日期:2011-05-24;修回日期:2011-06-15

(4)载人登月

我国已规划“登、驻、用”三步走的登月计划。陆基 S/Ka 频段测控通信设备是提升测控通信能力、满足载人登月阶段高码速率上、下行信息传输要求的重要建设项目。

利用 Ka 频段进行测控具有频带宽、抗干扰能力强、测轨精度高、更易机动和隐蔽等特点,又加之利用 USB(统一 S 频段)地面测控网和 TDRSS 系统进行测控存在一定的限制,发展新型 S/Ka 频段测控通信网将是未来测控通信系统必然的选择,其原因如下:采用 25.5 ~ 27 GHz 工作频段,可与中继卫星的星间链路频段相兼容,可以共用一个用户终端,同时还支持 S 频段测控业务,易于实现天地一体化协同工作;频带宽,具备 1 Gbit/s 以上的高速数传能力,并为应用宽带跳频、直扩等抗干扰测控体制创造了条件;天线波束窄,具有空间选择抗干扰、抗截获能力;可提高测轨精度。

美国空军测控网早就提出了 Ka 频段测控网的设想,美国 NASA 为了提高对中低轨航天器的测控通信支持能力,制定了 Ka 频段转移计划,建立了 Ka 频段地面站进行相关的演示验证试验^[3]。欧空局的规划也在由 S 频段向 X、Ka 转移^[1]。文献[3]给出了 NASA 试验系统及相关试验的报道,但具体技术细节不详。2006 年 5 月,NASA 提出了建设毫米波月地通信主干线用于地月之间大容量通信的规划^[4]。美国现已在白沙靶场建立了 18 m 的 Ka 频段测控通信站,用于月球和地球轨道飞行器的测控通信。国内也逐步开始进行 Ka 频段测控通信系统的研究,为兼容现有测控通信系统,系统面临与天地一体化兼容性设计问题,并需要解决窄波束捕获跟踪、Ka 频段信道及功放、高速数据调制解调、扩跳结合测控等关键技术。

2 系统总体设计

2.1 系统组成及运行模式

S/Ka 频段地面测控通信系统由 S/Ka 频段地面测控通信站、S/Ka 频段用户终端以及相应的地面网络组成,基本组成如图 1 所示。

在实际应用中可以建设多个 S/Ka 频段地面站,实现组网应用。S/Ka 频段测控设备与其它地基 S 频段设备及中继卫星系统一起均是天地一体化测控通信网的测控通信资源,由全网统一的运行管理系统统一进行调度,航天器按使用优先级共同使用天

地基资源。

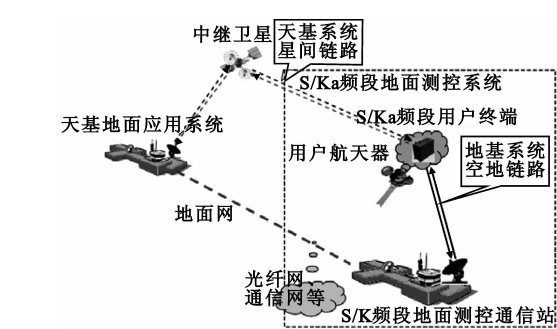


图 1 S/Ka 频段测控通信系统及天地一体化应用示意图
Fig.1 Illustration of S/Ka band TT&C communication system and integrated space & ground application

S/Ka 频段测控设备在测控通信网运行管理系统的统一调度和管理下运行,要求具备按照运行管理系统统一的协议进行远程操作配置和自动化运行的能力。

S/Ka 频段测控系统地面站由 S/Ka 双频段天线、S 频段上下行链路、Ka 频段上下行链路、数传基带、测控基带、监控、时频及测试标校等设备组成,如图 2 所示。

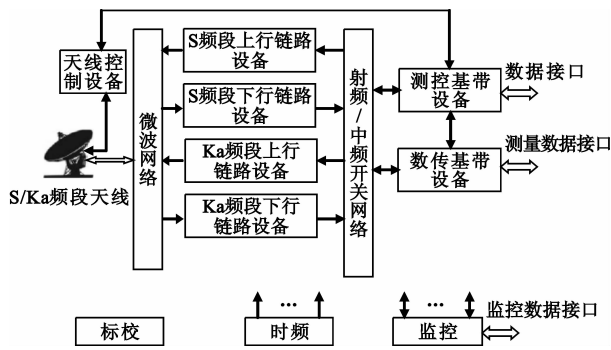


图 2 S/Ka 频段测控通信网地面站设备组成示意图
Fig.2 Composition of S/Ka TT&C communication system ground station

地面测控设备在工作频段允许的情况下,其工作模式应尽量适应现有的测控体制,满足日益增长的测控任务需求。各工作模式共用智能化综合基带设备和多模式双频段用户终端平台,工作模式的切换通过软件下载实现。工作模式设计如下:标准 TT&C、扩频 TT&C、跳扩结合 TT&C、S 频段数传和 Ka 频段数传。

S/Ka 频段用户终端包括天馈分机、多模双频段应答机、高速数传模块三大部分,其组成原理框图如图 3 所示。用户终端采用对地及对星两副天线,在频段及信号体制、波形上兼容地基及天基系统,可以

工作于地基及天基系统,用户终端将是实现天地一体化的关键环节。

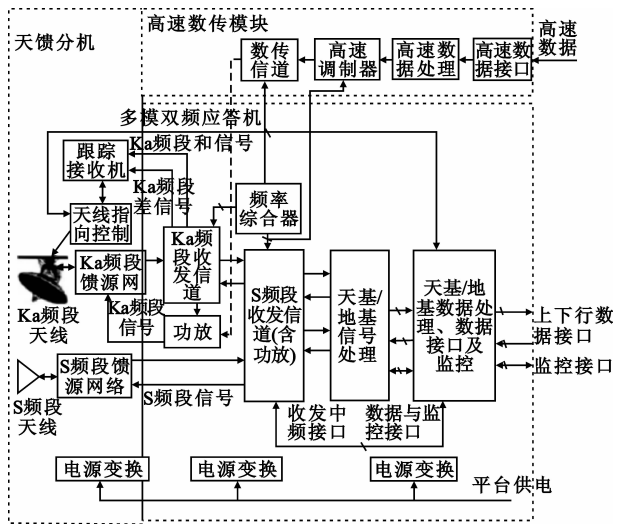


图 3 S/Ka 频段用户终端组成原理框图
Fig.3 Composition of S/Ka band user terminals

2.2 天/地基测控体制兼容性设计

(1)S/Ka 频段测控通信系统地面站和天基中继卫星系统及现有地基测控通信系统实现部分功能与指标的兼容

S/Ka 频段测控通信系统地面站工作频段兼容中继卫星系统星间链路工作频段,其 S 频段工作频段与地基 USB 测控系统相同;Ka 频段上行链路工作频段为 22.55 ~ 23.55 GHz,下行链路工作频段为 25.5 ~ 27 GHz^[1]。其工作体制与地基测控系统标准 TT&C 和扩频 TT&C 测控体制相同,可通过终端的设置兼容中继卫星系统的测距体制。其数传调制体制兼容中继卫星系统和地基地面站的调制体制,支持高于中继卫星系统的数传码速率。

(2)系统传输协议的兼容

传输协议的标准化是实现天/地基测控网兼容的核心,其中包括地面段以及空间段的协议。地面段的信息传输采用 TCP/IP 协议已成为各国航天机构的首选。在空间段的信息传输方面可供选择的协议有多种,这些协议在实现的功能、效率和互操作等方面各有其特点,而最终实现的端到端信息传输质量则是各层协议综合作用的结果。

(3)航天器用户终端的兼容

除将航天器用户终端设计为与天基系统应用相同工作频率外,还要求天线兼容“向上对中继卫星”和“向下对地面测控站”两种工作模式,可以采用切

换天线分时工作或配置上、下天线、频分或码分等方式实现同时与地基和天基系统建立链路等方案。

3 关键技术及解决措施

3.1 窄波束天线的角捕获与跟踪技术

频率升高到 Ka 频段以后,波束较 S 频段变窄了 1/12.4 倍,又要捕获跟踪低轨的高动态目标,这将是一个新的技术难点。

3.1.1 目标的捕获

解决窄波束天线的捕获可采取 S 频段引导或 Ka 频段直接捕获两种方案。

(1)方案 1:S 频段引导

用户终端和地面站均采用双频段天线,每一个航天器上需配置 S/Ka 双频段用户终端,并提供相应的 S 频段信标,地面天线用低频段进行引导,然后再进行 Ka 频段天线的跟踪。根据文献[5]所述的计算方法,以 S 频段天线将目标引导至 Ka 频段半功率波束宽度以内的 3 次引导成功概率优于 99.6%,满足测控系统角度引导需求,因此,当航天器同时发射 S 频段和 Ka 频段信号时,以 S 频段宽波束引导 Ka 频段窄波束天线实现角度捕获不失为一种稳妥可行的实现方案。

(2)方案 2:Ka 频段直接捕获

在系统设计上,还需要考虑到一旦 S 频段信标出现故障或其它因素造成 S 频段信号不可用时,将导致地面天线无法实现捕获的可能性,因此地面系统还需要具有 Ka 频段直接捕获的手段。

其一是利用小口径 Ka 引导天线引导主天线跟踪的方式,利用较宽波束的 Ka 引导天线加窄带环的方式,实现低信噪比状态下先期捕获跟踪目标,再将天线指向引入主天线波束范围内,该方案的难点在于低信噪比高动态信号的角误差信号提取。跟踪接收机设计时采用相干检波的方法提取角误差信号,载波环选用三阶环,引导信号为单频信号且引导天线接收 S/Φ 大于等于 25 dBHz,捕获及角误差提取总时间约为 1.85 s。通过计算,经过两次引导可达到 99% 的引导概率,满足测控系统角度引导需求。

其二是地面站天线可设计为具有 Ka 馈源多波束的 S/Ka 双频段天线,利用多波束天线空间扫描方式捕获跟踪目标,将天线指向引导入 Ka 频段的窄波束中,该方案设备原理框图如图 4 所示。其中,ACU 为天线控制单元,PDU 为电源分配单元,ADU 为天线驱动单元。

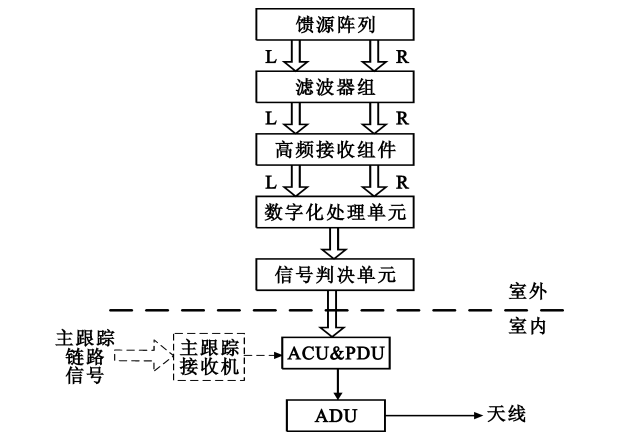


图 4 多波束引导接收机设备原理框图
Fig.4 Composition of multi-beam guiding tracking receiver

其三是采用波束展宽技术设计 Ka 频段引导馈源,将天线指向引导入 Ka 频段的窄波束中,需要进一步仿真分析 Ka 频段窄波束展宽到满足要求的波束宽度的可能性。

3.1.2 目标的跟踪

影响大天线目标跟踪性能的重要因素是天线的动态滞后问题。由于目标运动角加速度引起的动态滞后误差由下式计算:

$$\delta = \frac{\ddot{\theta}}{K_a}$$
(1)

式中, δ 为伺服系统动态滞后误差, $\ddot{\theta}$ 为目标相对于天线运动的角加速度, K_a 为伺服系统位置闭环传递函数(加速度常数)。

可见,在其它因素不变的前提下,加速度常数越大,动态滞后就越小。采用复合控制技术可有效地提高系统的加速度常数。伺服控制系统原理框图如图 5 所示,采用复合控制技术的原理框图如图 6 所示,图中 $W_1(S)$ 是控制器的传递函数, $W_2(S)$ 表示包括速度环、电流环、天线结构在内的控制对象的传递函数, $W_b(S) \cdot W_2(S)$ 为前馈补偿传递函数。

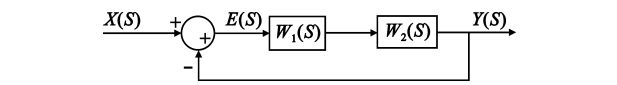


图 5 伺服控制系统原理框图
Fig.5 Schematic block diagram of servo control system

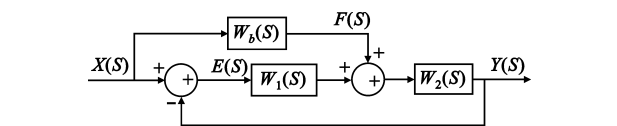


图 6 复合控制原理框图
Fig.6 Schematic block diagram of compound servo control system

系统的误差传递函数为

$$\phi(S) = \frac{1 - W_b W_2}{1 + W_1 W_2}$$
(2)

若选择前馈补偿传递函数 $W_b(S) \cdot W_2(S)$ 接近于 1,可以有效地减小跟踪误差。以 15 m 转台式方位俯仰型天线座伺服系统为例,未采用复合控制技术时加速度常数只能达到 8,采用复合控制技术后其加速度常数可达到 40 左右,工程计算时取值为 40。

在天线跟踪轨道高度为 400 km、目标线速度为 12 km/s 条件下,根据文献[6],可计算出目标的最大加速度。考虑目标变轨等因素,在进行误差分析计算时,我们选取最大加速度为 $1^\circ/s^2$,按照加速度常数 40 计算,伺服系统在方位最大加速度及俯仰最大加速度时的动态滞后误差分别为 0.025° ,天线可以可靠跟踪目标。

3.2 Ka 频段信道及功放技术

地面测控站和用户终端均需进行 Ka 频段的信道设计,其信道设计质量直接影响到地面测控站和用户终端的工作性能,同时能否提供系统所需的 Ka 频段功率决定了系统能否建立正常的空间链路,因此,Ka 频段的信道设计以及大功率功放技术至关重要。Ka 频段固态功放的研制采取的技术措施包括功率合成幅相一致性控制、散热仿真设计等。

Ka 频段信道带宽将达到 1 GHz 以上,如何在如此宽的带宽下保证信道特性满足系统跳频测控及高速数据传输的需求,是其设计和研制的关键。减小 Ka 频段信号的传输路径是重要措施,地面测控站和用户终端的接收信道设计中将 LNA 和 D/C 两个模块合二为一,设计成一个 LNB(Low Noise Block)组件模式。LNB 原理电路图如图 7 所示,在低噪放前加一级隔离器,有效改善了输入驻波;下变频器选用谐波混频器,采用低本振,降低了本振的实现难度,并且对本振的偶次谐波输出有很好的抑制作用。

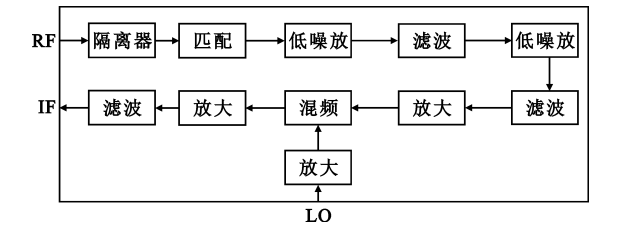


图 7 LNB 原理电路图
Fig.7 Block diagram of LNB

LNB 实测指标如表 1 所示。

表 1 LNB 实测指标
Table 1 The specification test result of LNB

测试项目	实测值
噪声系数/dB	1.64
增益/dB	61.40
本振抑制度/dBc	- 80
输出 P_{-1dB} /dBm	7.70
三阶交调/dBc	- 47
3 dB 带宽/MHz	1 100
输入驻波比	1.23
输出驻波比	1.16

3.3 高速数据调制解调技术

建立 Ka 频段地面测控网重要目的之一是适应用户航天器大数据容量和高实时性的数据传输要求,目前,TDRSS 高速数传的速率设计 requirements 是 300 Mbit/s,空间站的数据传输速率要求大于 600 Mbit/s,后续航天器可能有更高的数据传输速率要求(高分辨力对地观测要求达到2 Gbit/s)。要在目前的器件技术水平上,实现如此高速数据的处理是一项技术挑战。

在系统设计上,要解决高性能 Ka 频段宽带信道,以及极化复用技术的应用等;在设备设计方面的关键在于高速 A/D、并行处理和信道均衡。A/D 采样是解调器实施各种算法的瓶颈,A/D 采样的质量直接影响解调的质量,其中最关键的是 A/D 采样的精度和 A/D 的输出信噪比,同时应确保高速输出数据间无串扰。接收机采用高速 A/D 进行数字化,其速率大大超过了 FPGA 的处理能力,必须进行并行化,其后的数字处理也相应地要采用并行处理技术。在无线信道中传输高速率数据时,码间干扰被认为是降低误码率的主要原因,而均衡正是对付码间干扰的一项有效技术。高速数据接收处理原理框图如图 8 所示。

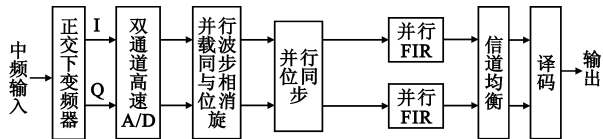


图 8 高速数据接收处理原理框图

Fig.8 Schematic block diagram of high data rate receiver

实测结果表明,该方案可实现1.2 Gbit/s高速数据的接收解调。

3.4 跳/扩结合测控技术

在跳/扩结合测控体制下,扩频信号由载波频率跳变的直接序列信号组成,相比单一扩频,组合扩频可以把直扩和跳扩的优点结合起来,提供更强的抗干扰性能。扩跳结合模式原理框图如图 9 所示,发端将包含测量信号和信息的伪码序列直接调制在跳频载波上发送,测控应答机接收后转发该信号,接收端完成信号同步解跳后,进行信号的解扩解调,完成测距、测速和信息解调。跳扩结合体制应用于测控领域的主要问题是跳频破坏了载波相位的连续性,使得相干多普勒测速无法进行;另外,大动态低信噪比条件下组合扩频信号的快速捕获和跟踪也是十分关键的技术问题。如果能够采用 DDS 来产生跳频载波,就可以在跳频点转换时保持载波相位的连续性,使相干多普勒测速成为可能。对于慢跳频信号的捕获可采取固定跳频点等待的方式,对于快跳频信号的捕获可采取同步头对捕获过程进行引导。

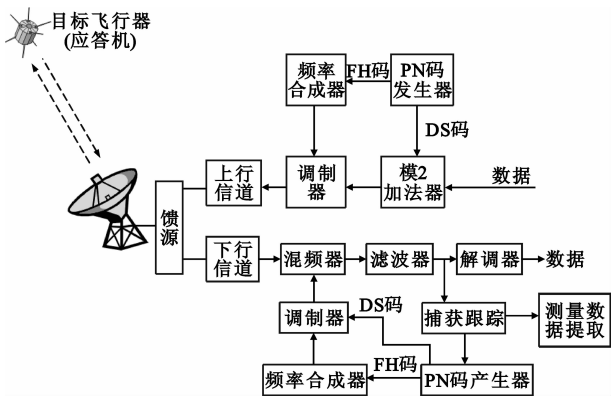


图 9 扩跳结合模式原理框图

Fig.9 Schematic block diagram of FH/DS TT&C system

4 结束语

本文对 S/Ka 频段测控通信系统进行了总体设计,分析了系统的关键技术,提出了可行的解决方案。为满足后续工程建设的需要,急需对窄波束的捕获跟踪方案进行演示试验验证。另外,需要加强 Ka 频段大功率功放的研究,对于跳/扩结合的测控体制需要重点研究解决高跳速下信号捕获跟踪及跳频系统高精度测速的问题。随着各种航天应用的蓬勃发展、系统研究的深入、关键技术的突破,我国 S/Ka 测控通信系统的建设势在必行,并将在空间站工程、高分辨率对地观测、军用测控、载人登月等工程

中大有作为。

参考文献:

[1] 刘嘉兴.再论发展 Ka 频段测控通信网的思考[J].电讯技术,2008,48(12):90-97.
LIU Jia-xing. Rediscussion on the Consideration of Developing Ka TT&C Communication Network[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(12): 90-97. (in Chinese)

[2] Alex T Nguyen, Xiangrong Zhou, Michael Hadjitheodosiou, et al. A direct-to-ground Architecture for Supporting Commercial Communication from the International Space Station [C]//Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE, 2002: 2989-2993.

[3] 张纪生.哥达德航天中心地基、地基测控网的 Ka 频段过渡计划[J].飞行器测控学报,2003,22(1):81-87.
ZHANG Ji-sheng. The upgrating scheme toward Ka frequency band of Gold Stone Space Center and TT&C ground station network[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2003, 22(1): 81-87. (in Chinese)

[4] 2005~2030 年 NASA 空间通信与导航体系结构建议 [Z]. 张纪生, 译. 北京: 北京跟踪与通信技术研究所, 2007.

NASA's communication and navigation system architecture in years from 2005 to 2030 [M]. Translated by ZHANG Ji-sheng. Beijing: Institute of Tracking and Communication Techniques, 2007. (in Chinese)

[5] 电子工业部第十研究所.统一载波测控系统讲义[M].成都:《电讯技术》编辑部,1997:53-54.
The 10th Institute of the Ministry of Electronic Industry. Teaching Material for United Carrier TT&C System [M]. Chengdu: Telecommunication Engineering Agency, 1997: 53-54. (in Chinese)

[6] 陈芳允.卫星测控手册[M].北京:科学出版社,1992:232-317.
CHEN Fang-yun. Satellite TT&C Manual [M]. Beijing: Science Press, 1992: 232-317. (in Chinese)

作者简介:

刘云阁(1977—),女,河南鲁山人,2004 年获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为飞行器测控与卫星应用。
LIU Yun-ge was born in Lushan, Henan Province, in 1977. She received the M.S. degree in 2004. She is now an engineer. Her research concerns aircraft TT&C and satellite application.
Email: liuyunge@163.com



《电讯技术》征稿的新要求

为了促进本刊的国际化进程,进一步扩大影响力,为广大科技人员搭建更高层次的学术研究和学术交流平台,现对来稿作如下几点新的要求:

- (1)来稿中的图题、表题应给出对应的英文翻译;
- (2)中文参考文献采用双语著录;
- (3)属于基金项目的来稿应给出项目的英文翻译;
- (4)提供作者简介的英文翻译,其中应包括作者的出生年、籍贯、何时获得已有学位、研究方向等内容,可参见 IEEE 系列刊物作者简介的翻译;
- (5)欢迎作者将具有原创性的研究成果直接以全英文论文投稿,应注意语言流畅,专业术语准确,符合科技英语表达习惯,并附上中文标题、单位、摘要和关键词,以及中文作者简介;
- (6)为了保证出版的及时性,作者不得在自校阶段对稿件作大幅修改,否则,将按新投稿件处理,编辑部保留追究由此造成的一切损失的权利。

更多信息请浏览本刊网站:www.teleonline.cn。

《电讯技术》编辑部