



高效中继通信技术综述与展望^{*}

余欢^{1,2,3}, 李云洲^{2,3}, 粟欣^{2,3}, 王京^{2,3}

(1.清华大学电子工程系 北京 100084; 2. 清华大学微波与数字通信技术国家重点实验室 北京 100084;
3.清华大学信息科学与技术国家实验室 北京 100084)

摘要:近年来,随着全球能源消耗和温室气体排放量的不断增长,节能减排的问题引起了全社会的密切关注。在无线通信领域,产业界和学术界也展开了对通信系统节能问题的大量研究。通信系统中,中继的引入可以扩大基站覆盖范围、消除覆盖盲点、提高系统性能;同时,中继可以将较长的通信距离分为较短的两段或多段距离进行逐段传输,大大降低了传输功耗,因此中继传输具有天然的节能潜力。本文针对高效中继通信技术,介绍了中继网络的能耗模型,并从链路到网络对高效中继技术的研究点进行了综述与展望。

关键词:绿色通信;中继;高效;协作通信

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.03.019

Energy Efficient Relay Communication Technology: Overview and Prospects

Yu Huan^{1,2,3}, Li Yunzhou^{2,3}, Su Xin^{2,3}, Wang Jing^{2,3}

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory on Microwave and Digital Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNList), Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In recent years, with the growth of the global energy consumption and greenhouse gas emissions, the energy saving problem has aroused close attention of the whole world. In the field of wireless communications, the industry as well as the academia has paid increasing attention to the energy efficient communications. In the wireless communication systems, relayed transmission has become an effective way to increase the coverage, throughput and transmission reliability of the networks. Meanwhile, a long transmission distance can be divided into two or more short pieces by relay, which can largely reduce the transmission power consumption; as a result, relayed transmission has the natural energy-saving potential. Energy-efficient relay communication technology was introduced, including the power consumption model of the relay network, energy efficient relay link and energy efficient relay network.

Key words: green communication, relay, energy efficiency, cooperative communication

^{*} 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2012AA011402),国家重点基础研究发展规划基金资助项目(No.2012CB316000),国家自然科学基金资助项目(No.61201192),国家科技重大专项基金资助项目(No. 2010ZX03001-002-01),清华大学自主科研计划基金资助项目(No.2010THZ03-2)



1 引言

自古以来,人类都在一直追寻高速、低成本的通信方式。根据《左传》的记载,公元前7世纪,春秋时期的楚国建立了楚长城,利用“烽火相传”将信息由边关传向都城,这可以说是最早的无线中继通信系统,而烽火台这个“中继”所起到的作用是扩大通信范围、提高传输速率。时至今日,无线通信系统仍然面临着扩展覆盖和提高速率两大挑战,而中继成为了解决这些挑战的重要技术之一。关于中继的学术界研究可以追溯到40多年以前,1968年Meulen首先提出了三终端中继信道概念^[1,2],之后Cover和Gamal从信息论的角度研究了中继信道^[3],此后中继技术在信息论角度取得较大发展,但是在技术应用方面却面临着巨大挑战,直到21世纪初,才再次引起学术界的关注。Sendonaris在2003年系统地提出并定义了“用户协作分集”的概念^[4],2004年Laneman分析了协作中继的4种常用协议^[5],包括放大转发(AF)协议、译码转发(DF)协议、选择性中继协议、增量中继(IR)协议等,由此则展开了关于中继技术的众多深入研究。正是因为中继具有扩大基站覆盖范围、消除覆盖盲点、提高系统性能的优点,中继技术已经被引入面向4G的IEEE 802.16j/m、LTE-Advanced标准之中。

另一方面,近年来,随着全球能源消耗和温室气体排放量的不断增长,节能减排的问题引起了全社会的密切关注,而通信行业的能耗问题也引起了产业界和学术界的关注。欧盟的一项研究显示,2005年信息通信行业的能耗占全球总能耗的3%~4%,且该比例在现有能源消耗模式下正以每10年翻一番的速度增长^[6]。因此,对以节能减排为目的的绿色通信技术的研究日显重要,也成为近几年的一个研究热点,而通信系统中,中继的引入通过将较长的通信距离分为较短的两段或多段传输,大大降低了传输功耗,提供了节省网络能耗的一种方式。因此,中继网络有着巨大的节能潜力。针对中继的节能研究显得十分必要。

本文将近几年学术界对中继节能问题的研究进行了梳理,首先介绍中继网络的能耗模型,然后从链路级到网络级系统探讨高效中继传输的原理、方法和技术,旨在明确高效中继通信技术的主要研究方向。

2 中继网络的能耗模型

中继网络包括了基站、中继和终端,而每一个节点的能耗包括了发送、接收和空闲3种状态,在研究中一般都

重点关注发送端的功耗,而假定接收和空闲状态下的功耗是常量或者认为接收和空闲状态下的功耗与发送功耗相比可忽略不计。

参考文献[7]针对宏基站能耗进行了建模,现在学术界对于基站的能耗建模基本是采用此模型或者是此模型的简化版本。该模型假定宏基站的能耗由基站的扇区数目 N_{Sector} 、每个扇区的功放数目 $N_{\text{PA/Sec}}$ 、每个功放的发送功率 P_{TX} 、功放的效率 μ_{PA} 、信号处理的功率 P_{SP} 、空调损耗因子 C_c 、备用电池和电力供应损耗因子 C_{ISBB} 共同决定,即一个典型的宏基站的发送功耗可以表达如下:

$$P_{\text{BS,Macro}} = N_{\text{Sector}} \cdot N_{\text{PA/Sec}} \left(\frac{P_{\text{TX}}}{\mu_{\text{PA}}} + P_{\text{SP}} \right) (1 + C_c) (1 + C_{\text{ISBB}}) \quad (1)$$

对于中继或者手机终端,参考文献[7,8]认为其发送功率可分为动态部分和静态部分,即:

$$P = P_{\text{dynamic}} + P_{\text{static}} \quad (2)$$

其中,动态部分 P_{dynamic} 一般看作可变的发送功率,是与传输速率有关的部分,而静态部分 P_{static} 则是与传输速率无关的线路功耗,一般设定为常数。

3 高效中继链路研究

对于中继链路能效问题的研究,采用的衡量指标一般为每单位能耗所发送比特数(bit/J),即 $\mu_{\text{EE}} = \frac{R}{P}$,其中 R 表示链路的数据传输率,而 P 应代表链路发送信息的总功耗,包括发送端、中继以及接收端的功耗。对高效中继链路的研究,包括了单载波的中继链路、多载波的中继链路等,下面将分别对每个研究点进行概述。

3.1 高效单载波中继链路研究

单载波中继链路的能效定义为中继链路单位能耗所能传输的比特,通过优化源端和中继端的功率,在满足一定链路速率要求下最大化链路能耗,如果中继采用AF策略,对于一条上行传输的链路,典型问题可以构建如下:

$$\max P_s, P_r \frac{R}{P} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } 0 < P_s \leq P_{s\text{-max}}, 0 < P_r \leq P_{r\text{-max}}, R \geq \eta_{\text{th}}$$

其中,优化目标为链路能耗,而约束条件包括源端、中继端的发送功率约束以及用户对链路速率的需求,该问题可以被证明是一个严格的凸问题,因此可以得到源端和中继端功率的闭式解。与直接传输相比,在中继链路中结合功率控制策略可以有效降低终端能耗,这对于电池受限的终端来说节能的好处相当可观。

针对高效单载波中继链路,还需要进一步研究的是中继转发策略的选择(如AF、DF等)对中继链路能效的影响、多天线中继链路的能效问题等。

3.2 高效多载波中继链路研究

高效多载波中继链路主要研究中继链路中源端、中继端如何分配载波功率,以最大化链路能效,目前相关研究还较少。

参考文献[9]考虑了多载波AF链路的能效问题,能效定义为链路单位传输能耗所发送的比特数,问题构建为在源端、中继端发送功率受限,一定链路速率需求的约束下最大化链路能效,文章将构建的非凸问题通过两种近似方式转化为拟凸问题得到最优解,同时,文章还引入子载波匹配算法,即将源端—中继端质量好的子载波与中继端—目的端质量好的子载波配对后进行数据传输,该算法可以进一步提高链路能效。然而,文章中的链路能耗只考虑了源端和中继端的传输能耗。

高效多载波中继链路的未来研究需要考虑完善的能耗模型,对于其他中继转发策略的能效问题也需要进一步研究。

4 高效中继网络研究

对于中继网络能效问题的研究,采用的衡量指标多样,比较普遍的如网络消耗每单位能耗所发送的比特数(bit/J);单位覆盖区域的平均功耗(W/m²);满足一定网络质量需求下的功耗(W)等,这些指标从不同的角度衡量网络的能效。下面将分别从高效多中继选择网络、高效双向中继网络,能效最优的中继部署及中继网络扩展覆盖等研究点进行概述。

4.1 高效多中继网络研究

针对多中继网络能效问题的研究,所采用的模型如

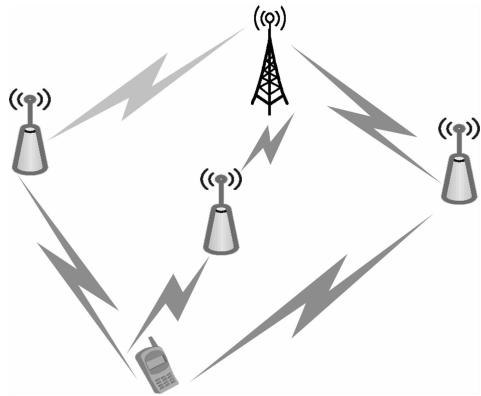


图1 多中继网络模型

图1所示,假设有 N 个中继参与传输,源端通过中继向目的端发送信息,为了使得网络的能效达到最高,将通过某种准则在多个中继中选择“最好”的一个或者“较好”的几个中继进行传输。

参考文献[10]考虑选择多个“较好的中继”(能够对源端发送的信息译码成功的中继)通过波束赋形的方式将源端信息转发给目的端,并考虑了得到信道状态信息的训练及反馈开销,以此来研究选择中继的数量与网络的能效折中关系,分析结果显示从能效的角度考虑,并非选择越多的中继越好,然而,文中的功耗仅考虑了发送功率。

参考文献[11]研究了AF多中继网络的能效问题,并考虑了加权能耗模型,即不同节点的能耗权重不一样,如在蜂窝网中,基站和中继是通过供电线路连接,而手机终端是电池受限的,因此手机终端的能耗权重会更大。另外,文中只考虑了发送功耗,通过选择传输单位比特数据耗能最小的中继进行发送,以达到网络的能效最优。

高效多中继网络未来的研究趋势为考虑更复杂场景下的网络模型,潜在研究点如下:

- 多用户多中继网络能效问题,即采用何种准则将中继分配给不同用户以达到网络能效最优;
- 多载波多中继网络能效问题,即如何分配频域资源选择中继使得网络能效最优;
- 多天线多中继网络能效问题,即如何分配空域资源选择中继使得网络能效最优。

多中继网络能效问题研究首先需要确定中继传输的准则,即选择要转发信号的中继的准则、中继转发的方式。在此基础上,再对频域或者空域的资源分配问题进行构建,最后采用合适的数学方法求解问题的最优解或次优解。

4.2 高效双向中继网络研究

双向中继由于其频谱效率的提高而在近年来引起学术界的关注,其原理如图2所示。如果两个源端 S_1 、 S_2 要向对方发送信息,对于传统的单向中继,如图2(a)所示,需要4个时隙传输;而如果采用双向中继,如图2(b)所示,只需要两个时隙即可完成传输,即在第1个时隙, S_1 和 S_2 同时向中继进行传输,中继通过网络编码将两个源端发送的信息进行网络编码,并在第2个时隙进行广播, S_1 和 S_2 接收到信息后利用已有的边信息解出对方发来的信息。相比于单向中继传输,双向中继网络将4个传输时隙减少为2个,传输效率提高了1倍。

针对高效双向中继网络,现有研究包括双向中继传

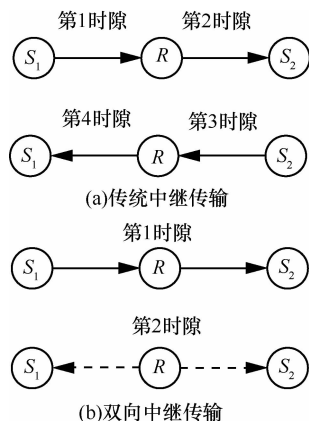


图2 传统中继与双向中继传输示意

输和单向中继传输、直接传输能效的比较,双向中继网络中采用不同中继转发策略的能效比较等。

参考文献[12]研究了基于一种混合中继传输策略双向中继网络的能效问题,能效指标为中继网络单位能耗所发送的数据。在这个中继网络中,中继节点可以根据信道状态和译码的状态切换其传输策略,网络的功耗考虑了传输功耗和节点线路处理功耗。仿真结果显示相对于网络编码(NC)策略的双向中继网络,网络编码/压缩转发(NC/CF)混合传输策略可以得到更好的网络能效,这是由于混合中继传输策略可以根据信道变化及时调整传输策略。然而,该研究只考虑了两个源端发送功率相等的情形,源端发送功率不等的情况还需要进一步的研究。

参考文献[13]比较了中继采用AF传输策略时,双向中继传输和单向中继传输的能效问题,这里的能效定义为每单位能耗所发送的和速率(即 S_1 向 S_2 发送的比特数加上 S_2 向 S_1 发送的比特数),能耗则考虑了传输功率、功放效率、线路处理功耗等。该文的分析表明当两个源端发送的数据量相等时,双向中继网络的能效更高,而当两个源端发送的数据量不等时,单向中继传输的能效更高,基于此,参考文献[14]提出了一种混合中继传输策略:将数据分成两部分进行传输,一部分通过双向中继等量发送,剩下的数据通过单向中继发送,相比于单向中继或者双向中继网络,这种混合传输策略能达到更高的能效。参考文献[15]则研究了采用DF传输策略时,双向中继网络的能效问题,并提出了寻找能效最优点的改进二分算法。

未来针对高效双向中继网络的研究,潜在研究点有:

- 高效双向多中继网络的中继选择问题,即以能效为衡量标准,如何选择中继以达到更高的能效;
- 多天双向中继网络的能效问题研究,即如果将多天

线引入双向中继网络,基于MIMO的双向中继网络的能效与单天线双向中继网络能效相比性能如何;

- 多载波双向中继网络的能效问题,即基于OFDM的双向中继网络如何进行资源分配以达到能效最优。

与单向中继相比,双向中继由于缩短了一半的传输时隙,因此可以将吞吐量翻倍,这是基于两个用户对中继的信道是对称的,如果信道高度不对称,则双向中继反而可能会比单向中继性能要差,因此,对于双向中继网络的能效问题研究,也需要综合考虑不同场景对网络能效的影响。

4.3 高效蜂窝网络中继部署问题研究

在蜂窝网络中,如果加入中继,可以将终端与基站长距离一跳通信变为两跳,从而降低了发送功率,节省了网络能耗,这里需要考虑的问题是如何在蜂窝网络中部署中继;另一方面,由于中继的能耗相比于宏基站要低很多,因此可以考虑在一定条件下替换宏基站来降低网络能耗,然而替换之后对如网络速率、中断概率网络的性能有何影响还需要研究。

针对中继部署对蜂窝网能效影响的问题,参考文献[16]研究了基站部署密度对双向中继蜂窝网络能效的影响,假设所有的宏基站和中继都服从齐次泊松点过程(HPPP)分布,并通过随机几何理论推导出了网络的覆盖率和平均可达速率,基于此研究了宏基站和中继的部署密度对网络能效的影响。研究表明,有中继参与传输的蜂窝网络的能效要优于传统蜂窝网,同时,文章通过一定的概率关断宏基站或者中继站来模拟研究基站部署密度对网络能效的影响,仿真表明随着关断概率的增加,能效函数呈现出凸函数的趋势。参考文献[17]则假设宏基站和中继站会部署在候选的位置,通过将宏基站换为中继站,在满足区域和速率需求的前提下降低小区总的发送功率。基于此,文章提出了一种迭代算法,首先通过部署一定数量的宏基站来最大化小区和速率,然后逐渐减少宏基站的数目并以中继站替代,同时满足和速率的需求,直到该区域内只有一个宏基站。研究表明通过这种方式可以降低该区域内的发送总功耗。然而文章在考虑功耗时仅仅考虑了宏基站和中继站的发送功耗,如果加入完整的功耗模型考虑,还需要进一步研究。参考文献[18]考虑了如何通过机会中继选择来降低蜂窝网的能耗,研究场景为TDD-CDMA蜂窝网络的上行传输,文中的研究表明当网络传输的数据量较低时,相比于没有中继的蜂窝网,加入中继并采用机会选择策略可以降低50%以上的网络能耗,而如果网络传输的数据量较高

时,改善效果则并不明显,这里的能耗考虑了传输能耗和线路处理能耗。

由于网络数据业务的动态变化性,实际的蜂窝网络在不同时间段的业务量差异较多,如图3^[7]所示,一周内,国外某大都市市区的通信网络业务量曲线呈现出拟正弦图形。另外,在周末网络的负载要明显轻于工作日^[9]。由于通信业务量随时间的动态变化,因此可以通过动态基站休眠方式,即在业务量较少的时候让某些基站休眠。参考文献[20]考虑了将中继站引入蜂窝网络的方式,在低业务量的时候,让中心基站休眠,同时开启与基站部署在一起的低功耗的中继站(中继站与邻基站通过回程链路连接),以此来降低网络能耗。文中的仿真结果表明,这种基站—中继站切换技术可以在保证小区服务质量的同时,降低网络能耗。

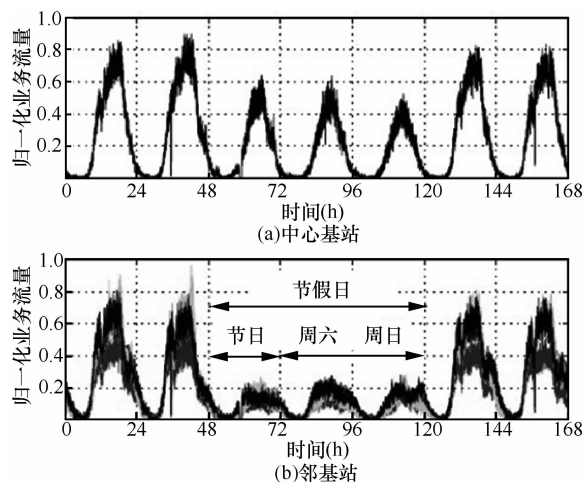


图3 一周内的归一化网络业务量

未来针对高效蜂窝网络中继部署的研究,关注下一代通信网络,需要考虑更复杂的小区拓扑结构和更实际的业务流量特征,潜在研究点有:

- 蜂窝网络中继部署下的网络频谱效率和能效的折中关系;
- 考虑干扰下的蜂窝中继网络的能效问题;
- 高效蜂窝网络中多天线中继的资源分配问题;
- LTE网络中中继站的部署对多小区网络的能效问题;
- 高效异构网络中的中继部署问题。

对于以上潜在研究点,都需要首先对小区拓扑结构和业务流量特征进行假设,然后在相应的假设条件下选择适当的能效衡量指标,构建资源分配问题。同时,在问题构建中还需要综合考虑小区吞吐量指标。

5 结束语

面对全球日益增大的节能减排压力,高效通信技术的研究越来越广泛,而中继传输作为未来4G网络的关键技术,其能效问题的研究也正引起学术界的关注。本文首先介绍了研究高效中继网络时学术界所采用的能耗模型,接下来从链路到网络,对高效中继网络技术进行了概述,并提出了相关的潜在研究点,明确了高效中继网络的未来研究方向。

参考文献

- 1 EC Van Der Meulen. Transmission of information in a T-terminal discrete memoryless channel. CA: University of California, Berkeley, 1968
- 2 EC Van Der Meulen. Three-terminal communication channels. *Advances in Applied Probability*, 1971, 3(1): 120~154
- 3 Cover T, Gamal A E. Capacity theorems for the relay channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1979, 25 (5): 572~584
- 4 Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity-part I: system description. *IEEE Transactions on Communications and part II: implementation aspects and performance analysis*, 2003, 51(11): 1927~1938, 1939~1948
- 5 Laneman J, Tse D, Wornell G. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12):3062~3080
- 6 Fettweis G, Zimmermann E. ICT energy consumption-trends and challenges. *Proceedings of the 11th Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'08)*, Lapland, Finland, 2008
- 7 Arnold O, Richter F, Fettweis G P, *et al.* Power consumption modeling of different base station types in heterogeneous cellular networks. *Proceedings of the Future Network and Mobile Summit Conference*, Florence, Italy, 2010: 1~8
- 8 Isheden C, Fettweis G P. Energy-efficient multi-carrier link adaptation with sum rate-dependent circuit power. *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'2010)*, Florida, USA, 2010: 1~6
- 9 Yu H, Qin H H, Li Y Z, *et al.* Energy-efficient power allocation for non-regenerative OFDM relay links. *Science China Information Science*, 2013, 56(2): 185~192
- 10 Ritesh M, Neelesh B, Andreas F, *et al.* Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2008, 7(8): 3013~3025



- 11 Huang R, Feng C Y, Zhang T K, *et al.* Energy-efficient relay selection and power allocation scheme in af relay networks with bidirectional asymmetric traffic. International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Brest, France, 2011: 1~5
- 12 Qi Y N, Imran M A, Tafazolli R. On the energy efficiency of hybrid relaying schemes in the two-way relay channel. Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Quebec, Canada, 2012: 1~5
- 13 Sun C, Yang C Y. Is two-way relay more energy efficient? Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), Texas, USA, 2011: 1~6
- 14 Sun C, Yang C Y. Energy efficient hybrid one-way and two-way relay transmission strategy. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Kyoto, Japan, 2012: 2497~2500
- 15 Yu H, Li Y Z, Zhong X F, *et al.* The analysis of the energy efficiency for the decode-and-forward two-way relay networks. Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, China, 2013: 1~5
- 16 Wei H C, Deng N, Zhao M, *et al.* Station density effect on energy efficiency of relay-assisted cellular networks. Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC), Beijing, China, 2012: 411~415
- 17 Islam M H, Zbigniew D, Sohraby K, *et al.* Capacity-optimal relay and base station placement in wireless networks. Proceedings of the International Conference on Information Networking (ICOIN), Bali, Indonesia, 2012: 358~363
- 18 Hong L, Wang X F, Chong P H J. Opportunistic relay selection in future green multihop cellular networks. Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall): Ottawa, Canada, 2010: 1~5
- 19 Eunsung O, Krishnamachari B. Energy savings through dynamic

base station switching in cellular wireless access networks. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), Florida, USA, 2010: 1~5

- 20 Alam A S, Dooley L S, Poulton A S. Energy efficient relay-assisted cellular network model using base station switching. Proceedings of IEEE Global Telecommunications (GLOBECOM 2012): 2nd International Workshop on Multicell Cooperation, California USA, 2012:1~6

[作者简介]



余欢,男,清华大学博士研究生,主要研究方向为绿色通信、中继协作通信等。



李云洲,男,博士,清华大学副教授,主要研究方向为分布式无线通信、认知无线电、无线局域网、绿色通信等。

栗欣,男,博士,清华大学研究员,主要研究方向为移动通信、软件无线电、数字信号处理等。

王京,男,硕士,清华大学教授、博士生导师,主要研究方向为分布式无线通信、宽带数字无线接入技术与系统、微小卫星的星上信号处理技术等。

(收稿日期:2013-01-15)

·简讯·

“第九届卫星通信学术年会”在北京成功举办

中国通信学会卫星通信委员会于3月7日成功举办了“第九届卫星通信学术年会”。来自社会各界约200位代表出席了年会。

本届年会共征集到90余篇论文,经专家评审,共录用89篇。其中共评选出6篇优秀论文。年会邀请了13位专家到会演讲,介绍了各界广泛关注的S波段移动通信卫星系统研制、建设与发展;Ka宽带通信卫星项目建设;激光卫星通信链路实验研究;卫星通信与导航增强;卫星通信

在海洋航运、航空机载领域的应用与发展;全球通信卫星业务发展与回顾。会议还结合国家无线电管理局新近颁布的“卫星固定业务通信网内设置使用移动平台地球站管理暂行办法”组织了专题讨论,请无线电管理局空间业务处和相关专家到会介绍了管理规定的相关内容和制定依据以及国外相关情况,并同到会代表就有关问题进行了交流。

本届年会无论是征文质量还是征文数量,都比往届有了较大的提高,且信息量丰富,受到与会专家和代表的充分肯定。

(来源:卫星通信委员会)