



信息通信领域产学研合作特色期刊 | 十佳皖刊  
第三届全国期刊奖百种重点期刊 | 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN  
CODEN ZTJHAY

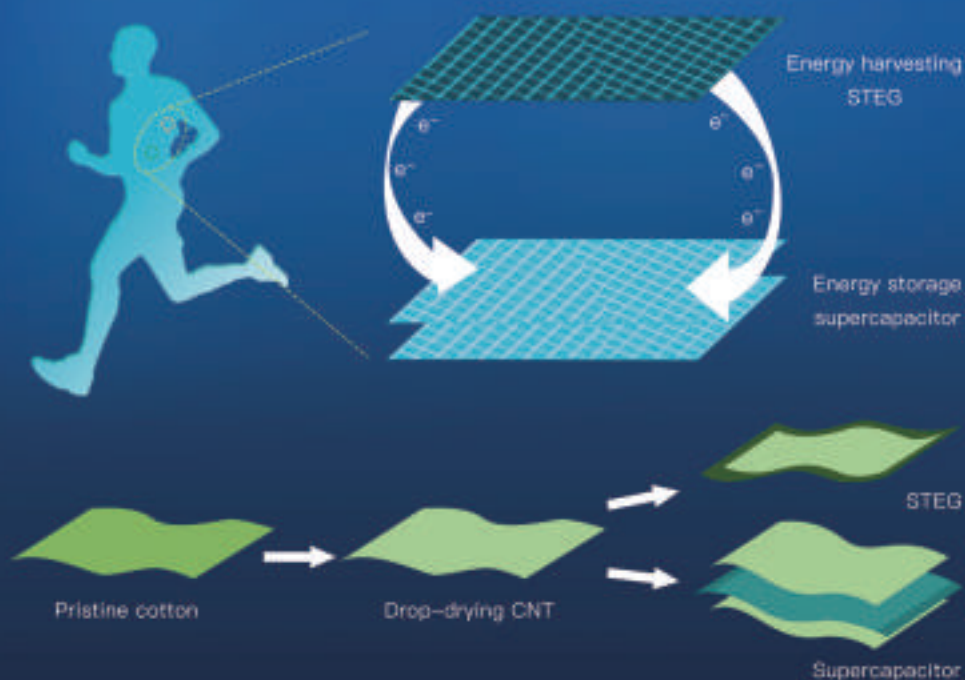
# 中兴通讯技术

## ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

<http://tech.zte.com.cn>

2018年10月 • 第5期

专题：可再生能源供电的无线通信与网络



# 《中兴通讯技术》第8届编辑委员会成员名单

- 顾问

侯为贵（中兴通讯股份有限公司创始人） | 钟义信（北京邮电大学教授） | 陈锡生（南京邮电大学教授）
- 主任

陆建华（中国科学院院士）
- 副主任

徐子阳（中兴通讯股份有限公司总裁） | 糜正琨（南京邮电大学教授）

编委（按姓名拼音排序）

- 陈建平

上海交通大学教授
- 陈前斌

重庆邮电大学副校长
- 葛建华

西安电子科技大学教授
- 管海兵

上海交通大学教授
- 郭庆

哈尔滨工业大学教授
- 洪波

中兴发展股份有限公司总裁
- 洪伟

东南大学教授
- 纪越峰

北京邮电大学教授
- 蒋林涛

中国信息通信研究院科技委主任
- 李尔平

浙江大学教授
- 李红滨

北京大学教授
- 李建东

西安电子科技大学副校长
- 李军

清华大学教授
- 李乐民

中国工程院院士
- 李融林

华南理工大学教授
- 李少谦

电子科技大学教授
- 刘建伟

北京航空航天大学教授
- 陆建华

中国科学院院士
- 马建国

广东工业大学教授
- 孟洛明

北京邮电大学教授
- 糜正琨

南京邮电大学教授
- 任品毅

西安交通大学教授
- 孙知信

南京邮电大学教授
- 谈振辉

北京交通大学教授
- 唐雄燕

中国联通网络技术研究院首席科学家
- 王京

清华大学教授
- 王文博

北京邮电大学副校长
- 王文东

北京邮电大学教授
- 王喜瑜

中兴通讯股份有限公司执行副总裁
- 王翔

中兴通讯股份有限公司高级副总裁
- 卫国

中国科学技术大学教授
- 吴春明

浙江大学教授
- 邬贺铨

中国工程院院士
- 徐安士

北京大学教授
- 徐子阳

中兴通讯股份有限公司总裁
- 续合元

中国信息通信研究院副总工
- 薛一波

清华大学教授
- 杨义先

北京邮电大学教授
- 杨震

南京邮电大学校长
- 易芝玲

中国移动研究院首席科学家
- 张宏科

北京交通大学教授
- 张平

北京邮电大学教授
- 张云勇

中国联通研究院院长
- 赵慧玲

工业和信息化部科技委信息网络专家组组长
- 郑纬民

清华大学教授
- 钟章队

北京交通大学教授
- 周亮

南京邮电大学教授
- 朱近康

中国科学技术大学教授
- 祝宁华

中国科学院半导体研究所副所长



信息通信领域产学研合作特色期刊  
第三届国家期刊奖百种重点期刊  
中国科技核心期刊  
工信部优秀科技期刊  
十佳皖刊  
中国五大文献数据库收录期刊  
1995年创刊

## 办刊宗旨

以人为本,荟萃通信技术领域精英  
迎接挑战,把握世界通信技术动态  
立即行动,求解通信发展疑难课题  
励精图治,促进民族信息产业崛起

# Contents 目次

中兴通讯技术 (ZHONGXING TONGXUN JISHU)  
总第142期 第24卷 第5期 2018年10月

## 专题:可再生能源供电的无线通信与网络

- 02 电力基础设施薄弱地区的基站自供电技术研究 ..... 王亚会,周振宇,贾云健  
06 可再生能源供电无线通信的最优链路传输策略 ..... 杜林松,黄川  
12 可再生能源供电下射频单元的基带功能分割和功率控制 ..... 王刘猛,周盛  
18 无线数据与能量协同传输中的游程限制编码设计 ..... 胡杰,李梦媛,杨鲲  
24 部分自供电的非正交多址接入技术 ..... 龚杰,陈翔  
28 基于摩擦纳米发电机的自驱动微系统 ..... 陈号天,宋宇,张海霞  
35 摩擦纳米发电机等效电路模型研究 ..... 魏子钧,耿来鑫,边森

## 专家论坛

- 40 绿色通信:如何“笑”到最后 ..... 牛志升  
43 无线数据与能量协同传输技术:编码与调制设计 ..... 胡杰,金石

## 专家视点

- 47 封装天线技术最新进展 ..... 张跃平

## 企业视界

- 54 大数据已成为基础通用技术 ..... 王德政,汪绍飞,王梅

## 技术广角

- 57 基于卫星的流媒体应用技术研究 ..... 黄泽武,韩桂鲁,李双全  
62 基于深度卷积神经网络的视觉SLAM去模糊系统 ..... 缪弘,张文强

## 专题预告

《中兴通讯技术》2019年专题计划(42)

期刊基本参数:CN 34-1228/TN\*1995\*b\*16\*64\*zh\*P\*¥ 20.00\*15000\*13\*2018-10

# Contents 目次

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 24 No. 5 Oct. 2018

## Special Topic: Self-Powered Sustainable Wireless Communications and Networking

- 02 Self-Powered Technology of Base Station in Weak Areas of Power Infrastructure ..... WANG Yahui, ZHOU Zhenyu, JIA Yunjian
- 06 Optimal Transmissions Strategy for Wireless Communications Powered by Renewable Energy Sources ..... DU Linsong, HUANG Chuan
- 12 Flexible Baseband Functional Split and Power Control with Renewable Energy Powered Remote Radio Unit ..... WANG Liumeng, ZHOU Sheng
- 18 Run-Length-Limited Coding Design for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer ..... HU Jie, LI Mengyuan, YANG Kun
- 24 Partially Self-Powered Non-Orthogonal Multiple Access Technology ..... GONG Jie, CHEN Xiang
- 28 Self-Powered Microsystem Based on Triboelectric Nanogenerator ..... CHEN Haotian, SONG Yu, ZHANG Haixia
- 35 Equivalent Circuit Models of Triboelectric Nanogenerators ..... WEI Zijun, GENG Laixin, BIAN Sen

## Expert Forum

- 40 Green Communications: How to "SMILE" (Send More Information Bits with Less Energy) ..... NIU Zhisheng
- 43 Simultaneous Wireless Information and Power Transfer: Coding and Modulation Design ..... HU Jie, JIN Shi

## Expert Perspective

- 47 Recent Advances in Antenna-in-Package Technology ..... ZHANG Yueping

## Enterprise View

- 54 Big Data: the Basic General Technology ..... WANG Dezheng, WANG Shaofei, WANG Mei

## Technology Perspective

- 57 Streaming Media Application Technology Based on Satellite ..... HUANG Zewu, HAN Guilu, LI Shuangquan
- 62 Deep Convolutional Neural Network for Visual SLAM Deblurring ..... MIAO Hong, ZHANG Wenqiang

## 敬告读者

本刊享有所发表文章的版权,包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权,所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。

未经本刊许可,不得以任何形式全文转载本刊内容;如部分引用本刊内容,须注明该内容出自本刊。

## 2018年第1—6期专题

### 1 5G 承载网技术和优化组网

张云勇 中国联通研究院院长  
徐雷 中国联通研究院高级工程师

### 2 大数据智能化无线网络技术

陈前斌 重庆邮电大学副校长

### 3 毫米波与太赫兹通信技术及应用

洪伟 东南大学教授  
王海明 东南大学教授

### 4 5G 回传网络光电子器件技术

孙笑晨 苏州洛合镭信光电科技有限公司技术总监  
王会涛 中兴光电子技术有限公司规划总监

### 5 可再生能源供电的无线通信与网络

牛志升 清华大学教授  
易芝玲 中国移动研究院首席科学家

### 6 区块链技术及其物联网应用

刘建伟 北京航空航天大学教授

# 专题:可再生能源供电的无线通信与网络

## 策划人简介



牛志升

清华大学教授,1985年毕业于北方交通大学,1989年和1992年分别获日本丰桥技术科学大学硕士和博士学位,1992—1994年就职于日本富士通研究所,1994年回清华大学电子工程系任教至今,同时担任 IEICE Fellow 和 IEEE Fellow,并为国家重点基础研究发展(“973”)计划项目“能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统基础研究”(2012—2016年)首席科学家;主要研究方向包括通信话务理论、排队论、通信网络的流量控制与性能分析、无线网络的资源分配及跨层优化、通信与广播融合网络、绿色通信与网络等;曾获得 IEEE 通信学会亚太区 2013 年度“最佳论文奖”。



易芝玲

中国移动首席科学家,毕业于美国斯坦福大学,获电机工程博士学位,后加入美国 AT&T 贝尔实验室无线通信基础研究部,是 CDMA 技术的开拓者之一,先后在多个国际知名的公司、研究机构担任研发及科研管理职务,并先后担任 IEEE/ACM Trans. NET 区域主编、IEEE 通信协会理事、IEEE 通信协会科技会议总监、IEEE 无线通信及网络督导委员会创会主席、IEEE 5G Initiative 指委会委员及 Publication 主席、FuTURE Forum 5G SIG 主席、WWRF 副主席、WAIA 执委会主席、O-RAN 技术指委会主席等职务;目前主要负责中国移动在无线通信前沿技术领域的研究工作;荣获 IEEE 2015 产业引领创新奖,荣获 2018 年度 IEEE “Fred W. Ellersick Prize”最佳论文奖和 1995 年度“Stephen Rice”最佳论文奖;目前已发表论文 200 余篇,申请发明专利 100 余项。

## 内容导读

能量收集技术是一种新兴的绿色能源技术,该技术可直接把环境中的可再生能源,例如:风能、太阳能、机械能、电磁场辐射等,直接转化为电能,某种意义上讲是一种“取之不尽、用之不竭”的新能源。同时,随着智能电网技术和电池储能技术的飞速发展,可再生能源的存储和利用效率大大提高,能量收集技术已步入实用阶段,并逐步应用到了各种通信系统中,例如:传感器网、蜂窝通信网等。可以预见:未来通信系统的供电模式将日趋多样化,甚至出现完全依赖于可再生能源的自供电通信系统,这不仅可大幅降低通信系统对传统电网的依赖,降低网络整体的实际电网能耗,而且可以减少布线需求和运维成本。特别是针对基站超密集部署的超密集组网(UDN)和分布式多输入多输出(MIMO)移动通信系统,其广泛部署的小基站或是天线前端很有可能无法或是难以直接连接到电网,需要完全依赖于可再生能源供电。

与传统无线通信在空、时、频 3 个维度上的优化设计不同,可再生能源供电无线通信与网络提供了一个崭新的设计维度——能量,其核心技术挑战来自于能量维度和传统的空、时、频维度存在的强烈相互作用。具体地,可将能量维度的挑战归纳为以下 2 个方面:(1)能量供给的动态性,能量的供给和使用代价在时空上均存在动态性、且难以预测;(2)能量供给的多尺度特性,能量来源的多样化,能量动态变化的时空尺度亦随之存在差异。本期专刊共收录了 7 篇来自于高等学校和企业研究团队的论文,旨在介绍本领域的最新研究进展,为高效利用多种能量资源,提升频谱效率和功率效率,满足未来信息传输的多维度服务质量需求提供一套有效的解决方案。

首先,由华北电力大学和重庆大学完成的《电力基础设施薄弱地区的基站自供电技术研究》一文,以坦桑尼亚边远地区通信基站的供电问题为实例,提出了一种基于可再生能源与柴油发电机互补的混合供电系统,并深入分析了多种混合供电系统的性能;接下来的 2 篇文章分别由电子科技大学和清华大学完成,给出了“可再生能源供电无线通信的最优链路传输策略”和“可再生能源供电下射频单元的基带功能分割和功率控制”策略,数值结果表明:相比于固定的基带功能分割方案,灵活的基带功能分割能充分利用可再生能源并提高系统的吞吐量。进一步地,由电子科技大学和中山大学分别完成的论文《无线数据与能量协同传输中的游程限制编码设计》和《部分自供电的非正交多址接入技术》,针对无线数据与能量同时传输的场景给出了相应的编码方案和多址接入算法,实现了高效的无线能量传输和多用户同时接入。最后的 2 篇文章则是针对基于摩擦纳米发电机的自供电系统,其中《基于摩擦纳米发电机的自驱动微系统》一文来自于北京大学团队,分别介绍了基于摩擦纳米发电机原理的自驱动传感器和相应的能量存储系统,《摩擦纳米发电机等效电路模型研究》一文则来自于中国移动研究院和北京交通大学的团队,推导出了摩擦纳米发电机的电路方程,建立了摩擦纳米发电机等效电路,并进行了 PSpice 仿真。

希望本期专刊能给读者提供有益的启示和参考。在此,对各位作者的积极支持和辛勤工作表示衷心的感谢!

牛志升、易芝玲

2018 年 9 月 10 日



# 电力基础设施薄弱地区的基站自供电技术研究

## Self-Powered Technology of Base Station in Weak Areas of Power Infrastructure

王亚会/WANG Yahui<sup>1</sup>  
周振宇/ZHOU Zhenyu<sup>1</sup>  
贾云健/JIA Yunjian<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学, 北京 102206;  
2. 重庆大学, 重庆 400044)  
(1. North China Electric Power University,  
Beijing 102206, China;  
2. Chongqing University, Chongqing  
400044, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0002-004

**摘要:** 提出基于可再生能源与柴油发电机互补的混合供电系统。通过深入分析多种混合供电系统的性能, 给出了适用于坦桑尼亚边远地区基站供电的解决方案, 缓解了边远地区电力基础薄弱、基站供电稳定性差等问题。同时, 混合供电系统的建设降低了移动网络运营商的发电成本以及温室气体的排放量。

**关键词:** 可再生能源; 混合供电系统; 移动网络运营商; 温室气体排放量

**Abstract:** A hybrid power supply system by combining renewable energy sources with diesel generators and batteries is proposed. By deeply analyzing the performance of various hybrid power systems, a solution for powering base stations in remote areas of Tanzania is presented. Thus, it alleviates the problems of weak infrastructures and poor stability of power systems in remote areas. Simultaneously, the construction of hybrid power supply system reduces the cost of mobile network operators and greenhouse gas emissions.

**Keywords:** renewable energy; hybrid power supply system; mobile network operators; greenhouse gas emissions

近年来, 随着无线通信技术的迅猛发展以及移动用户数量的不断增加, 移动通信在农业、教育和矿业等诸多社会经济部门发挥着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。然而, 亚太、非洲等地区的发展中国家以及边远地区, 由于电力基础设施薄弱、稳定性差, 基站供电的相关问题限制了移动通信的进一步发展。

以非洲的坦桑尼亚为例, 到2014年, 坦桑尼亚的电气化率仅为36%, 其中仅有11%的农村地区接入到配电网。由于电力供应不足, 坦桑尼亚农村地区的移动基站主要采用柴油发电机供电, 不仅能源效率低、运行成本高, 而且温室气体排放量大, 对环境产生了恶劣的影响。此外, 一些并网基站也会受到甩负荷和频繁断电的影响, 电力供应极不稳定, 通信

服务质量难以得到保障。如果能为移动基站配备新能源发电系统, 不仅可以解决通信系统的供电问题, 还可以有效降低温室气体排放以及供电成本<sup>[3]</sup>。

新能源种类繁多, 主要包括太阳能、风能、水能、生物质能、潮汐能、地热能 and 氢能等可再生能源<sup>[4]</sup>, 其供电系统主要为太阳能和风力发电系统。太阳能发电系统利用光伏效应将太阳能光电板收集的太阳辐射能转化为电能<sup>[5]</sup>, 具有能源利用率高、设备简单、易扩展、维护成本低等优点。但是, 太阳能发电易受到天气影响, 不能连续为用户负荷供电, 因此作为独立供电系统时面临巨大的挑战。风力发电系统通过风机旋转叶片将风的动能间接转化为电能, 其建

设周期短、环境要求低、储能丰富<sup>[6]</sup>。但是, 风电场只能建立在风能资源丰富的地区, 且风力发电机在雷暴中容易受损, 还需要不断完善风力供电系统。因此, 在基站供电规划和设计中, 应综合考虑新能源与柴油发电机互补的混合供电系统<sup>[7]</sup>。

近年来, 印度、南非、尼日利亚、土耳其和澳大利亚等国家对混合供电系统展开了广泛研究。研究内容大多涉及独立发电机与太阳能和风能等可再生能源结合的混合供电系统<sup>[8-9]</sup>。研究表明: 可再生能源发电, 尤其是太阳能发电、风力发电、柴油发电机结合, 可以显著降低柴油燃料消耗、系统运行和维护成本以及温室气体的排放量<sup>[10]</sup>。

尽管坦桑尼亚可再生资源丰富

收稿日期: 2018-07-20

网络出版日期: 2018-10-12

基金项目: 中央高校基本科研业务专项  
资金项目(2017MS001)、教育部-中国移  
动科研基金项目(MCM20150102)

且潜力巨大,但是面向通信基站的混合供电系统尚未广泛部署。因此,文中我们针对坦桑尼亚边远地区新能源基站建设所面临的挑战开展分析,研究新能源基站的架构及评估原理,并通过 HOMER 软件对多种混合供电系统方案进行仿真验证和结果分析,以提供经济可行和环境友好的解决方案。

## 1 边远地区通信基站供电现状分析及挑战

本文采用调查问卷的方法,分析坦桑尼亚边远地区通信基站供电现状以及新能源基站建设所面临的挑战。问卷对象为坦桑尼亚多个移动网络运营商(包括 Tigo Tanzania、Airtel Tanzania、Vodacom Tanzania 和 TTCL Public Company Limited)的电信工程师,合计 21 人。

针对坦桑尼亚通信基站供电来源的调查结果如图 1 所示,主要结论如下:首先,通信基础设施的主要电力来源仍然是电网和柴油发电机(95%),仅有 19% 的受访者指出一些运营商利用太阳能发电为基础设施供电;其次,对于边远地区的基站,由于电网稳定性差,主要采用柴油发电机作为电力来源(62%),而太阳能发电所占的比例很少(19%);最后,无论是基础设施还是边远地区基站供电,风力发电的应用均非常少。由此可见:可再生能源不是坦桑尼亚通信网络基础设施的主要电力来源,其原因如表 1 所示。结果显示:高昂的安装成本(95%)、不可预测的天气情况(95%)、技术人员(57%)的缺乏和可

▼表 1 电气工程师对坦桑尼亚移动网络运营商使用可再生能源供电的挑战的分析

面临的挑战	百分比/%
高昂的安装成本	95
高昂的运行成本	38
不可预测的天气情况	95
基站被盗情况	38
缺乏技术人员	57
可再生能源设备不足	76
移动网络运营商不愿意投资可再生能源供电	19

再生能源设备不足(76%)等因素是目前新能源基站建设所面临的主要挑战。综上所述,移动网络运营商未广泛利用可再生能源为其基础设施供电。

## 2 新能源基站架构及评估原理

对于基站供电困难的边远地区而言,新能源与柴油发电机互补的混合供电系统是一种经济可行的解决方案。通信基站的混合供电系统一般由太阳能发电、风力发电、柴油发电机和蓄电池组成。文中,我们主要考虑以下 4 种供电方式:

(1) 柴油发电机独立供电系统,用符号  $S_0$  表示;

(2) 风力发电与柴油发电机互补供电系统,用符号  $S_1$  表示;

(3) 太阳能发电与柴油发电机互补供电系统,用符号  $S_2$  表示;

(4) 风力发电、太阳能发电与柴油发电机互补的供电系统,用符号  $S_3$  表示。

图 2 介绍了风力发电、太阳能发电与柴油发电机互补供电系统结构示意图( $S_3$ ),包括基站、发电机、控制

器和储能装置 4 部分。在该系统中,将太阳能和风能作为主要能源,柴油发电机作为备用能源。当发电量超过负荷需求时,过剩电能被存储在电池组中;当发电量不能满足基站负荷需求时,柴油发电机和电池组将为基站供电。

为了定量地分析混合供电系统的环境友好性、经济可行性和发电稳定性,我们考虑了净现值(NPC)、能源成本(COE)、可再生能源发电量比例(RGR)、温室气体排放量等评价指标,并对不同系统配置的性能指标进行比较分析。

### (1) NPC

系统的 NPC 指一个生命周期内所有成本减去该期间收益的值。成本包括投资成本、重置成本、运行和维护成本、燃料成本。如果产生温室气体,成本中还包括气体排放处罚。净现值如式(1):

$$NPC(\$) = \frac{[(1+i)^N - 1]C_T}{i(i+1)^N}, \quad (1)$$

其中  $N$  代表年数,  $i$  是实际年利率,  $C_T$  是年度总成本。

### (2) COE

COE 指每千瓦时电力的平均成本,通过将年度发电成本除以总用电量来计算,即:

$$COE(\$) = \frac{C_T}{E_c}, \quad (2)$$

其中,  $E_c$  是总用电量。在混合供电系统中,我们则会优选 NPC 和 COE 低的系统。

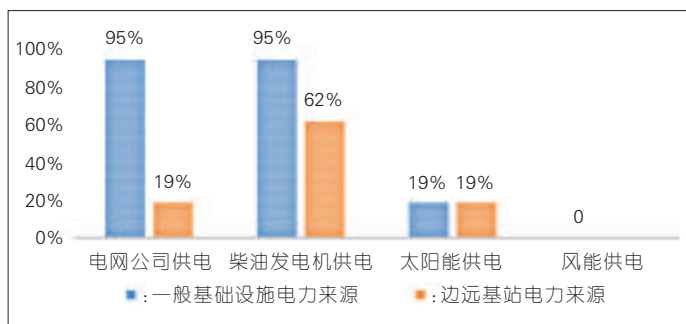
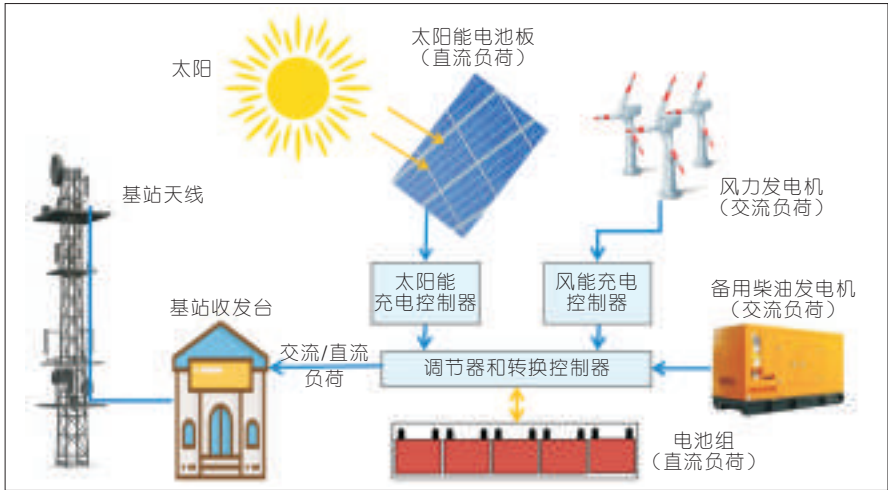


图 1 坦桑尼亚网络基础设施和边远基站的电力来源



▲图2 风力发电、太阳能发电与柴油发电机互补供电系统结构( $S_3$ )示意图

(3)RGR

RGR 由可再生能源的年度总发电量除以所有能源的年度总发电量来计算,即:

$$RGR = \frac{E_r}{E_T}, \quad (3)$$

其中  $E_r$  是可再生能源的年度总发电量,  $E_T$  是所有能源的年度总发电量。可再生能源比例越高,系统输出性能越好。

(4)二氧化碳排放量

温室气体是化石燃料燃烧的产物。碳排放量(CEQ),如二氧化碳( $\text{CO}_2$ )排放量计算如式(4):

$$CEQ = FFC \times EFCO_2, \quad (4)$$

其中  $FFC$  为消耗的化石燃料,  $EFCO_2$  为二氧化碳排放因子。

3 系统性能评估

本研究的可再生能源数据取自坦桑尼亚中部辛吉达地区,这个研究区域为西经  $4.8118^\circ - 5.4684^\circ$ ,北纬  $34.6976^\circ - 34.357^\circ$ 。通过 HOMER 软件对不同的供电系统建模,并对离网和并网供电系统的不同设计进行评估。在本研究中,HOMER 软件的主要输入包括柴油发电机、太阳能光伏电池、风力发电机、基站负荷需求、逆变器等系统组件的成本,以及用于模

型优化的其他相关数据。同时,HOMER 软件将 NPC、COE、温室气体排放量和 RGR 作为输出,对一年的数据进行仿真。

3.1 参数设置

在模型建立中,考虑的负荷为 54

千瓦时/天,峰值负荷为  $668 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,发电机的额定功率为  $7.5 \text{ kW}$ 。将风能和太阳能作为主要能源,并从 SWAT 数据库的全球天气数据<sup>[11]</sup>获得研究区域的风速和太阳辐射数据。本研究还从不同供应商网站获得基站供电系统各种组件的成本数据,如表 2 所示。

3.2 结果分析

在环境方面,移动网络运营商需要降低温室气体排放量,以减少其对环境的污染和对全球变暖的影响。各系统具体的温室气体排放量如表 3 所示。

仿真结果表明: $S_3$  系统每年产生约  $27.227 \text{ t}$  二氧化碳, $S_3$  系统每年仅排放约  $3.122 \text{ t}$  二氧化碳。在混合供电系统中,通过将太阳能发电产生的过剩电能储存在电池组中,降低柴油发电机的运行时间,减少化石燃料的燃烧,降低温室气体排放量。因此,

▼表2 基站供电系统各组件的成本数据

组件	描述	数值
柴油发电机	最小负荷比/%	40
	投资成本/(美元/千瓦)	1 400
	重置成本/(美元/千瓦)	1 250
	运行和维护成本/(美元/小时)	0.5
	寿命周期/h	15 000
太阳能光伏电池	燃料价格/(美元/升)	1.1
	投资成本/(美元/千瓦)	2 000
	重置成本/(美元/千瓦)	1 250
	运行和维护成本/(美元/小时)	5
逆变器	寿命周期/h	20
	投资成本/(美元/千瓦)	300
	重置成本/(美元/千瓦)	300
	运行和维护成本/(美元/年)	5
风力发电机	寿命周期/Y	15
	投资成本/(美元/千瓦)	6 100
	重置成本/(美元/千瓦)	3 500
	运行和维护成本/(美元/年)	50
电池	寿命周期/Y	20
	投资成本/(美元/千瓦)	220
	重置成本/(美元/千瓦)	220
	运行和维护成本/(美元/年)	10
	寿命周期/Y	不定



▼表3 不同供电系统温室气体排放量

系统类型	二氧化碳排放量/(kg/Y)	一氧化碳排放量/(kg/Y)	未燃烧碳氢化合物排放量/(kg/Y)	颗粒物排放量/(kg/Y)	二氧化硫排放量/(kg/Y)	氮氧化物排放量/(kg/Y)
S <sub>0</sub>	27 227	172	7	1	67	161
S <sub>1</sub>	19 158	121	5	1	47	113
S <sub>2</sub>	3 123	20	1	0	8	18
S <sub>3</sub>	3 122	20	1	0	8	18

混合供电系统更有利于环境的可持续发展。

在经济方面, S<sub>3</sub>系统更具成本效益。表4给出了不同供电系统的经济分析。结果显示: S<sub>3</sub>系统为净现值和能源成本提供了更经济的解决方案。与 S<sub>0</sub>系统相比, S<sub>3</sub>系统的NPC降低了130 246美元, 能源成本降低了0.512美元/千瓦时。虽然混合供电系统的初始投资成本高, 但是随着技术的进步, 太阳能和风力发电成本逐渐降低, 这将会促进新能源发电的广泛部署。

在供电方面, 混合供电系统具有更大的发电潜力。混合供电系统发电量如表5所示。与 S<sub>0</sub>系统和 S<sub>1</sub>系统相比, S<sub>2</sub>系统和 S<sub>3</sub>系统的可再生能源发电量最大, 可再生能源比例约为83%。其中主要为太阳能发电, 其发电量超过系统总发电量的80%。与太阳能发电相比, 风能的贡献并不显著, 例如 S<sub>3</sub>系统中风力发电量仅占总发电量的0.6%, 而柴油发电机的发电量约为14%。

以上结果表明: 该站址在利用太阳能发电为边远网络基础设施供电方面具有更大的潜力, 并且发电量大, 能够满足负荷需求。

图3进一步显示了 S<sub>3</sub>系统在10月份的发电量与负荷需求。结果表明: S<sub>3</sub>系统不仅能够满足用户负荷需求, 并且所产生的过剩电能还可以存储在储能装置中, 从而可以在峰值期间使用。

同时结果显示: 太阳能发电几乎可以满足白天所有负荷需求, 而柴油发电机和风力发电机则在太阳能发电量不足时使用, 例如在夜间没有光

照的时候。

#### 4 结束语

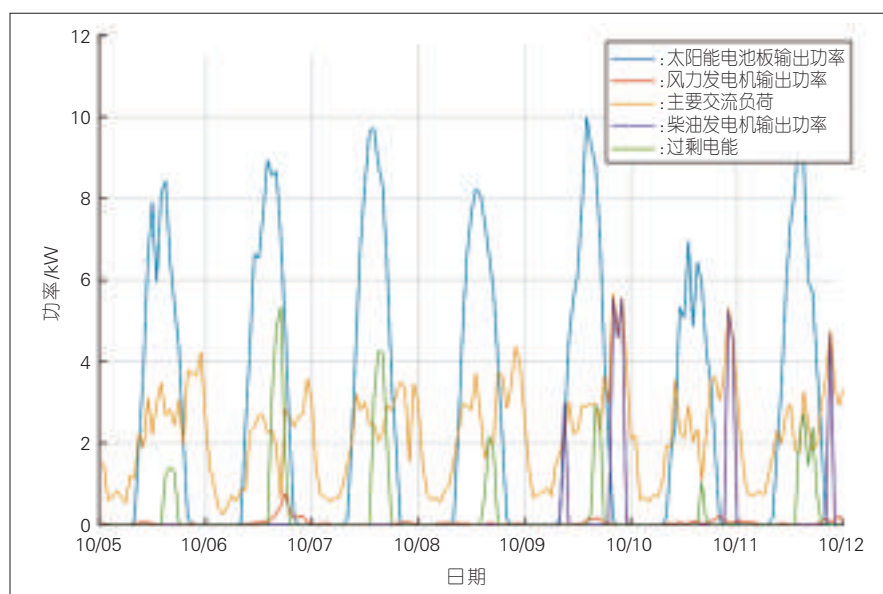
本研究调查了移动网络运营商

▼表4 不同供电系统成本

系统类型	投资成本/美元	重置成本/美元	运行和维护成本/美元	燃料成本/美元	净现值/美元	能源成本/美元
S <sub>0</sub>	9 339	59 053	25 140	147 910	240 663	0.945
S <sub>1</sub>	20 636	50 401	16 746	104 074	189 904	0.745
S <sub>2</sub>	46 776	37 345	15 910	16 963	110 417	0.433
S <sub>3</sub>	52 649	38 342	16 506	16 963	117 240	0.460

▼表5 不同系统每部分组件发电量

系统类型	发电机发电量/(千瓦时/年)	太阳能发电量/(千瓦时/年)	风能发电量/(千瓦时/年)	燃料发电量/(千瓦时/年)	发电时间/h	过剩电能/(千瓦时/年)
S <sub>0</sub>	277 97	0	0	10 401	10 401	10 401
S <sub>1</sub>	21 912	0	147	7 319	7 319	7 319
S <sub>2</sub>	3 380	21 139	0	1 193	1 193	1 193
S <sub>3</sub>	3 375	20 937	147	1 193	1 193	1 193

▲图3 S<sub>3</sub>系统发电量与负荷需求

利用可再生能源为其基础设施供电所面临的挑战。通过对不同的系统进行仿真和分析, 获得经济可行的混合供电系统模型。由于风能的发电量并不显著, 所以 S<sub>2</sub>系统不仅对环境友好, 而且更加经济可行, 并为坦桑尼亚移动网络运营商的基站供电问题提供了可持续的解决方案。研究结果对研究人员、政府管理人员、政策制定者、电网公司和环境部门都有很大的帮助, 并且可以为研究可再生

➡下转第11页

# 可再生能源供电无线通信的最优链路传输策略

## Optimal Transmissions Strategy for Wireless Communications Powered by Renewable Energy Sources

杜林松/DU Linsong  
黄川/HUANG Chuan

(电子科技大学, 四川 成都 611731)  
(University of Electronic Science and  
Technology of China, Chengdu 611731,  
China)

**传**统的能量受限于无线通信(如: 无线传感器网络), 一般通过能量有限的电池供电。网络的寿命受限于电信容量。当传感器电池中存储的能量用完后, 无线传感器网络将无法正常工作。战场或危险环境中, 替换电池非常不方便; 但利用可再生能源为通信节点供电, 可以提供几乎无限的环保能量供应。

与传统的电池供能相比, 通过能量收集器获得的能量是随时间动态变化的。因此, 可再生能源供电的无线通信设备受到一类能量收集(EH)约束的限制——在任意时间内设备消耗的总能量必须小于在这段时间内收集到的总能量。能量收集约束是可再生能源供电无线通信面临的新挑战。

可再生能源供电无线通信技术近几年受到了广泛重视<sup>[1-4]</sup>。从信息论的角度, 文献[1-2]中作者考虑高斯信道和衰落信道, 得到了可再生能

源供电无线点对点链路的容量; 在容量是无限大的假设下, 作者证明了可再生能源供电无线链路的信道容量可达到传统恒定功率供电下的信道容量。文献[3-4]中, 在时隙有限情况下, 作者确定EH模型(即发射机可以提前知道未来能量达到多少和能量到达时间)和随机EH模型(即发射机

只知道能量达到过程的统计特性)的最大吞吐率。但是, 上述研究并未详细探讨在衰落信道的吞吐率最大化问题。同时, 对于传统的恒定功率供电, 衰落信道的信息论限制已被完全研究透彻<sup>[5-6]</sup>, 其被称之为中断容量。中断容量被定义为: 在给定的中断概率约束下的最大传输速率, 其中发射功

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0006-006

**摘要:** 利用可再生能源为无线通信发射机供电, 可以实现绿色通信的无线传输。认为通信发射机由可再生能源供电, 并综述了点对点衰落信道的吞吐率最大化问题、中断概率最小化问题。首先, 针对吞吐率最大化问题, 考虑信道相干时间与能量相干时间相同的情况, 提出了基于阈值的最优发射功率分配策略, 给出了阈值的高效计算方法, 并将结果推广到更一般的情形。然后, 针对中断概率最小化问题, 考虑信道相干时间大于或等于能量相干时间情况, 证明了最优分配功率策略具有“存储-发射”的结构。最后, 通过数值结果和仿真验证算法的有效性。

**关键词:** 能量收集; 吞吐率; 中断概率; 衰落信道; 最优功率分配

**Abstract:** Wireless transmitter supplied by the renewable energy sources is seen as a way to achieve green communication. The throughput maximization and the outage probability minimization problems in point-to-point fading channels with the transmitter powered by the renewable energy are studied in this paper. First, the throughput maximization problem for the case that the duration of the channel coherence (CC) slot is the same as that of the energy coherence slot is considered, and a “threshold-based” optimal energy allocation is proposed. An efficient numerical algorithm is then proposed to obtain the threshold, and then the results are extended to the case that the duration of the CC slot is less than that of the energy coherence slot. Then, for the outage probability minimization problem, the case that duration of the CC slot is less than or equal to that of the energy coherence slot is considered and its optimal power allocation owns the “save-then-transmit” structure is proved. At last, the numerical results are given to verify the effectiveness of the algorithm.

**Key words:** energy harvesting; throughput; outage probability; fading channel; optimal power allocation

率在每个时隙上是一个常数。这个最大化问题也可被转化为给定传输速率时的中断概率最小化问题<sup>[5-6]</sup>。但是,现阶段并没有深入研究可再生能源供电无线链路的中断概率。

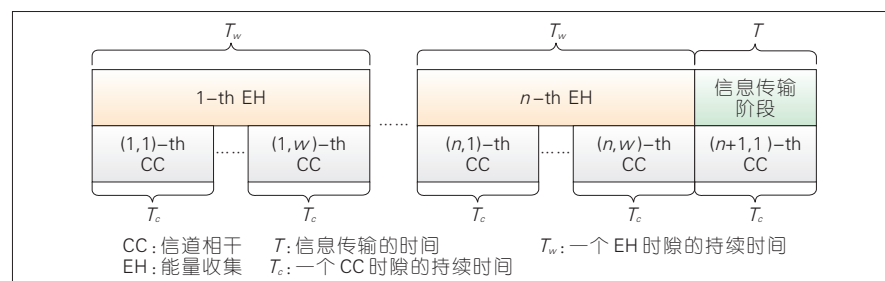
文章中,我们研究在衰落信道下,可再生能源供电无线链路的吞吐率最大化问题和中断概率最小化问题,其中发射机不知道信道状态信息(CSI),但知道信道分布信息。同时,通过实证研究发现<sup>[7-10]</sup>:可再生能源产生的能量是随着时间动态到达的,和衰落信道的变化类似,在一个EH相干时隙内,能量到达的速率是恒定的。而在不同的EH相干时隙间,能量到达速率可能会发生变化<sup>[7-8]</sup>。在衰落信道中,由于信道变化速度<sup>[9-10]</sup>一般都大于能量到达速率的变化速度,因此EH相干时间一般都要大于或等于信道相干(CC)时间(信道系数在CC时隙上保持不变,在不同CC时隙变化)。所以,在一个EH时隙上一般会包含几个CC时隙。

## 1 吞吐率最大化

首先需要考虑可再生能源供电无线链路的吞吐率最大化问题。

### 1.1 系统模型

如图1所示,我们考虑一个点对点衰落信道,其中发射机由可再生能源供电。因为电池的半双工性,即电池不能同时充放电,所以发射机在发送信息时不能收集能量。因此,我们采用“存储-然后-传输”的能量控制模式<sup>[11]</sup>,该模式由2个阶段组成:能量收集阶段和信息传输阶段。



▲ 图1 可再生能源无线链路模型

(1)能量收集阶段:在这个阶段,发射机从可再生能源收集能量。能量收集速率在每个长度为 $T_w$ 的EH时隙内是一个常数,并在不同EH时隙之间变化。在第 $n$ 个EH时隙达到的能量是一个随机变量 $E_n \in [0, A]$ ,  $n \in \{1, 2, 3, \dots\}$ ,  $A$ 是一个有限的常数。能量达到序列 $\{E_n\}$ 是独立同分布的过程,在第 $N$ 个EH时隙的开始,  $E_1, E_2, \dots, E_N$ 对于发射机是已知的,  $E_n$ ,  $n \in \{1, 2, 3, \dots\}$ 的概率分布也是已知的。在第 $N$ 个时隙的结束,电池中存储的能量为 $S_N = \sum_{n=1}^N E_n$ 。

衰落信道的信道系数也是准静态的:其在每个长度为 $T_c$ 的CC时隙中保持不变,在不同CC时隙之间变化。CC时隙长度与EH时隙长度之间的关系存在2种情况<sup>[9-10]</sup>:EH时隙长度等于CC时隙长度,即 $T_w = T_c$ ;EH时隙长度大于CC时隙长度,即 $T_w = WT_c$ ,  $W \in \{2, 3, \dots\}$ ,也就是说每个EH时隙中包含 $W$ 个CC时隙。

定义在第 $n$ 个EH时隙中的第 $w$ 个CC时隙为第 $(n, w)$ 个CC时隙,其信道增益为 $|h_{n,w}|^2 \in [h_{\min}, h_{\max}]$ ,信道增益序列 $\{|h_{n,w}|^2\}$ 是一个独立同分布过程(i.i.d.),且与 $\{E_n\}$ 独立。

(2)信息传输阶段:当满足一定条件后,发射机停止能量收集,开始发送信息,信息传输的时间为 $T$ 。同时,信道系数也有可能信息传输阶段变化,因此存在2种情况:信息传输阶段持续时间小于或等于一个CC时隙,即 $T \leq T_c$ ;信息传输阶段持续

多个CC时隙,即 $T = MT_c$ ,  $M \in \{2, 3, \dots\}$ 。但事实上,这2种情况的结果都没有太大的区别<sup>[14]</sup>。因此,我们只考虑 $T \leq T_c$ 这种情况。

基于上述分析,我们探讨2种情况:情况1( $T_w = T_c$ );情况2( $T_w = WT_c$ )。

如果发射机在第 $(n, w)$ 个CC时隙开始发送信息,信道发射机与接收机之间信道输入-输出关系为:

$$y = h_{n,w}x + z, \quad (1)$$

其中 $y$ 是接收到的信号, $x$ 是发射的信号, $z$ 为均值为零,方差为 $\sigma^2$ 圆对称复高斯(CSCG)噪声。

我们先讨论情况1,然后再将结果拓展到情况2。对于情况1,每个EH时隙上都只有1个CC时隙,所以第 $(n, 1)$ 个CC时隙和第 $n$ 个EH时隙是等价的,因此我们只提EH时隙。为了简化,我们定义 $|h_n|^2 = |h_{n,1}|^2$ 。

### 1.2 情况1

我们首先提出一个平均吞吐率最大化问题,再给出这个问题的最优能量控制方法。

(1)平均吞吐率最大化问题的建立。在每个传输周期结束后,发射机都将存储在电池里面的所有能量 $S_N$ 用于发送信息。通过香农定理,可得信道容量为 $C = \log(1 + P_r/\sigma^2)$ ,其中 $P_r$ 是接收到信号的平均功率,即 $P_r = |h_{N+1}|^2 S_N / T$ 。因此,如果发射机在第 $N$ 个EH时隙停止能量收集开始发送信息,那么一个传输周期吞吐率为:

$$\tilde{R}_N = \frac{T \log \left( 1 + \frac{|h_{N+1}|^2 S_N}{\sigma^2 T} \right)}{T_w N + T}. \quad (2)$$

可以看出: $\tilde{R}_N$ 是一个随机变量,它的大小取决与电池中存储的能量 $S_N$ 、能量收集停止时间 $N$ 和信道增益 $|h_{N+1}|^2$ 。

我们的目标是:找到一个最优停



止规则来最大化系统的平均吞吐量。从直观上来看,增大能量收集的时间  $N$ ,发射机可以收集到更多的能量  $S_N$ ,从而发送更多的信息;但是过长的能量收集时间  $N$  又会增大传输周期的时间,从而降低式(2)中的吞吐量。因此,这里存在一个关于能量收集时间  $N$  和收集能量  $S_N$  的权衡问题。

考虑传输周期重复  $D$  次,第  $d$  个传输周期的停止时间为  $N_d$ ,  $d \in \{1, 2, \dots, D\}$ ,  $D$  个传输周期的平均吞吐率为:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{d=1}^D T \log \left( 1 + \frac{|h_{N+1,d}|^2 \sum_{n=1}^{N_d} E_{n,d}}{\sigma^2 T} \right)}{\sum_{d=1}^D T N_d + T}, \quad (3)$$

其中  $E_{n,d}$  为第  $d$  个传输周期中的第  $n$  个 EH 时隙收集到的能量,  $|h_{N+1,d}|^2$  为第  $d$  个传输周期中的第  $(N+1)$  个 EH 时隙的信道增益。因为  $E_{n,d}$  和  $|h_{N+1,d}|^2$  存在平稳性和各态历经性,因此  $N_d$  也存在平稳性且各态历经性,通过 Birkhoff 遍历性原理<sup>[12]</sup>,可得:当  $D \rightarrow \infty$ , 几乎确定 (a.s.)

$$\bar{R} \rightarrow \frac{E \left\{ \log \left( 1 + \frac{|h_{N+1}|^2 S_N}{\sigma^2 T} \right) \right\}}{E(T_w N + T)} \triangleq R_{N^*} \quad (4)$$

因此,在无限时域上,对于上述的可再生能源无线通信系统,存在着一个平均吞吐量最大化问题,即问题(P1):

$$(P1) \quad k^* = \sup_{N \in \mathbb{C}} R_N, \quad (5)$$

其中  $k^*$  是最大平均吞吐量,  $\mathbb{C}$  是停止规则的可行域<sup>[13]</sup>,即:

$$\mathbb{C} = \{N: N \geq 1, E(NT_w + T) < \infty\}. \quad (6)$$

问题(P1)是一个最优停止问题<sup>[13]</sup>,通过解决问题(P1),一个最优停止规则<sup>[13]</sup>可以被找到:

$$N^* = \arg \sup_{N \in \mathbb{C}} R_N. \quad (7)$$

(2) 最优停止规则。首先,通过

证明如下2个假设成立,

$$A1: E \left( \sup_{n \geq 1} R_n \right) < \infty;$$

$$A2: \limsup_{n \geq 1} R_n \leq R_\infty = -\infty;$$

我们可知 P1 最优停止规则是存在的<sup>[13]</sup>。

P1 的最优停止规则拥有“阈值”结构,其阈值大小取决于收集到能量的大小,其具体形式为<sup>[14]</sup>:

$$N^* = \min \{n \geq 1: |h_{n+1}|^2 \geq G(S_n)\}, \quad (8)$$

其中  $G(S_n)$  是一个关于信道增益  $|h_{n+1}|^2$  的阈值,它的大小取决于当前电池中存储的能量  $S_n$ 。

通过式(8)我们可以发现:

- 最优停止规则的阈值  $G(S_n)$  是一个关于  $S_n$  的函数。很明显  $S_n$  的大小随着 EH 时隙变化的,因此  $G(S_n)$  也随着时间变化;

- 函数  $G(\cdot)$  与 EH 时隙  $n$  无关,因此它是不变的。所以我们可以在进行传输之前就求出方程  $G(S)$ ,  $S \in [0, S_c]$ , 其中  $S_c$  是电池容量。

$G(S)$  则可以通过式(9)后向递归得出<sup>[14]</sup>:

$$G(S) = \left( \frac{Z_S}{2^{\frac{Z_S}{T}} - 1} \right) \sigma^2 T, \quad (9)$$

其中  $Z_S$  为:

$$Z_S = E \left\{ \max \left[ \begin{aligned} & T \log \left( 1 + \frac{|h_{n+1}|^2 \min(S + E_n, S_c)}{\sigma^2 T} \right) \\ & T \log \left( 1 + G(\min(S + E_n, S_c)) \frac{\min(S + E_n, S_c)}{\sigma^2 T} \right) \end{aligned} \right] \right\} - k^* T_w. \quad (10)$$

首先,如果电池容量  $S \in [0, S_c]$  是连续的,那么必须将其离散化为  $S \in [0, \delta, \dots, i\delta \dots S_c]$ , 其中  $\delta$  是一个常数。然后,为了开始进行后向递归,我们需要计算出递归的初始值  $G(S)$ ,它是如下方程的根:

$$E \left\{ \max \left[ T \log \left( \frac{\sigma^2 T + |h_1|^2 S_c}{\sigma^2 T + G(S_c)} \right), 0 \right] \right\} - k^* T_w = 0. \quad (11)$$

最后,我们通过式(9)和式(10)从  $G(S_c)$  到  $G(0)$  开始递归。

在电池容量无限的情况下,最优停止规则和阈值的递归计算方法与电池容量有限情况下的方法基本相同,唯一区别是:必须从  $S_c = \infty$  开始递归。而  $G(\infty)$  是一个有限值<sup>[14]</sup>,是如下方程的根<sup>[14]</sup>:

$$E \left\{ \max \left[ T \log \left( \frac{|h_1|^2}{G(\infty)} \right), 0 \right] \right\} - k^* T_w = 0. \quad (12)$$

### 1.3 情况2

通过图1可以看出:对于情况2(即 EH 时隙的长度大于 CC 时隙的长度),发射机在任何一个 EH 时隙的末端停止能量收集,它一定也在一个 CC 时隙的末端停止能量收集。因此,我们只需要考虑在哪个 CC 时隙停止能量收集。针对情况2,我们也需要找到一个最优停止规则  $(N^*, W^*)$  使得平均吞吐量最大化。

情况2的最优停止规则形式为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{aligned} N^* &= \min \{n \geq 1: |h_{n,w+1}|^2 \geq G(S_{n,w}, E_n), n \geq 1, W \geq w \geq 1\} \\ W^* &= \min \{w \geq 1: |h_{N^*,w+1}|^2 \geq G(S_{N^*,w}, E_{N^*}), W \geq w \geq 1\} \end{aligned} \quad (13)$$

其中  $S_{n,w}$  为在第  $(n, w)$  个 CC 时隙时电池里存储的能量。可以看出:情况2和情况1的最优停止规则的形式相似,不同点在于:情况2的阈值大小不仅与当前 CC 时隙收集到的总能量  $S_{n,w}$  有关,还与最后一个 EH 时隙中收集到的能量大小有关。

## 2 中断概率最小化

本节我们考虑可再生能源无线链路的中断概率最小化问题。对于中断概率最小化问题,CC 时间小于 EH 相干时间和 CC 时间等于 EH 时隙的结果是完全一样的,因此我们将其放在一起考虑。首先,我们给出系统模型。

### 2.1 系统模型和问题建立

和上一节的系统模型类似,整个传输过程经历  $N$  个 EH 时隙,每个 EH 时隙包含  $W$  个 CC 时隙。在每个 EH 时隙中,能量收集速率不变<sup>[15]</sup>,定



义为  $Q_n$ ,  $i=1, \dots, N$ , 且发射机可以提前知道所有 EH 时隙的能量收集速率。在第  $(n, w)$  个 CC 时隙的信道输入-输出关系为:

$$y_{n,w} = h_{n,w} \sqrt{P_{n,w}} x_{n,w} + z_{n,w}, \quad (14)$$

$n=1, \dots, N$ ,  $w=1, \dots, W$ , 其中  $y_{n,w}$  是接收到的信号,  $x_{n,w}$  是零均值, 方差为 1 的发射信号,  $P_{n,w}$  是发射功率。这里的  $h_{n,w}$  对于发射机是未知的, 但接收机是完全已知的。

每个 CC 时隙对应的瞬时互信息量为<sup>[15]</sup>:

$$I_{n,w}(h_{n,w}, P_{n,w}) = \log \left( 1 + \frac{|h_{n,w}|^2 P_{n,w}}{\sigma^2} \right). \quad (15)$$

所有 CC 时隙的传输速率都为一定值  $R$ , 因此第  $(n, w)$  个 CC 时隙的中断概率为:

$$\Phi(P_{n,w}) = \Pr \{ I_{n,w}(h_{n,w}, P_{n,w}) < R \} = \Pr \left\{ |h_{n,w}|^2 < \frac{2^R - 1}{\sigma^2 P_{n,w}} \right\}. \quad (16)$$

需要注意的是:  $\Phi(P_{n,w})$  是一个由发射功率  $P_{n,w}$ 、信道增益  $|h_{n,w}|^2$  的概率分布, 以及传输速率  $R$  组成的中断概率函数。此外,  $\Phi(\cdot)$  在  $P_{n,w} \geq 0$  时严格单调递减。

每个 CC 时隙可用的发射功率受到如下 EH 约束条件的限制<sup>[15]</sup>:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w P_{i,j} \leq W \sum_{i=1}^{n-1} Q_i + w Q_n, \quad (17)$$

$$n=1, \dots, N, m=1, \dots, M$$

可以看出, 这里存在一个有限 CC 时隙上的平均中断概率最小化的问题(P2):

$$(P2) \quad \min_{\{P_{i,j}\}} \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \Phi(P_{i,j}), \quad (18)$$

$$s.t. (16), P_{i,j} \geq 0, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M. \quad (19)$$

很明显, 约束条件(19)是一个线性约束。因此问题(P2)的凹凸性取

决于函数  $\Phi(\cdot)$ 。

## 2.2 最优功率分配

在本小节中, 我们首先给出中断概率函数  $\Phi(\cdot)$  的一些重要特性, 然后利用这些特性来获得问题(P1)的最优解。

(1) 中断概率函数的特性。我们用威布尔衰落<sup>[16]</sup>来举例, 这里省略  $|h_{n,w}|^2$  和  $P_{n,w}$  中的  $(n, w)$ 。在威布尔衰落下, 复信道系数  $h$  可以被表示为:

$$h = (X + jY)^{2/\beta}, \quad (20)$$

其中  $X$  和  $Y$  是零均值且方差为 1 的独立同分布高斯随机变量,  $\beta$  是一个反应信道衰落严重性和复杂性的参数, 且  $\beta > 0$ 。当  $\beta=2$  时, 威布尔衰落就退化为著名的瑞利衰落。 $|h|$  的概率密度函数为  $f(r) = \beta r^{\beta-1} \exp(-r^\beta)$ , 且  $r = |h| \geq 0$ , 因此对应的中断概率函数为:

$$\Phi(P) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{2^R - 1}{P} \right)^{\frac{\beta}{2}} \right]. \quad (21)$$

对于威布尔衰落的中断概率, 可知定义在式(21)中的中断概率函数在  $P \in [0, P_b]$  范围内是凹的, 而在  $P \in [P_b, +\infty)$  上是凸的, 其中:

$$P_b = \left( \frac{\beta/2}{\beta/2 + 1} \right)^{\frac{\beta}{2}} (2^R - 1). \quad (22)$$

威布尔衰落、莱斯衰落、Nakagami 衰落等, 都有上述性质, 也存在这样一个  $P_b$ 。

(2) 最优解的结构。问题(P2)的最优解有如下 2 个特点<sup>[15]</sup>。

• 在 P2 的最优解中, 最多只存在一个严格为正且大小低于  $P_b$  的最优分配功率  $P_{n,w}^*$ 。所以, 除了这唯一的特殊情况, 在一般情况下对于任何 CC 时隙, 如果可用的发射功率低于  $P_b$ , 发射机都不能发送信息, 即

$P_{n,w}^* = 0$ , 必须等到可用发射功率高于  $P_b$  才可以发送信息。

• 在 P2 中, 任意 2 个连续 CC 时隙的最优分配功率  $P_{n,w}^*$  和  $P_{n,w+1}^*$  同时大于  $P_b$  的充要条件<sup>[15]</sup>: 如果在第  $(n, w)$  个 CC 时隙, 定义在式(17)中的 EH 约束条件无法取等, 即

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w P_{i,j} < W \sum_{i=1}^{n-1} Q_i + w Q_n, \text{ 则 } P_{n,w}^* = P_{n,w+1}^*;$$

如果  $P_{n,w}^* < P_{n,w+1}^*$ , 则在第  $(i, j)$  个 CC 时隙的 EH 约束条件取等, 即

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^w P_{i,j} = W \sum_{i=1}^{n-1} Q_i + w Q_n.$$

从上述 2 个点可以总结出: 问题 P2 的最优解也存在“存储-然后-发射”的结构。首先, 发射机在一定数量的 CC 时隙中保持沉默, 然后, 发射机(可能)在一个 CC 时隙内以小于  $P_b$  的功率传输信息, 最后, 发射机保持一个大于  $P_b$  的功率传输信息, 然后在能量刚好耗尽的 EP 时隙之后(即约束条件(17)取等)提高功率级。

## 3 数值结果

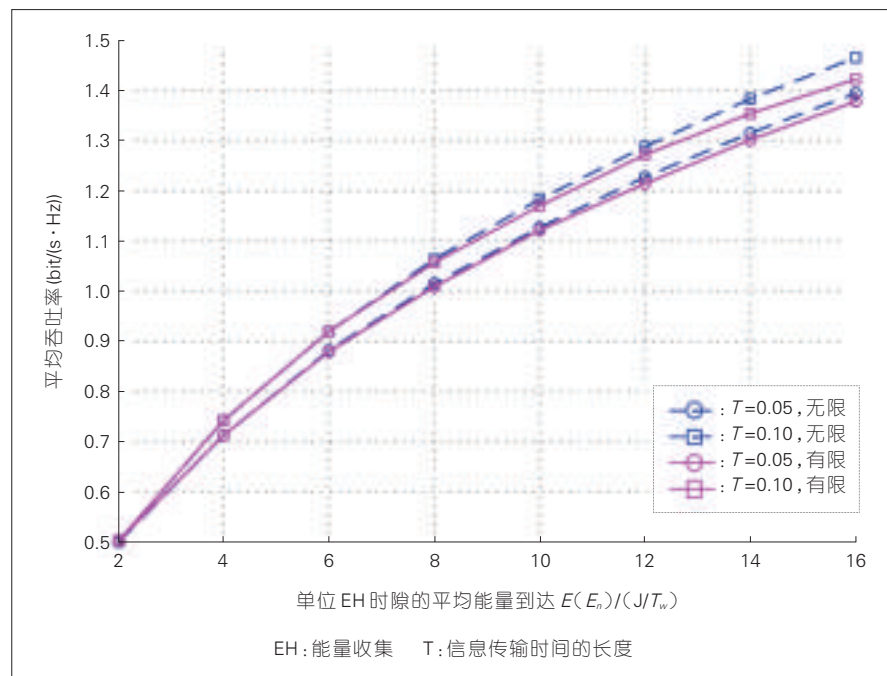
本节分别给出在不同可再生能源供电无线通信场景下的最大吞吐率和最小中断概率的数值结果, 其中噪声功率被设为  $\sigma^2 = 1$ 。

### 3.1 吞吐率

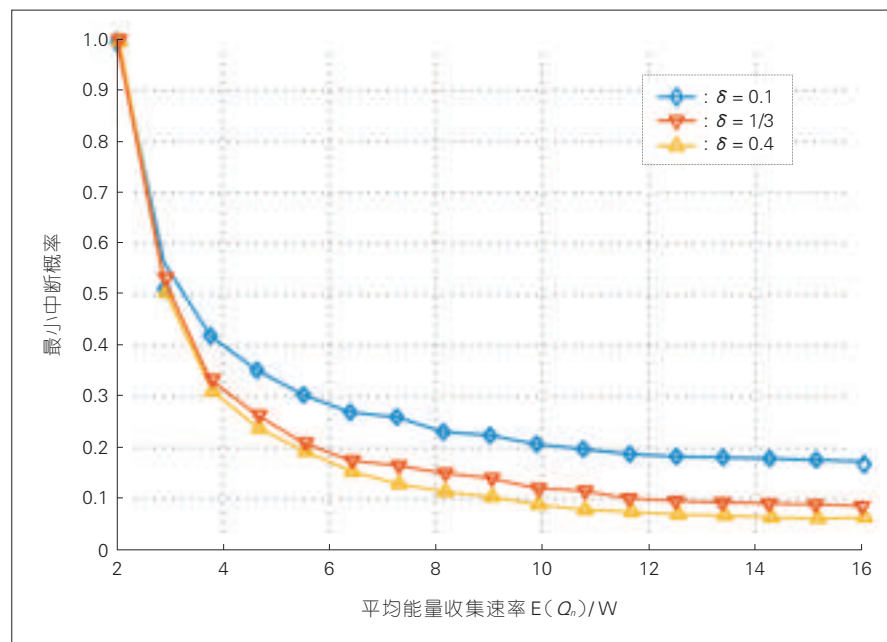
图 2 展示了在情况 1 下(即  $W=1$  时), 不同  $E(E_n)$  的最大平均吞吐率, 其中  $\{E_n\}$  和  $\{h_n\}$  都独立同分布,  $E_n$  在 0 和 A 上 2 点分布, 每个 EH 时隙的长度为  $T_w = 0.1$  s。在电池容量有限时,  $S_c = 80$  J。从图 2 描绘的曲线可以看出: 在电池容量无限情况下的平均吞吐率大于电池容量有限情况下的最大平均吞吐率。同时, 这 2 种情况下吞吐率之间的差距随着  $E(E_n)$  的增加而增大, 而在  $T=0.1$  s 时的吞吐率大于  $T=0.05$  s 时的吞吐率。

### 3.2 中断概率

图 3 展示了在不同平均能量收集



▲图2 最大平均吞吐率与单位能量收集实习时隙的平均能量到达之间的关系



▲图3 最小中断概率与平均能量收集速率之间的关系

速率  $E(Q_n)$  时的最小中断概率。考虑一阶马尔科夫能量达到过程,其中能量收集速率  $Q_n$  存在3种状态:0,  $P$ ,  $2P$ 。定义能量收集速率从1个状态转移到另外2个状态的概率都为  $\delta$ ,且  $0 \leq \delta \leq 1/2$ 。因此,能量收集速率保持不变的概率为  $1-2\delta$ 。对于其他

参数,可以设  $W=1$ ,  $N=20$ ,  $R=0.5 \text{ bit/(s} \cdot \text{Hz)}$ 。从图3可看出:在平均能量收集速率相同的情况下,状态转移概率  $\delta$  越大,中断概率越小。

#### 4 结束语

针对点对点衰落信道,我们研究

了发射机由可再生能源供电的吞吐量最大化问题和中断概率最小化的问题,其中未来的CSI对于发射机是未知的。首先,针对吞吐量最大化问题,我们证明在CC时间与EH相干时间相等的情况,最优功率控制策略拥有阈值结构,并提出一个递归方法来求得其阈值,并将上述情况下的结果推广到更加一般的情况。然后,研究了CC时隙的长度大于或等于EH时隙的长度这种情况下的中断概率最小化问题,证明了其最优功率分配拥有“存储-发射”的结构。最后,检验了数值结果以及验证算法的有效性。

#### 参考文献

- [1] OZEL O, ULUKUS S. Information-Theoretic Analysis of an Energy Harvesting Communication system[C]// Processing of Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). USA: IEEE, 2010: 330-335. DOI: 10.1109/PIMRCW.2010.5670389
- [2] RAJESH R, SHARMA V, VISWANATH P. Capacity of Fading Gaussian Channel with An Energy Harvesting Sensor Node[C]// Processing of Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). USA: IEEE, 2011: 1-6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2011.6133901
- [3] HO C K, ZHANG R. Optimal Energy Allocation for Wireless Communications with Energy Harvesting Constraints [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60 (9): 4808-4818. DOI: 10.1109/TSP.2012.2199984
- [4] TATUNCUOGLU K, YENER A. Optimum Transmission Policies for Battery Limited Energy Harvesting Nodes [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1180-1189. DOI: 10.1109/TWC.2012.012412.110805
- [5] BIGLIERI E, PROAKIS J, SHAMAI S. Fading Channels: Information-Theoretic and Communications Aspects[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44 (6): 2619-2692. DOI: 10.1109/18.720551
- [6] GOLDSMITH A J, VARAIYA P P. Capacity of Fading Channels with Channel Side Information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1997, 43(6): 1986-1992. DOI: 10.1109/18.641562
- [7] HO C K, KHOA P D, MING P C. Markovian Models for Harvested Energy in Wireless Communications[C]// Processing of

- International Conference on Communication Systems (ICCS). USA: IEEE, 2010: 311–315. DOI: 10.1109/ICCS.2010.5686445
- [8] VENTURA J, CHOWDHURY K. Markov Modeling of Energy Harvesting Body Sensor Networks[C]// Processing of Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). USA: IEEE, 2011: 2168–2172. DOI: 10.1109/PIMRC.2011.6139899
- [9] SADEGHI P, KENNEDY R A, RAPAJIC P B, et al. Finite-State Markov Modeling of Fading Channels—A Survey of Principles and Applications [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(5): 57–80. DOI: 10.1109/MSP.2008.926683
- [10] KHUZANI M B, SAFFAR H E, ALIAN E H M, et al. On Optimal online Power Policies for Energy Harvesting with Finite-State Markov Channels[C]// Processing of International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT). USA: IEEE, 2013: 1586–1590. DOI: 10.1109/ISIT.2013.6620494
- [11] LUO S, ZHANG R, LIM T J. Optimal Save-Then-Transmit Protocol for Energy Harvesting Wireless Transmitters[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1196–1207. DOI: 10.1109/TWC.2013.012413.120488
- [12] CORNFELD I P, FOMIN S V, SINAI Y G. Ergodic Theory[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2012. DOI: 10.1007/978-1-4615-6975-5
- [13] FERGUSON T S. Optimal Stopping and Applications [EB/OL]. (2017-02-01) <http://www.math.ucla.edu/tom/Stopping/Contents.html>
- [14] DU L, LI Q, HUANG C. Optimal Save-Then-Transmit for Random Energy Harvesting Communications: An Optimal Stopping Approach[J]. IEEE Access, 2017, 5: 26487–26500. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2772317
- [15] HUANG C, ZHANG R, CUI S. Optimal Power Allocation for Outage Probability Minimization in Fading Channels with Energy Harvesting Constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 1074–1087. DOI: 10.1109/TW.2013.121813.130953
- [16] SAGIAS N C, KARAGIANNIDIS G K. Gaussian Class Multivariate Weibull Distributions: Theory and Applications in Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(10): 3608–3619. DOI: 10.1109/TIT.2005.855598

## 作者简介



杜林松, 电子科技大学在读博士研究生; 主要研究方向为可再生能源通信、全双工中继通信等; 发表SCI期刊论文1篇, 国际会议论文2篇。



黄川, 电子科技大学教授、博士生导师, 《IEEE Access》、《IEEE Wireless Communication Letters》编辑, IEEE 亚太通信协会下属会员发展分会秘书, IEEE 通信协会学生竞赛委员会委员; 主要研究方向为无线通信、通信信号处理、人工智能和优化理论在无线通信中的应用; 2016年第十二批国家“千人计划”青年人才项目入选者, 2014年四川省“千人计划”特聘专家, 2015年“成都人才计划”特聘专家; 发表专著1部、论文60余篇。

## ←上接第5页

能源为坦桑尼亚偏远地区供电所起的作用提供有用的数据。

## 致谢

本研究得到华北电力大学许晨老师和重庆大学 Edwin J. Kitindi 博士的帮助, 谨致谢意!

## 参考文献

- [1] WU J, ZHOU S, NIU Z S. Traffic-Aware Base Station Sleeping Control and Power Matching for Energy-Delay Tradeoffs in Green Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(8): 4196–4209. DOI: 10.1109/twc.2013.071613.122092
- [2] SU L, YANG C, CHIH-LIN I. Energy and Spectral Efficient Frequency Reuse of Ultra Dense Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(8): 5384–5398. DOI: 10.1109/TWC.2016.2557790
- [3] 孙俨. 风能、太阳能互补供电型基站的应用[J]. 通信电源技术, 2011, 28(4): 33–37. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2011.04.010
- [4] 马怀新. 新能源与减碳 [J]. 四川水力发电, 2010, 29(s2): 286–301
- [5] 丁强. 太阳能并网发电在通信基站中的应用研究[C]//中国通信学会信息通信网络技术委员会 2011 年年会论文集(下册). 2011
- [6] 刘波, 贺志佳, 金昊. 风力发电现状与发展趋势 [J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(2): 7–13. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2992.2016.02.002
- [7] 崔志刚, 吕宇欣, 郝颖, 等. 新能源供电系统在通信基站中应用的关键技术研究[J]. 通信电源技术, 2011, 28(4): 5–8, 94. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2011.04.001
- [8] ADEFARATI T, BANSAL R C, JOHN JUSTO J. Techno-Economic Analysis of a PV-Wind-Battery-Diesel Standalone Power System in A Remote Area [J]. The Journal of Engineering, 2017(13): 740–744. DOI: 10.1049/joe.2017.0429
- [9] BHOWMIK D, SINHA A K. Cost-Based Allocation Model for Hybrid Power System Considering Solar, Wind and Thermal Generations Separately [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(18): 4576–4587. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0305
- [10] GONG J, THOMPSON J S, ZHOU S, et al. Base Station Sleeping and Resource Allocation in Renewable Energy Powered Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(11): 3801–3813. DOI: 10.1109/tcomm.2014.2359883

## 作者简介



王亚会, 华北电力大学在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信。



周振宇, 华北电力大学副教授、博士生导师; 主要研究方向为无线异构网络、绿色通信与智能电网通信等; 主持国家级与省部级项目4项; 发表ESI高被引论文2篇, SCI论文40余篇, 申请发明专利20余项。



贾云健, 重庆大学通信工程学院研究员、博士生导师; 主要研究方向为无线通信、移动网络、通信计算融合等; 承担国家级省部级科研项目10余项; 发表论文80余篇, 获权发明专利36项。



# 可再生能源供电下射频单元的基带功能分割和功率控制

## Flexible Baseband Functional Split and Power Control with Renewable Energy Powered Remote Radio Unit

王刘猛/WANG Liumeng  
周盛/ZHOU Sheng

(清华大学, 北京 100084)  
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

中国移动在 2009 年提出云接入网 (C-RAN) 的概念<sup>[1]</sup>, 其主要思路是将部分或所有基带功能集中到基带功能池, 在基带功能池对基带单元 (BBU) 进行统一管理和资源动态分配, 进而提高资源利用率, 并支持协作传输<sup>[2]</sup>。另一方面, C-RAN 能降低远端射频单元 (RRU) 的复杂度, 进而降低网络的部署和运营成本。其中, 前传网 (Fronthaul) 负责 BBU 和 RRU 之间基带信号的传输。对于全集中的 C-RAN, 即将全部的基带功能放置在 BBU, 前传网的带宽需求非常高。以长期演进 (LTE) 为例, 对于典型的 20 MHz 的单天线单载波系统, 如使用通用公共无线接口 (CPRI), 前传网的数据速率需求为 1 Gbit/s<sup>[3]</sup>。相比于全集中的 C-RAN, 通过将部分基带功能放置在 RRU, 将其余基带功能放置在 BBU, 基带功能分割可以显著降低前传网的带宽需求<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2018-08-20

网络出版日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金  
(61571265, 91638204, 61621091)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0012-006

**摘要:** 通过改变基带功能在远端射频单元 (RRU) 的放置, 基带功能分割能实现前传带宽需求和 RRU 处理能耗之间的折中。首先调研了基带功能分割和可再生能源供电下无线传输功率控制的研究现状, 进而针对 RRU 使用可再生能源供电的场景, 联合优化离线的基带功能分割方案的选择和传输功率控制, 包括每种基带分割方案被选择的时长及相应的传输功率, 并提出了一种启发式的在线策略。数值结果表明: 相比于固定的基带功能分割方案, 灵活的基带功能分割能充分利用可再生能源并提高系统的吞吐量。

**关键词:** 能量收集; 基带功能分割; 功率控制; 前传网; 云接入网

**Abstract:** By changing the placement of the baseband function in the remote radio unit (RRU), the baseband function partition can achieve the tradeoff between the fronthaul bandwidth requirement and the RRU processing energy consumption. In this paper, the study on baseband functional split and power control in energy harvesting wireless communication systems is reviewed. Then a renewable energy powered RRU is studied, and the offline functional split scheme selection and power control are jointly optimized, specifically the transmit duration of each selected functional split scheme and the corresponding transmit power, and then a heuristic online policy is proposed. Numerical results show that flexible functional split can substantially improve the throughput compared with fixed functional split scheme, owing to better utilization of the renewable energy.

**Keywords:** energy harvesting; baseband functional split; power control; fronthaul; cloud-radio access network

为提升网络容量, 保证网络覆盖, 未来运营商将部署更多的 RRU。通过收集环境中的可再生能源, RRU 可消耗更少或者不消耗电网能量。同时, 利用可再生能源, RRU 可以部署到电网无法覆盖的区域<sup>[5]</sup>。由于能量到达的随机性, 保障通信的可靠性是能量收集 (EH) 无线系统中的一个具有挑战性的课题<sup>[6]</sup>。根据能量收集的状态, 优化无线传输中的功率控制

能提高通信的可靠性。

最优的功率控制策略受基带处理功率的影响。另一方面由于 RRU 和 BBU 之间光纤部署的成本高、难度大, 可能会采用无线前传网。采用无线前传网会导致前传速率受限, 并带来更大的前传功率开销, 因而需要灵活的基带功能分割。此时, 基带功能分割方案不再是固定的, 多种可选方案都可能基于当前的能量状态而被



灵活地采用,因而 RRU 的处理功率也不再是固定的,此时需要联合优化基带功能分割和传输功率控制。

## 1 基带功能分割

基带功能分割旨在研究基带功能如何在 RRU 和 BBU 之间放置。基带功能包括串并行转换、快速傅里叶变换 (FFT)/逆向快速傅里叶变换 (IFFT)、资源映射/资源解映射、前向纠错码 (FEC)、媒体接入控制 (MAC) 等功能。目前有多种可选的基带功能分割方案,图 1 给出了下行基带功能分割的几种可行的基带功能分割方案<sup>[4][7]</sup>,对于每个方案,竖线左边的基带功能放置在 BBU,竖线右边的基带功能放置在 RRU。文献[8]中作者分析了不同类型 LTE 基站,包括宏基站、微基站、微微基站等的能耗模型,分析了各个基带功能模块的处理复杂度,为量化分析基带功能分割的能耗提供依据。

根据文献[7]对 2 天线、20 MHz 的 LTE 系统前传速率需求的分析,以及文献[8]中的计算模型,各基带功能分割方案的前传速率需求和 RRU 计算复杂度如表 1 所示。

从表 1 可以看出:将更多的基带功能放置在 RRU,前传网的带宽需求会降低,但会增加 RRU 的复杂度(及对应的能耗)。因此,基带功能分割可以实现前传网带宽需求和 RRU 复杂度及处理能耗之间的折中。

通过软件定义基带功能,未来 RRU 和 BBU 可选择使用通用处理平台实现。通过配置 RRU 和 BBU 运行的基带模块,可以调整 RRU 和 BBU 之间的基带功能分割方案,进而能根据前传链路状态、RRU 的可用能量、业务量和业务类型等灵活地选择基带功能分割方案<sup>[9]</sup>。同时,通过前传链路汇聚亦可获得前传网传输资源的统计复用增益<sup>[10]</sup>。

## 2 可再生能源供电下的无线传输功率控制

由于可再生能源到达的随机性,并且由于电池容量通常受限,优化能量收集无线系统中能量的使用显得十分重要。在没有处理能量开销时,即只考虑发射功率,对于给定的能量和信道衰落区间,如果传输速率关于传输功率的函数满足非负、严格凹且单调递增,最优的传输策略为能量在信道衰落区间内平均分配。然而在考虑处理能耗时,为减少处理能耗,最优的传输策略不再是在同一个信道衰落区间内功率平均分配,传输时间可能小于信道衰落区间的时长,传输呈突发性,对应于一种“注胶”功率分配策略<sup>[11]</sup>。

对于有多个能量到达且具有信道衰落的场景,由于能量到达的随机性,可再生能源会在不同的信道衰落区间进行分配。文献[12]中,作者分析了能量收集中具有信道衰落的场

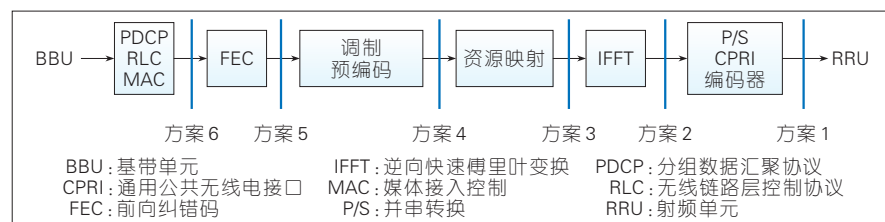
景,提出了一种“定向注水”的功率控制策略,即对能量的“注水”只能流向能量到达之后的时刻,流动的能量大小则受电池容量的限制。文献[13]针对具有处理能耗的能量收集传输链路,提出“定向注胶”的功率分配策略,其原理如图 2 所示。图中  $\gamma_i$  为信道衰落区间  $i$  内的信道增益,其中  $E_i$  为信道衰落区间起始阶段到达的可再生能源。能量可以从区间 1 流向区间 2 和区间 3,不能从区间 4 流向区间 3。由于处理能耗的存在,在区间 2 和区间 4,传输具有突发性,即每个区间只有一部分时段在传输。由于电池容量的限制,从区间 1 和区间 2 流向区间 3 的能量受限,因而区间 3 的注胶水平低于区间 1 和区间 2。

对于能量收集通信系统,如果采用固定的基带功能分割方案,系统地处理能耗是固定的,那么定向注胶的功率分配策略是最优的。对于灵活调整基带功能分割方案的场景,基带功能分割方案不再是固定的,多种可选方案都可能基于当前的能量状态而被灵活地采用,因而 RRU 的处理复杂度和功率也不再是固定的(如表 1 所示),定向注胶策略不再适用。此时需要综合考虑前传链路的信道特性和可再生能源的到达特性,优化基带功能分割方案的选择和功率控制策略。

## 3 单 RRU 基带功能分割方案的选择和功率控制

### 3.1 离线最优策略

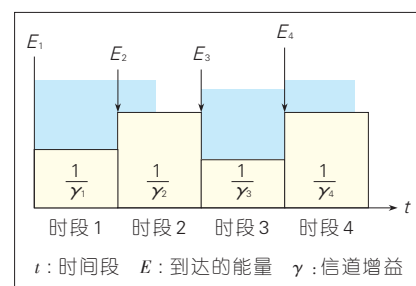
考虑如图 3 中 C-RAN 的下行传



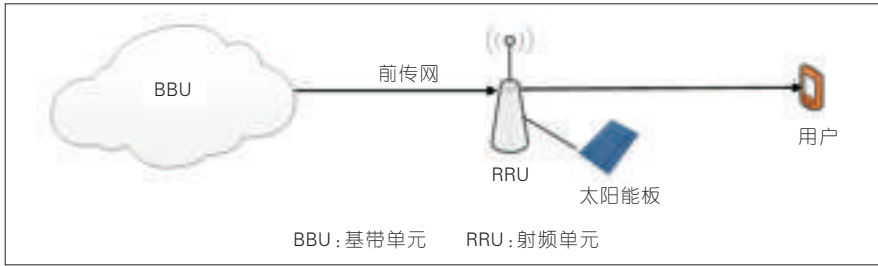
▲ 图 1 下行基带功能分割示意图

▼ 表 1 基带功能分割方案前传带宽需求和计算复杂度

内容	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
前传带宽/(Mbit/s)	2 458	1 966	1 074	933	173	152
计算复杂度/(GOP/s)	240	240	380	420	440	470



▲ 图 2 可再生能源“定向注胶”原理示意图



▲图3 可再生能源供电的下行云接入网系统示意图

输,其中RRU使用可再生能源供电。RRU可以从 $N$ 种基带功能分割方案中选择一种进行配置。对于基带功能分割方案 $j$ ,其基带处理功率记为 $\varepsilon_j$ ,前传带宽需求记为 $R_j$ 。目标为最大化吞吐量,因而假设BBU随时有数据需要传输给用户。本文中,我们将研究在满足平均前传速率 $D$ 的约束下,如何选择基带功能分割方案和功率控制策略,包括采用每个基带功能分割的时间和相应的传输功率,以最大化传输吞吐量。

考虑 $0 \sim T$ 时间段内的吞吐量最大化问题。如图4所示,能量在时刻 $t_1, t_2, \dots, t_M$ 到达,其中 $M$ 是到达的能量的个数。在时刻 $t_i$ ,到达的能量大小记为 $E_i$ ,到达的能量存储到一个容量为 $E_{\max}$ 的电池中。假设每次到达的能量满足 $E_i \leq E_{\max}$ ,即每次到达的能量不超过电池容量,否则到达的能量无法全部存储到电池中。根据能量的到达,将整个区间分为 $M$ 个时段,第 $i$ 个时段是指从 $t_i$ 到 $t_{i+1}$ 这个时间段,其长度为 $L_i = t_{i+1} - t_i$ ,特别地,记 $L_M = T - t_M$ 。

在每个时段内,RRU可以选择一个或者多个基带功能分割方案。在时段 $i$ ,选择基带功能分割方案 $j$ 的

时长为 $\theta_{ij}$ ,相应的传输功率为 $p_{ij}$ , $\theta_{ij} = 0$ 意味着在时段 $i$ 方案 $j$ 没被选择。当没有方案被选择时,RRU没有数据传输,也没有能量消耗。由于各个方案被选择的时间没有重叠,在一个时段内,所有方案被选择的时长总和不能超过时段的长度,因而有 $\sum_{j=1}^N \theta_{ij} \leq L_i$ 。

假设信道增益为一个常数 $\gamma$ ,可以理解信道增益在功能分割时间尺度上的平均。根据香农定理,在时段 $i$ 选择方案 $j$ 传输给用户的数据量为 $\theta_{ij} \log(1 + \gamma p_{ij})$  bit/s,其消耗的能量为 $\theta_{ij}(p_{ij} + \varepsilon_j)$ ,其中 $\alpha_{ij} = \theta_{ij} p_{ij}$ 是无线传输消耗的能量, $\theta_{ij} \varepsilon_j$ 是基带处理消耗的能量。

由于RRU只能使用已经到达的能量,因而基带功能分割方案选择和功率控制需要满足以下能量使用的“因果性”约束:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} + \theta_{ij} \varepsilon_j) \leq \sum_{i=1}^m E_i. \quad (1)$$

到达的能量要先存储在电池中才能使用,在任意时刻电池中存储的能量不能超过电池容量。对于时段 $m$ ,在能量到达时刻 $t_m$ 电池中的能量

最多,因而需要满足:

$$\sum_{i=1}^m E_i - \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} + \theta_{ij} \varepsilon_j) \leq E_{\max}. \quad (2)$$

最大化吞吐量的相关问题可以建模为:

$$\begin{aligned} \max_{\theta_{ij}, \alpha_{ij}} & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \theta_{ij} \log \left( 1 + \gamma \frac{\alpha_{ij}}{\theta_{ij}} \right) \\ \text{s.t.} & \frac{1}{T} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \theta_{ij} R_j \leq D \\ & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} + \theta_{ij} \varepsilon_j) \leq \sum_{i=1}^m E_i \\ & \sum_{i=1}^{m+1} E_i - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} + \theta_{ij} \varepsilon_j) \leq E_{\max} \\ & \sum_{j=1}^N \theta_{ij} \leq L_i \\ & \theta_{ij} \geq 0, \alpha_{ij} \geq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

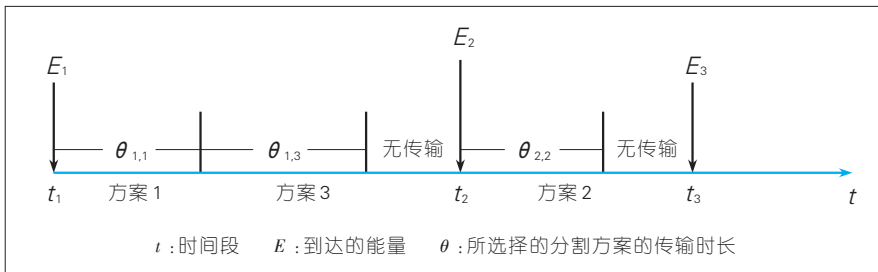
第1个约束是平均前传速率约束,第2个和第3个约束是可用能量和电池容量的约束,第4个约束是每个时段总传输时长的约束。该优化方程的目标函数是凸的,约束是线性的,因而是一个凸优化问题。使用拉格朗日乘子法,可发现最优的基带功能分割方案选择和功率控制具有以下性质。

推论1:在每个时段,最多选择2个基带功能分割方案,且被选择方案的传输功率相同。

该推论的详细证明可以参考文献[14]。

### 3.2 单个能量到达的离线最优策略

根据推论1,每个时段内最多只有2个基带功能分割方案被选择。为了设计有效的在线算法,有必要探讨只有1个时段、2个可选基带功能分割方案的特殊场景。在获得只有2个可选基带功能分割方案时的功率控制策略后,可以将其结果拓展到可选基带功能分割方案数 $N > 2$ 的场景。计算选择任意2种或1种基带功能分割方案时的吞吐量,从中选择吞吐量最大时的组合,即可获得有 $N$ 种可选基带功能分割方案时的功率控制策略。不失一般性,用 $R_1$ 和 $R_2$



▲图4 能量到达和功率控制示意图

表示2种基带功能分割方案的前传带宽需求,用 $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_2$ 表示相应的基带处理功率,且 $R_1 > R_2$ ,  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ 。为了便于表示,用 $\theta_1$ 和 $p_1$ 表示基带功能分割方案1被采用的时长和相应的传输功率, $\theta_2$ 和 $p_2$ 表示基带功能分割方案2被采用的时长和相应的传输功率。在时段内可用的能量为 $E$ ,时段持续时间为 $L$ 。

根据平均前传速率约束 $D$ 与 $R_1$ 和 $R_2$ 之间的关系,下面将分3种情况进行讨论。这里只给出结论,详细的推导过程参见文献[14]。

### 3.2.1 情况1: $D \geq R_1$

当 $D \geq R_1$ ,平均前传速率约束一直能被满足。由于基带功能分割方案1具有更小的基带处理功率,因而只选择基带功能分割方案1。如果没有时段长度限制,最大化吞吐量的问题可以表示为:

$$\max_{p_1} \frac{E}{p_1 + \varepsilon_1} \log(1 + \gamma p_1), \quad (4)$$

最优的传输功率 $v_1^*$ 可以通过解以下方程获得:

$$(1 + \gamma v_1^*) \log(1 + \gamma v_1^*) - \gamma v_1^* = \gamma \varepsilon_1. \quad (5)$$

如果 $E < (v_1^* + \varepsilon_1)L$ ,则最优的传输功率为 $v_1^*$ ,相应的传输时间为 $\frac{E}{v_1^* + \varepsilon_1}$ ;如果 $E \geq (v_1^* + \varepsilon_1)L$ ,则传输时间为 $L$ ,传输功率为 $\frac{E}{L} - \varepsilon_1$ 。

### 3.2.2 情况2: $R_2 < D < R_1$

如果 $E < \frac{DL(v_1^* + \varepsilon_1)}{R_1}$ ,能量是最主要的约束,因而只选择基带功能分割方案1,传输功率为 $v_1^*$ ,此时最优的传输策略为:

$$\theta_1 = \frac{E}{v_1^* + \varepsilon_1}, p_1 = v_1^*, \theta_2 = 0, p_2 = 0. \quad (6)$$

在无传输时长约束时,如果2种分割方案都被选择,则最优传输功率

$v_3^*$ 满足:

$$\gamma \left( v_3^* + \frac{R_1 \varepsilon_2 - R_2 \varepsilon_1}{R_1 - R_2} \right) - (1 + \gamma v_3^*) \log(1 + \gamma v_3^*) = 0. \quad (7)$$

$$\text{当 } \frac{(v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1} \leq E \leq L v_3^* +$$

$$\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)DL + (R_1 \varepsilon_2 - R_2 \varepsilon_1)L}{R_1 - R_2} \text{ 时,最优的}$$

功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{(v_3^* + \varepsilon_2)DL - R_2 E}{R_1(v_3^* + \varepsilon_2) - R_2(v_3^* + \varepsilon_1)}, p_1 = v_3^*,$$

$$\theta_2 = \frac{R_1 E - (v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1(v_3^* + \varepsilon_2) - R_2(v_3^* + \varepsilon_1)}, p_2 = v_3^*. \quad (8)$$

$$\text{当 } \frac{(v_1^* + \varepsilon_1)DL}{R_1} \leq E < \frac{(v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1}$$

时,最优的功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{DL}{R_1}, p_1 = \frac{R_1 E}{DL} - \varepsilon_1, \theta_2 = 0. \quad (9)$$

$$\text{当 } E > L v_3^* + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)DL + (R_1 \varepsilon_2 - R_2 \varepsilon_1)L}{R_1 - R_2}$$

最优的功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{DL - R_2 L}{R_1 - R_2},$$

$$p_1 = \frac{E}{L} - \frac{D(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{R_1 - R_2} - \frac{R_1 \varepsilon_2 - R_2 \varepsilon_1}{R_1 - R_2},$$

$$\theta_2 = \frac{R_1 L - DL}{R_1 - R_2},$$

$$p_2 = \frac{E}{L} - \frac{D(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{R_1 - R_2} - \frac{R_1 \varepsilon_2 - R_2 \varepsilon_1}{R_1 - R_2}. \quad (10)$$

### 3.2.3 情况3: $D \leq R_2$

$$\text{当 } E < \frac{DL(v_1^* + \varepsilon_1)}{R_1}, \text{ 只有功能分割}$$

方案1被采用,功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{E}{v_1^* + \varepsilon_1}, p_1 = v_1^*, \theta_2 = 0, p_2 = 0. \quad (11)$$

$$\text{当 } \frac{(v_1^* + \varepsilon_1)DL}{R_1} \leq E < \frac{(v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1},$$

最优的功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{DL}{R_1}, p_1 = \frac{R_1 E}{DL} - \varepsilon_1, \theta_2 = 0. \quad (12)$$

$$\text{当 } \frac{(v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1} < E \leq \frac{(v_3^* + \varepsilon_2)DL}{R_2},$$

最优的功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{(v_3^* + \varepsilon_2)DL - R_2 E}{R_1(v_3^* + \varepsilon_2) - R_2(v_3^* + \varepsilon_1)}, p_1 = v_3^*,$$

$$\theta_2 = \frac{R_1 E - (v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1(v_3^* + \varepsilon_2) - R_2(v_3^* + \varepsilon_1)}, p_2 = v_3^*. \quad (13)$$

$$\text{当 } E > \frac{(v_3^* + \varepsilon_2)DL}{R_2}, \text{ 最优的功率控}$$

制策略为:

$$\theta_1 = 0, p_1 = 0, \theta_2 = \frac{DL}{R_2}, p_2 = \frac{ER_2}{DL} - \varepsilon_2. \quad (14)$$

### 3.3 启发式在线策略

基于对只有一个能量到达时的特殊情况的推导,可以制定一种启发式的在线策略。在能量到达的时刻 $t_i$ ,根据电池中存储的能量 $e_i$ 制定未来一段时间内的传输方案。由于能量到达的随机性,RRU无法预知下一个能量何时到达。设置该期望时段长度为 $L$ ,最大化 $t_i$ 到 $t_i + L$ 这段时间内的吞吐量,最优的传输策略则通过对只有一个能量到达时的特殊情况的推导获得。时段长度 $L$ 需要根据能量到达的统计特性而制定,例如可以将 $L$ 设置为能量到达间隔的期望。在制定传输策略后,RRU根据制定的策略传输,直到下一个能量到达,或者电池的能量耗尽。当有新的能量在 $t_{i+1}$ 时刻到达时,电池中的能量更新为 $e_{i+1}$ ,此时重新制定传输策略并进行传输。

### 3.4 数值结果

本节我们将通过数值仿真研究平均前传网带宽约束对吞吐量的影响。考虑一个下行的C-RAN系统,RRU使用能量收集技术供电,空口带宽为20 MHz。考虑3个可选的基带功能分割方案,相应的前传带宽需求和基带处理功率为 $R_1=980$  Mbit/s,  $R_2=460$  Mbit/s,  $R_3=86$  Mbit/s,  $\varepsilon_1=1$  W,  $\varepsilon_2=2.5$  W,  $\varepsilon_3=4$  W。信道增益为



$\gamma = 0.025 \text{ W}$ 。

首先考虑离线的吞吐量最大化问题。以具有3个时段的情况为例,时段长度分别为[10, 16, 12] s,每个时段开始时到达的能量为[480, 360, 160] J,电池的容量为800 J。图5给出了吞吐量随平均前传速率变化的关系。从图中可以看出:相比固定一种基带功能分割方案,灵活的基带功能分割在不同的平均前传速率约束下都能获得最大的吞吐量。

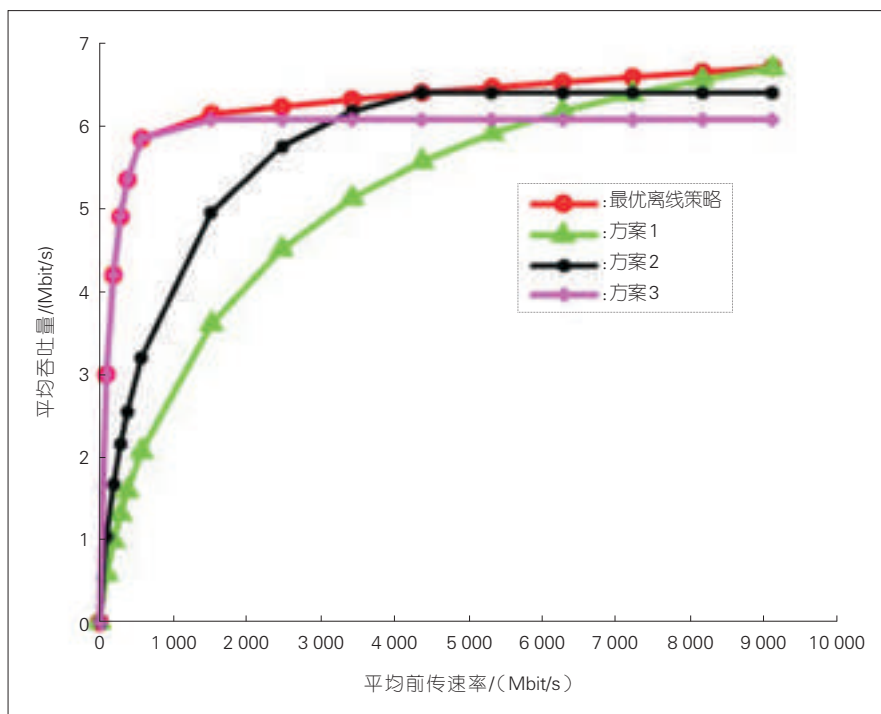
接着考虑在线吞吐量最大化问题。假设能量到达率为 $\lambda_e = 1/20 \text{ s}$ ,每次到达的能量在0~400 J之间均匀分布。考虑到0~200 s内的吞吐量最大化问题,图6给出了启发式在线策略的性能。从图中可以看出:启发式在线策略与最优的离线策略有着相近的性能。将启发式在线策略用于固定基带功能分割方案时的场景作为基准,可以发现:采用灵活的基带功能分割能带来可观的吞吐量增益。

#### 4 结束语

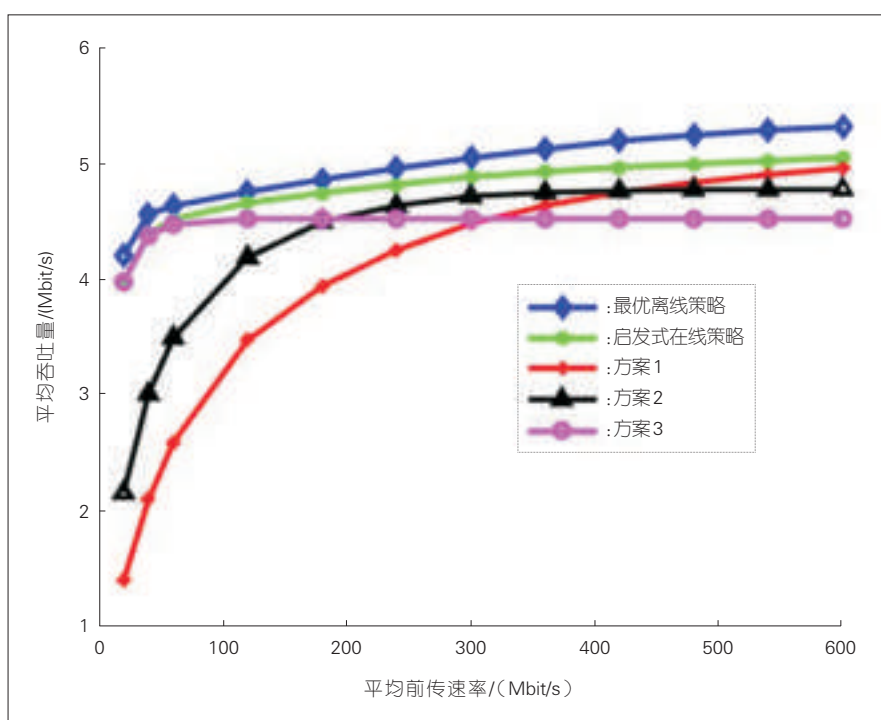
本文针对C-RAN系统中可再生能源供电的RRU,联合优化基带功能分割方案的选择和功率控制。离线吞吐量最大化问题可以建模为一个凸优化问题。通过拉格朗日乘子法发现了最优解的结构,即在每个时段内RRU最多选择2个基带功能分割方案,且每个基带功能分割方案时的传输功率相同。进一步推导了只有一个能量到达时的最优功率控制策略,并基于此提出了一种启发式在线策略。数值结果表明:相比于固定的基带功能分割方案,灵活的基带功能分割能显著提升系统吞吐量。

本工作尚存在一些待研究的问题,进而引出一些未来工作。

(1)最优在线策略。研究最优的在线策略可以进一步提高系统的吞吐量,并有助于进一步评估启发式的在线策略的性能。可以将在线问题建模为一个马尔科夫决策过程,获得



▲ 图5 最优离线策略吞吐量与平均前传速率之间的关系



▲ 图6 启发式在线策略吞吐量与平均前传速率之间的关系

最优的基带功能分割方案选择和功率控制。

(2)多RRU和多用户的场景。当系统中存在多个RRU和多个用户

时,不同RRU的能量到达特性以及前传链路状态可能不同,用户速率需求也存在差异。同时可进一步研究用户调度以及RRU之间的协作。



(3) 能量到达和信道衰落存在不同的时间尺度。在实际系统中, 能量到达率的变化往往比信道衰落的时间尺度更大。同时在信道衰落的尺度做基带功能分割的重配置亦会有较大开销。可以考虑在能量到达的时间尺度下选择基带功能分割方案, 在信道衰落的尺度下进行传输功率控制。

#### 参考文献

- [1] China Mobile. C-RAN: The Road towards Green RAN White Paper[R]. 2013
- [2] CHIH-LIN I, HUANG J R, DUAN R, et al. Recent Progress on C-RAN Centralization and Cloudification [J]. IEEE Access, 2014, 2: 1030–1039. DOI:10.1109/access.2014.2351411
- [3] CPRI. CPRI Specification V6.0. Common Public Radio Interface (CPRI) [R]. Interface Specification, 2013
- [4] DOTSCH U, DOLL M, MAYER H P, et al. Quantitative Analysis of Split Base Station Processing and Determination of Advantageous Architectures for LTE [J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 18(1): 105–128. DOI:10.1002/bltj.21595
- [5] GONG J, ZHOU S, NJU Z S. Optimal Power Allocation for Energy Harvesting and Power Grid Coexisting Wireless Communication Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(7): 3040–3049. DOI:10.1109/tcomm.2013.05301313.120705
- [6] TUTUNCUOGLU K, YENER A. Optimum Transmission Policies for Battery Limited Energy Harvesting Nodes [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1180–1189. DOI:10.1109/twc.2012.012412.110805
- [7] Small Cell Forum. Small Cell Virtualization: Functional Splits and Use Cases[R]. 2016
- [8] DESSET C, DEBAILLIE B, GIANNINI V, et al. Flexible Power Modeling of LTE Base Stations[C]//2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). USA: IEEE, 2012: 2858–2862. DOI:10.1109/WCNC.2012.6214289
- [9] LIU J C, XU S G, ZHOU S, et al. Redesigning Fronthaul for Next-Generation Networks: Beyond Baseband Samples and Point-to-Point Links [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(5): 90–97. DOI: 10.1109/mwc.2015.7306542
- [10] WANG L M, ZHOU S. On the Fronthaul Statistical Multiplexing Gain [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(5): 1099–1102. DOI:10.1109/lcomm.2017.2653120
- [11] YOUSSEF-MASSAAD P, ZHENG L Z, MEDARD M. Bursty Transmission and Glue Pouring: On Wireless Channels with Overhead Costs [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 5188–5194. DOI:10.1109/twc.2008.070939
- [12] OZEL O, TUTUNCUOGLU K, YANG J, et al. Transmission with Energy Harvesting Nodes in Fading Wireless Channels: Optimal Policies [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1732–1743. DOI:10.1109/jsac.2011.110921
- [13] ORHAN O, GUNDUZ D, ERKIP E. Energy Harvesting Broadband Communication Systems with Processing Energy Cost [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(11): 6095–6107. DOI:10.1109/twc.2014.2328600
- [14] WANG L M, ZHOU S. Flexible Functional Split in C-RAN with Renewable Energy Powered Remote Radio Units[C]//2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). USA: IEEE, 2018: 1–6. DOI: 10.1109/ICCWorkshops.2018.8403571

#### 作者简介



**王刘猛**, 清华大学电子系在读博士研究生; 主要研究方向为绿色通信与网络、云接入网等。



**周盛**, 清华大学电子系副教授; 主要研究方向为绿色通信与网络、移动边缘计算、车联网等; 先后主持 2 项国家自然科学基金项目, 并参加多项国家自然科学基金和科技部项目; 获得 2017 年 IEEE 通信学会亚太区杰出青年学者奖; 已发表论文 140 余篇。

# 无线数据与能量协同传输中的游程限制编码设计

## Run-Length-Limited Coding Design for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

胡杰/HU Jie<sup>1</sup>

李梦媛/LI Mengyuan<sup>1</sup>

杨鲲/YANG Kun<sup>1, 2</sup>

(1. 电子科技大学, 四川 成都, 611731;  
2. 埃塞克斯大学, 英国 克切斯特,  
CO43SQ)

(1. University of Electronic Science and  
Technology of China, Chengdu 611731,  
China;

2. University of Essex, Colchester CO4  
3SQ, United Kingdom)

在即将到来的物联网时代, 无线通信网络需要满足未来大规模部署的低功耗机器类通信设备需求。由于其远场传输特性( $\geq 2$  m), 基于无线射频信号的无线能量传输技术(WPT)可以用于实现对低功耗通信设备的远程充电, 以提升该类设备的使用寿命。但无线射频能量传输必然会与同样工作在射频频段的数据通信竞争有限的无线空口资源。如何利用有限的无线空口资源满足用户的数据通信和充电需求值得人们进行一系列深入研究。由此衍生出了广受关注的热门技术——无线数能同传(SWIPT)<sup>[1]</sup>。

然而当前对于SWIPT的研究只局限在物理层收发机设计<sup>[2]</sup>、接入控

收稿日期: 2018-07-15

网络出版日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61601097, U1705263, 61620106011)、中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2016Z011)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0018-006

**摘要:** 从信息论角度出发, 在离散对称信道下, 研究了游程限制(RLL)编码的无线数据与能量协同传输(简称为无线数能同传)(SWIPT)性能: 在满足每比特的最低携能要求下, 通过优化游程限制编码的码字发出概率, 最大化信源和信宿之间的平均互信息量。数值结果揭示无线数据与无线能量传输(WPT)之间的权衡关系, 并提供游程限制编码在不同信道条件下的无线数能传输性能。

**关键词:** 射频 WPT; SWIPT; RLL; 离散对称信道

**Abstract:** From the information theoretical aspect, the simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) performance of the run-length-limited (RLL) code is studied. The mutual information between the information source and destination is maximised by optimising the transmit probability of the codewords generated by the RLL encoder, which is subject to the minimum requirement of the energy per bit delivered to the receiver. Numerical results reveal the inherent tradeoff between the wireless information transfer and wireless power transfer (WPT) performance of the RLL code, while characterising its SWIPT performance in different channel conditions.

**Keywords:** radio frequency-based WPT; SWIPT; RLL; symmetric channel

制层资源分配<sup>[3]</sup>和协议设计<sup>[4-5]</sup>, 以及数能基站部署<sup>[6]</sup>, 缺乏从信息论角度对SWIPT本质地挖掘。Varshney在文献[7]中首次研究了在不同信道条件下, 信源与信宿之间的最大互信息量和能量接收要求之间的权衡。他们的工作证明: 调整编码器产生的码字结构可以影响SWIPT的性能, 这奠定了从编码角度实现数能传输控制的理论基础。在此基础上, Tandon等研究者在文献[8]中对码字结构进行优化, 在满足接收机的实时能量需求的同时可以最大化对称信道的平均互信息量。

在文献[7]和[8]中, 作者均是对信源发出的二进制比特的发送概率进行优化以实现最优的数能传输性能, 却忽略了具体的编码方案。通常情况下, 传统的信源编码器产生等概率的二进制比特, 从而最大化码字的信息传输能力。但是单一的码字结构极大地制约了码字的能量传输能力, 并不能满足接收机多样化的能量需求。如下的编码器可以实现对码字结构的灵活调整<sup>[9]</sup>:

(1) 补偿性能量编码。不携带任何信息的伪比特可以直接链接在信息比特之后, 使得生成的码字具备能

满足某一具体能量需求的结构。这种编码器的编解码方案具备最低的复杂度;但不携带任何信息的伪比特只起到能量补充的作用,会显著降低信息传输的有效性。

(2)逆信源编码。典型的信源编码器将不等概率发送的原始信源消息编成0/1比特等概率出现的二进制比特序列。

相反,逆信源编码可将等概率发出的原始信源消息编成0/1比特非等概率出现的二进制比特序列,从而满足序列的无线能量传输需求。但是需要考虑到编码器和解码器之间的异步情形极大地影响接收端解码的有效性。

(3)约束编码。一些约束编码技术具备改变码字结构的自由度,可以实现对无线能量传输的灵活控制。由于该种编码技术并不引入不携带信息的伪比特,因此其信息传输的有效性并不会受到影响。另外,高效的符号级别网格算法可以用于约束编码的解码过程,使得其可以在数能编码领域进行广泛应用。典型的约束编码技术包括游程限制编码以及一元编码。

游程限制编码是一种典型的约束编码。Fouladgar 等研究者在文献[10]中研究了游程限制编码作为能量载体对电池充电状态的影响;但这篇文献并没有从信息论角度研究每比特携带能量和每比特携带信息之间的制约关系。

与上述已有研究不同,本文的创新点主要在如下方面:

(1)提出了一种实际的基于游程限制编码的SWIPT收发机结构,在对称信道下,从信息论角度对其数能传输性能进行分析;

(2)发现游程限制编码的最优码字发送概率,在满足接收机能量获取需求的前提下,最大化对称信道的平均互信息量;

(3)数值结果解释了游程限制编码的可达信息传输速率以及能量传

输能力之间的权衡关系。

## 1 SWIPT 系统模型

图1描述了单用户SWIPT系统的完整收发机结构。其中数能发射机包含以下模块:

(1)信源。信源可以产生接收机请求的原始消息,也可以看作是传统的信源编码器和前向纠错编码器的混合物。

(2)数能编码器。数能编码器可将信源产生的原始消息进行进一步处理,产生二进制比特序列,从而满足接收机的通信和充电请求。该系统采用游程限制编码作为数能编码器。游程的定义为在一个比特序列中某一个符号连续出现的长度。在通常情况下,游程限制编码分为0型和1型。一个0型 $(d,k)$ 游程限制编码对于生成码字具备如下约束条件:首先,在2个连续比特1之间,比特0的游程长度至少为 $d$ ;其次,在2个连续比特1之间,比特0的游程长度最多为 $k$ 。一个1型 $(d,k)$ 游程限制编码对于比特1的游程长度也相应限制在 $d$ 和 $k$ 之间。控制不同游程长度出现的概率即可实现对码字结构的调整。

(3)数字调制器。数字调制器可将二进制比特序列调制到载波信号的幅度和相位上。通过幅度调制的方式,不同组合的二进制比特产生的调制符号会携带不同的能量。因此在调制方式给定的情况下,调整数能编码器产生的码字结构会影响WPT的性能,但需要对码字结构和调制方案进行联合设计<sup>[11]</sup>。为了将设计重点放在码字结构上,在本文研究的系统中采用了启闭键控调制。因此比特1可调制为射频信号 $A\sin 2\pi ft$ ,其

中 $A$ 和 $f$ 分别为射频信号的幅度和频率。该信号携带的能量则可以定义为1个基本能量单元。在比特0的符号周期内,发射机不会发射任何射频信号,因此可以认为比特0携带的能量为0。

如图1所示,为了实现数据与能量的接收,接收机采用了如下模块:

(1)数字解调器,可将射频信号携带的基带符号进行解调。针对启闭键控调制,接收机采用能量检测的解调方式。如果接收功率低于检测门限,则解调器将当前符号判断为比特0;若接收功率高于检测门限,则解调器将当前符号判断为比特1。

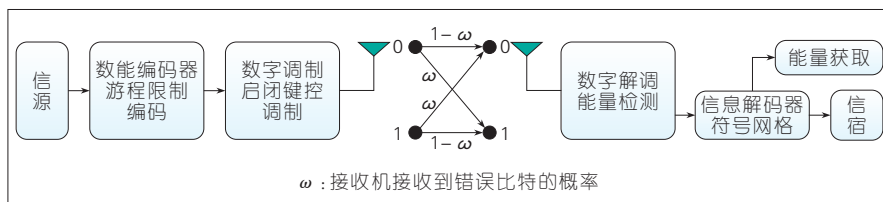
(2)信息解码器,将接收到的码字进行解码以恢复原始信息。通常情况下对于游程限制编码可采用符号级别的网格算法进行解码<sup>[12]</sup>。该算法可以避免出现解码错误扩散。

(3)信宿,最终接收到解码后的信息,可以进行信道和信源解码。

(4)理想数能接收机架构,即数字解调器通过“观察”的方式完成解调工作。进入数字解调器的射频信号能量不会产生任何损失,还可以完全用于能量获取。

发射机和接收机之间的无线信道对射频信号传输带来的损耗影响可以用图1中的对称信道来表示:

(1)当比特0进行传输时,发射机在当前符号周期内不发射任何射频信号。接收机天线只能接收到随机的噪声和干扰信号。若当前的随机噪声和干扰信号的总功率低于能量检测门限,则比特0可以被接收机成功恢复,概率为 $(1-\omega)$ 。由于此时噪声和干扰信号的总功率过低,不足以激活能量获取电路,因此接收机不



▲图1 无线数能同传系统



能获得任何能量<sup>[11]</sup>。若当前的随机噪声和干扰信号的功率高于能量检测门限,则接收端判决的接收比特符号为1,概率为 $\omega$ 。这种情况下,噪声和干扰功率可以激活能量获取电路,使得接收机能够成功获取1个单位的射频能量。

(2)当比特1进行传输时,发射机在当前符号周期发射正弦载波信号。接收机接收到的信号是经过信道衰减的有用信号和噪声干扰的叠加信号。若总信号功率高于能量检测门限,则比特1可以被接收机成功恢复,概率为 $(1-\omega)$ 。此时叠加信号总功率足以激活能量获取电路,接收机可以获得1个单位的射频能量。若随机噪声和干扰信号的功率较弱,且有用信号经过信道大幅度衰减,造成接收信号功率低于能量检测门限,则接收端判决的接受比特符号为0,概率为 $\omega$ 。这种情况下,叠加信号接收到的能量不能激活能量获取结果,接收机不能获得任何能量。

## 2 游程限制编码的数能传输性能

本节以0型游程限制编码为例对其数能传输性能进行分析。0型编码和1型编码在数据传输性能上完全一致,但在能量传输性能上则存在着差异。

### 2.1 游程限制编码的状态机

图2给出了0型 $(d,k)$ 游程限制编码的状态机结构,其中的每一个状态描述的是对应的比特0构成的一个

游程的长度。当状态机处于状态 $j(j \geq d)$ 时,当前比特0构成的游程长度为 $j$ ,此时若信源发出一个比特0,则状态机从状态 $j$ 转移到状态 $(j+1)$ ,转移概率为 $q_j$ ,这个概率也是当前状态下信源发出比特0的概率。若此时信源发出比特1,则当前游程结束,状态机从状态 $j$ 转移到状态0,转移概率为 $(1-q_j)$ ,这个概率也是当前状态下信源发出比特1的概率。比特0构成的一个单一游程的最大长度为 $k$ ,所以当状态机处于状态 $k$ 时,信源以 $q_k=0$ 的概率发射比特0,以1的概率发射比特1,结束当前游程。由于在0型 $(d,k)$ 游程限制编码中,游程的最短长度为 $d$ ,因此当状态机处于状态 $j(j < d)$ 时,信源会以概率 $q_j=1$ 发射比特0,继续增加当前游程的长度。为了满足游程限制,此时信源发射比特1的概率为 $1-q_j=0$ 。该游程编码的状态转移概率可以表示为式(1)中 $(k+1) \times (k+1)$ 矩阵 $Q$ :

$$Q = \begin{bmatrix} 1-q_0 & q_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1-q_1 & q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1-q_{k-1} & 0 & 0 & \cdots & q_{k-1} \\ 1-q_k & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

状态机的稳态概率分布可以表示为行向量 $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \cdots, \pi_k\}$ ,该稳态概率分布可以通过求解下述线性方程组获得:

$$\begin{cases} \pi \times Q = \pi \\ \pi \times I_{(k+1)} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $I_{(k+1)}$ 表示 $(k+1) \times 1$ 的全1列向量。稳态概率分布 $\pi$ 和状态转移概

率矩阵 $Q$ 均将用于计算游程限制编码的数能传输性能。

### 2.2 对称信道下的数据传输性能

假设信源发出长度为 $N$ 的比特序列 $X_N = \{X_1, X_2, \cdots, X_N\}$ 。在这个序列中各个比特符号之间的相关性需要满足上述0型 $(d,k)$ 游程限制编码状态机的状态转移特性,因此该序列中的比特符号可以映射为相应的状态机状态序列 $S_N = \{S_1, S_2, \cdots, S_N\}$ 。比如当信源产生长度为7的比特序列 $X_7 = \{1, 0, 0, 1, 0, 0, 0\}$ 时,对应的状态序列为 $S_7 = \{0, 1, 2, 0, 1, 2, 3\}$ 。信源(发射机)可用符号 $x$ 表示,信宿(接收机)可用符号 $y$ 表示。当信源 $x$ 发出 $N$ 比特序列 $X_N = \{X_1, X_2, \cdots, X_N\}$ 时,信宿 $y$ 接收到的比特序列为 $Y_N = \{Y_1, Y_2, \cdots, Y_N\}$ 。那么信源和信宿之间的平均互信息量可表示为:

$$I(x; y) = H(x) - H(x|y) \quad (3)$$

其中信源熵 $H(x)$ 可进一步表示为:

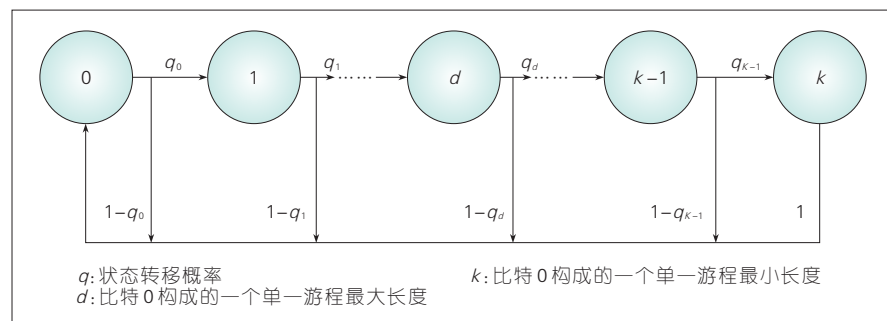
$$H(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{H(X_N)}{N} = H(S_2|S_1) \quad (4)$$

由于篇幅限制,省略了上述公式的详细推导过程,但在其中运用了状态机的马尔可夫特性以及信源极限熵的特性<sup>[13]</sup>。另外公式(3)中的条件熵 $H(x|y)$ 可进一步表示为:

$$\begin{aligned} H(x|y) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{H(X_N)}{N} \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{H(S_N|Y_N)}{N} \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \left[ H(S_1|Y_1, \cdots, Y_N) + \sum_{i=2}^N H(S_i|S_1, \cdots, S_{i-1}, Y_1, \cdots, Y_N) \right] \quad (5) \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{H(S_1|Y_1, \cdots, Y_N) + (N-1)H(S_2|S_1, Y_2)}{N} \\ &= H(S_2|S_1, Y_2) \end{aligned}$$

将信源熵 $H(x)$ 的表达式(4)和条件熵 $H(x|y)$ 的表达式(5)带入式(3)中可以得到,经过错误概率为 $\omega$ 的对称信道传输后,信源与信宿之间的平均互信息量 $I(x; y)$ :

$$\begin{aligned} I(x; y) &= H(S_2|S_1) - H(S_2|S_1, Y_2) = \\ &= H(Y_1, Y_2|S_1) - H(Y_1, Y_2|S_2, S_1) = \\ &= \sum_{i=d}^{k-1} \pi_i [H[(1-q_i)(1-2\omega) + \omega] - H(\omega)] \quad (6) \end{aligned}$$



▲图2 0型 $(d,k)$ 游程限制编码的状态机



其中对于所有的  $0 < x < 1$  有  $H(x) = -\log_2 x - \log_2(1-x)$ 。公式(6)的推导过程中利用了马尔可夫信源熵的标准推导方法<sup>[13]</sup>。平均互信息量  $I(x; y)$  是关于状态转移概率矩阵  $Q$  的函数。另外1型  $(d, k)$  游程限制编码在错误概率为  $\omega$  的对称信道中传输, 所能达到的平均互信息量也用公式(6)表达。

### 2.3 对称信道下的能量传输性能

根据第2节中对对称信道模型的描述, 只有当接收机接收到比特1时, 才能获得1个单位的能量。当接收机接收到比特0时, 不能采集到任何能量。因此接收机能够获取能量的多少取决于2个事件: (1) 游程限制编码器发出的码字结构, 即码字中携能比特1所占比例; (2) 对称信道对于码字传输的影响, 如比特1携带的能量有可能损失, 而本不携带能量的比特0由于突发噪声和干扰的影响也可以使得接收端获取额外1个单位的能量。游程限制编码的能量传输性能可以用接收机接收到携能比特1的概率来表示, 这个概率也可以定义为码字中平均每比特携带的能量。

当图2所示的0型  $(d, k)$  游程限制编码的状态机处于状态  $j$  时, 编码器有  $q_j$  的概率发出比特0, 因此在给定状态转移概率矩阵  $Q$ , 根据公式(2)求出稳态概率分布  $\pi$  的情况下, 编码器发出比特0的概率为  $p_0 = \sum_{j=1}^k \pi_j q_j$ 。

在对称信道的影响下, 当发射机发出的比特0在传输过程中被对称信道翻转, 接收机才可以获取1个单位的能量。因此在这种情况下, 接收机可以获得的平均每比特能量表示为

$$p_0 = \sum_{j=0}^k \pi_j q_j \omega。$$

同样, 编码器发出比特1的概率为  $p_1 = \sum_{j=0}^k \pi_j (1 - q_j)$ 。只有当发射机发射的比特1在传输过程中没有发生变化时, 接收机才可以获

取1个单位的能量。因此在这种情况下, 接收机可以获得的平均每比特能量表示为  $\sum_{j=0}^k \pi_j (1 - q_j) (1 - \omega)$ 。综上所述, 经过比特错误概率为  $\omega$  的对称信道传输, 0型  $(d, k)$  游程限制编码所能传递的平均每比特能量为:

$$E_0(y) = \sum_{j=0}^k \pi_j [q_j \omega + (1 - q_j) (1 - \omega)], \quad (7)$$

其中  $E_0(y)$  是关于状态转移概率矩阵  $Q$  的函数。同理, 经过比特错误概率为  $\omega$  的对称信道传输, 1型  $(d, k)$  游程限制编码所能传递的平均每比特能量为:

$$E_1(y) = \sum_{j=0}^k \pi_j [q_j (1 - \omega) + (1 - q_j) \omega]。 \quad (8)$$

### 2.4 码字优化设计

当在图1所示的数能收发系统中采用0型(或1型)  $(d, k)$  游程限制编码器时, 发送码字的优化设计问题可以建模为:

目标函数:  $\max_{\mathbf{Q}} I(\mathbf{x}; \mathbf{y})$ ,

约束条件:  $E_0(y) \geq E_{th}$  (或  $E_1(y) \geq E_{th}$ )。 (9)

该优化问题是通过寻找最优的编码器状态转移概率矩阵  $Q^*$ , 在保证公式(7)或(8)给出的平均每比特传递的能量  $E_0(y)$  (或  $E_1(y)$ ) 大于门限值  $E_{th}$  的前提下, 最大化由公式(6)给出的信源和信宿之间的平均互信息量  $I(\mathbf{x}; \mathbf{y})$ 。

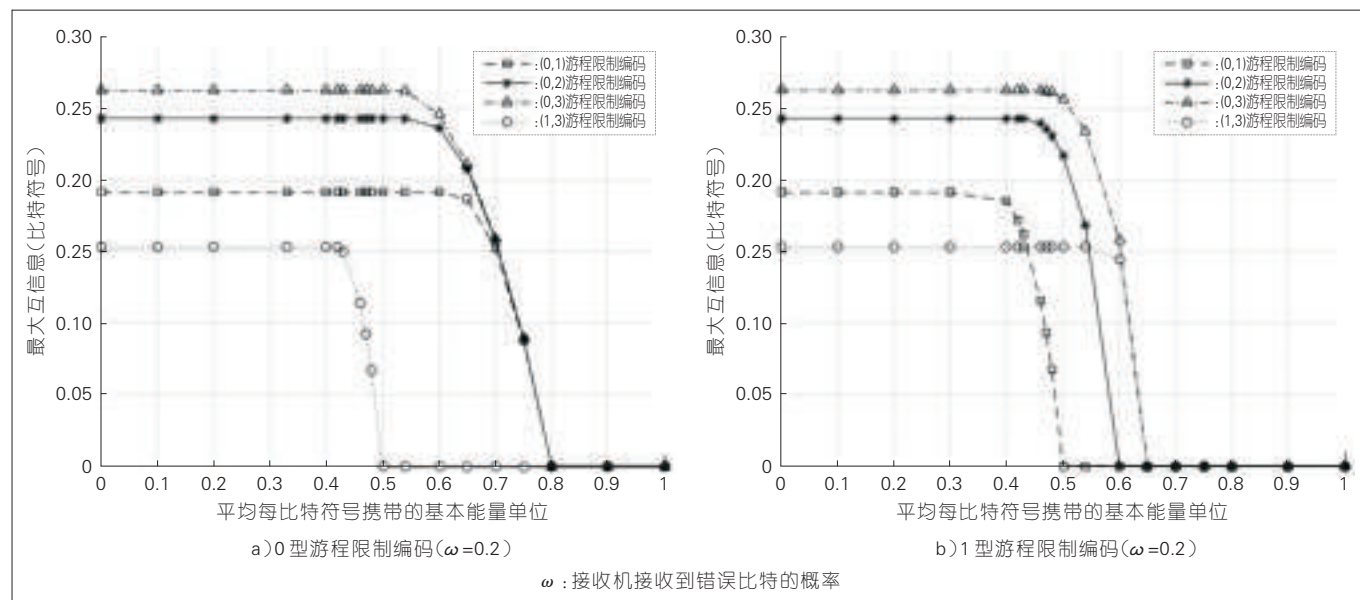
当采用的0型(或1型)  $(d, k)$  游程限制编码中参数  $d$  和  $k$  之间有较大差异时, 在计算  $I(\mathbf{x}; \mathbf{y})$ ,  $E_0(y)$  (或  $E_1(y)$ ) 的过程中需要采用数值方法完成对线性方程组(2)的求解, 已得到稳态概率分布  $\pi$ 。因此码字优化问题(9)不能在多项式时间内解决。本文采用穷举法来求得最优的编码器状态转移概率矩阵  $Q^*$ 。另外, 如果去掉优化问题(9)中的码字携能限制, 该问题退化为一个传统的平均互信息量最大化问题, 即采用游程限制编码器时的对称信道的信道容量求解

问题。可实现该信道容量的最优编码器状态转移概率矩阵则可以表示为  $Q^*$ 。

## 3 数值结果

图3给出在不同游程限制要求下, 码字的数能传输性能, 其中  $x$  轴表示接收端对于平均每比特符号携带能量的最低要求,  $y$  轴表示相对应的信源与信宿之间的平均互信息。经过对称信道传输, 接收机接收到错误比特的概率为  $\omega = 0.2$ 。如图3 a) 和 b) 所示, 不同参数的游程限制编码具备如下共同趋势: 将可达信道容量的游程限制编码状态转移矩阵  $Q^*$  带入公式(7) (或(8)), 可计算得到该种编码方式的能量传输性能  $E_0^*(y)$  (或  $E_1^*(y)$ )。若接收机对码字的最低携能要求  $E_{th}$  低于  $E_0^*(y)$  (或  $E_1^*(y)$ ), 则信道容量的可达性不会被破坏, 因此随着接收机对码字携能要求的提升, 信源和信宿之间的最大平均互信息量保持不变。当接收机对码字携能要求  $E_{th}$  高于  $E_0^*(y)$  (或  $E_1^*(y)$ ) 时, 可达信道容量的游程限制编码  $Q^*$  不能满足接收机的收能要求, 因此需要求解码字优化设计问题(9)获得符合能量传输需求的编码方式  $Q^*$ 。由于  $Q^* \neq Q^*$ , 可达信道容量的编码方式最优性被破坏, 信息传输性能, 即最大平均互信息量开始下降。以图3 a) 中的0型(0,1)游程限制编码为例, 当携能要求高于0.53时, 最大平均互信息量开始下降。

当游程限制编码以最大概率发射携能比特1时, 其能量传输性能达到最大。以0型(0, 1)编码、(0, 2)编码、(0, 3)编码为例, 当比特0的游程长度以100%的概率取0时, 编码器发出全1码字, 可达到最大能量传输性能。在对称信道错误概率为  $\omega = 0.2$  的情况下, 每比特最大携能为0.8个能量单位。但(0, 3)编码具备更大的游程自由度, 因此其具备最佳的信息传输性能。0型(1, 3)编码要求比特0的最低游程长度为1, 因此当编码器



▲ 图3 不同游程限制编码在 $\omega=0.2$ 的对称信道中的数能传输性能

以100%的概率发出码字101010...时，可达到最大能量传输性能0.5。虽然(1,3)编码具备与(0,2)编码相同的自由度，但(1,3)编码需要更多的比特符号来携带同样的信息量，造成(1,3)编码的信息传输能力较低。

对图3(a)和(b)进行横向比较，相同参数的1型游程限制编码发出携带比特1的概率要低于0型游程限制编码，因此在图中给出的游程限制参

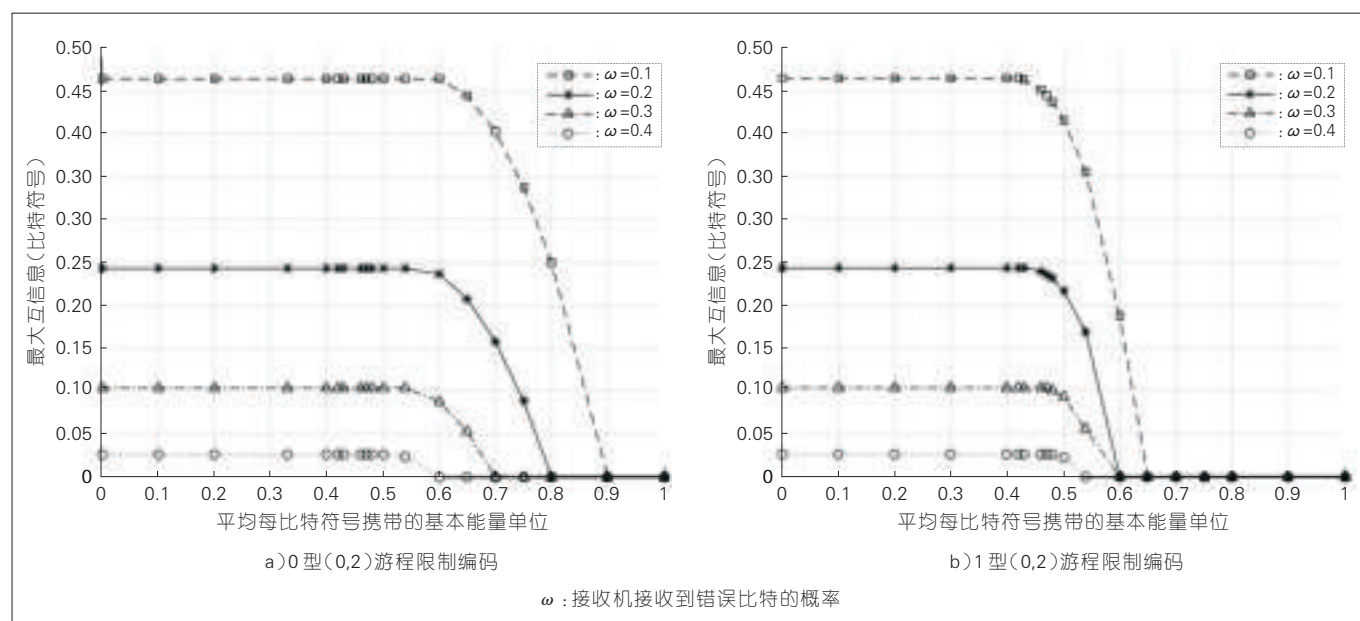
数下，1型编码的能量传输性能要低于0型编码。但是相同参数的1型游程限制编码具备与0型相同的自由度，因此其信息传输能力与0型编码是一致的。

图4(a)和(b)分别给出了0型(0,2)游程限制编码和1型(0,2)游程限制编码在比特错误概率 $\omega=\{0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$ 的对称信道中的数能传输性能。显然，随着比特错误概

率的上升，0型(0,2)游程限制编码和1型(0,2)游程限制编码的数能传输性能都会显著下降。同样可以从图4(a)和(b)中观察到：当游程限制(0,2)固定时，0型编码的数能传输性能要高于1型编码的数能传输性能。

## 4 结束语

在对称信道下，我们从经典信息论出发，研究了实际无线数能收发系



▲ 图4 0型和1型(0,2)游程限制编码在不同对称信道中的数能传输性能

统中基于游程限制编码器的数能联合编码对数能传输性能的影响。游程限制编码的最优码字设计问题建模为寻找最优的状态转移概率矩阵,在满足每比特能量传递要求的前提下,最大化采用游程限制编码后信源与信宿之间的平均互信息量的优化问题。数值结果验证了游程限制编码的数据传输和能量传输性能之间存在的权衡关系,并分析了不同信道条件下该种编码方式的数能性能。本文证明了除了时间、频率、功率、天线等无线空口资源外,码字资源在无线数能传输中也发挥了举足轻重的作用。合理分配有限的码字资源同样也可以实现无线数能传输系统的优化。

#### 参考文献

- [1] HU J, YANG K, WEN G J, et al. Integrated Data and Energy Communication Network: A Comprehensive Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 103(1): 14–76. DOI:10.1109/comst.2018.2860778
- [2] ZHAO Y Z, HU J, DING Z G, et al. Constellation Rotation aided Modulation Design for the Multi-User SWIPT-NOMA [C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). USA: IEEE, 2018: 1–6. DOI:10.1109/ICC.2018.8423037
- [3] LV K, HU J, YU Q, et al. Throughput Maximization and Fairness Assurance in Data and Energy Integrated Communication Networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 636–644. DOI:10.1109/ijot.2017.2727517
- [4] ZHAO Y Z, HU J, DIAO Y F, et al. Modelling and Performance Analysis of Wireless LAN Enabled by RF Energy Transfer[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018: 1–1. DOI:10.1109/tcomm.2018.2848974
- [5] ZHAO Y Z, HU J, GUO R, et al. Enhanced CSMA/CA Protocol Design for Integrated Data and Energy Transfer in WLANs[C]// Proceedings of IEEE Globecom 2018. USA: IEEE, 2018
- [6] ZHAO Y Z, WANG D H, HU J, et al. H-AP Deployment for Joint Wireless Information and Energy Transfer in Smart Cities[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 7485–7496. DOI:10.1109/tvt.2018.2821978
- [7] VARSHNEY L R. Transporting Information and Energy Simultaneously[C]//2008 IEEE International Symposium on Information Theory. USA: IEEE, 2008: 1612–1616. DOI: 10.1109/ISIT.2008.4595260
- [8] TANDON A, MOTANI M, VARSHNEY L R. Subblock-Constrained Codes for Real-Time Simultaneous Energy and Information Transfer [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(7): 4212–4227. DOI:10.1109/tit.2016.2559504
- [9] BABAR Z, MOHD IZHAR M A, NGUYEN H V, et al. Unary-Coded Dimming Control Improves ON-OFF Keying Visible Light Communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(1): 255–264. DOI: 10.1109/tcomm.2017.2759271
- [10] FOULADGAR A M, SIMEONE O, ERKIP E. Constrained Codes for Joint Energy and Information Transfer [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(6): 2121–2131. DOI:10.1109/tcomm.2014.2317480
- [11] ZONG Z Y, FENG H, ZHANG S Y, et al. Joint Transceiver Design for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in Multi-User MIMO Interference Networks [C]//2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). China: WCSP, 2014: 1–6. DOI:10.1109/WCSP.2014.6992015
- [12] ZHANG W B, SONG Z Y, BREJZA M F, et al. Learning-Aided Unary Error Correction Codes for Non-Stationary and Unknown Sources [J]. IEEE Access, 2016, 4: 2408–2428. DOI:10.1109/access.2016.2544060
- [13] COVER T M, THOMAS J A. Elements of Information Theory [M]. USA: John Wiley & Sons, 1991

#### 作者简介



**胡杰**, 电子科技大学信息与通信工程学院副教授、硕士生导师; 主要研究方向为无线通信与组网中的物理层设计和资源分配、无线数能一体化传输关键技术等; 现主持国家自然科学基金青年项目1项, 主持重点基金项目2项; 已发表论文30余篇, 授权及申请国家发明专利7项, 出版英文著作1部。



**李梦媛**, 电子科技大学信息与通信工程学院信息与通信工程专业在读硕士研究生; 主要研究方向为应用于无线数能同传中的编码问题。



**杨锐**, 英国埃塞克斯大学主席教授, 电子科技大学信息与通信工程学院兼职特聘教授, 担任多个顶级IEEE期刊的编委和顶级IEEE会议的技术委员会主席; 主要研究方向为无线网络和通信、无线数能一体化传输技术、计算与通信协作技术以及未来互联网技术等; 主持多项欧盟、英国国家自然科学基金项目; 已发表论文200余篇, 授权及申请中国专利多项, 出版英文专著1部。



# 部分自供电的非正交多址接入技术

## Partially Self-Powered Non-Orthogonal Multiple Access Technology

龚杰/GONG Jie  
陈翔/CHEN Xiang

(中山大学, 广东 广州 510006)  
(Sun Yat-Sen University, Guangzhou  
510006, China)

随着科技的发展, 信息技术已渗透到社会的各个方面, 并逐渐改变着人们的生产和生活方式。物联网(IoT)利用多种通信技术使机器互联, 实现自动化、智能化的信息获取与网络监控控制, 使人们从重复的工作中解放出来。然而, 为了获得足够的系统状态信息, 实现智能化精细控制, 需要部署大量的物联网节点。这将带来2个重要问题: (1) 由于电网布线困难, 物联网节点一般采用电池供电, 因此能量受限; (2) 无线频谱资源紧缺, 难以支持海量无线节点同时接入。近年来受到关注的无线能量传输(WPT)技术, 是解决物联网节点能量受限问题的有效方法; 而非正交多址接入(NOMA)技术通过在同一资源块上同时承载多个用户, 能有效缓解频谱资源紧缺的问题。因此, 这2种技术的有机结合, 是实现物联网可持续运行以及海量设备同时接入的重要手段。

文中我们基于现实, 提出一种部分自供电的NOMA技术框架, 使得近

收稿日期: 2018-07-20  
网络出版日期: 2018-09-18  
基金项目: 国家自然科学基金  
(61771495)、国家重点研发计划  
(2017YFE0112600)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0024-004

**摘要:** 提出了一种部分自供电的非正交多址接入(NOMA)技术框架, 将NOMA和无线能量传输(WPT)技术有机结合起来, 并利用频谱复用和近场传输, 实现高效的WPT和多用户接入。这一框架可以应用在上行反馈、中继传输、信息解码等多种数据传输场景。讨论了部分自供电NOMA技术的科学问题, 并对信息解码能量受限的两用户系统可达速率进行了初步分析。

**关键词:** NOMA; WPT; 连续干扰消除

**Abstract:** In this paper, a partially self-powered non-orthogonal multiple access (NOMA) frame work by combining the NOMA and wireless power transfer (WPT) technologies is proposed. With the high spectral efficiency and short distance transmission, partially self-powered NOMA can achieve high efficiency in wireless energy harvesting and multiple user data transmission. It can be used for uplink information feedback, relay transmission, information decoding and etc. Then the potential research directions on this topic is discussed, and the achievable rate region of a two user system as preliminary results is analyzed.

**Keywords:** NOMA; WPT; successive interference cancellation

距离用户在保证信息传输的同时, 可以高效地获取无线能量, 并用于更多的信息处理与传输任务。这一框架可以应用于信息解码、中继传输、上行反馈等多种场景, 具有广泛的应用前景。

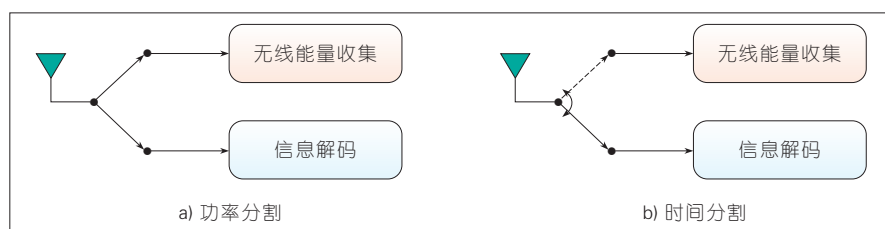
### 1 部分自供电的NOMA技术的概念与现状

WPT技术是指在接收无线信号的同时, 通过采集无线射频中的能量以获得电力<sup>[1]</sup>。通常有2种接收电路设计(如图1所示): 功率分割<sup>[2]</sup>和时间分割<sup>[3]</sup>。所谓功率分割, 是将接收到的无线信号分成2路, 一路用来进行信息的解调, 一路用来采集电量。而时间分割则是通过时分的方式, 部分时间接收信息, 部分时间采集能量。WPT具有2个特点: 一是能量源

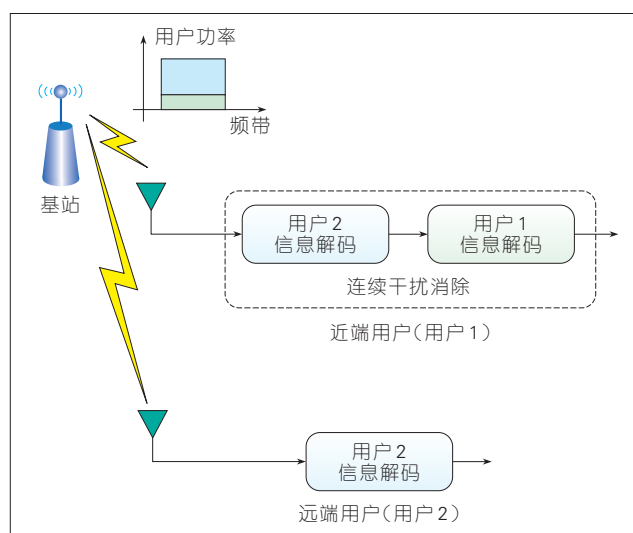
是可控的, 可以通过调节发射功率, 控制所能采集的能量; 另一个特点是相对于信息接收, 能量采集不区别有用信号和干扰信号, 因此在强干扰环境下往往能采集更多的能量<sup>[4-5]</sup>。然而其缺陷也很明显, 由于无线信号的发散特性以及信道的衰落特性, 接收端能采集到的无线能量往往很少, WPT效率很低, 尤其是当传输距离较远时, 甚至无法获得足够的能量。以1 W的发射功率为例, 路径损耗模型采用 $PL_{dB} = 30.8 + 24.2 \log_{10}(d)$ , 可以计算得到: 当 $d = 1$  m时, 接收信号强度就只有0.83 mW, 加上能量采集中的电路消耗, 能量传输效率非常低。

NOMA技术的基本原理如图2所示, 在同一频带中同时发送2个用户的信息: 一个近端用户, 一个远端用户。利用信号功率的不同, 近端用户





▲ 图1 无线能量传输接收端电路结构示意图



◀ 图2  
非正交多址接入技术  
原理图

采用连续干扰消除(SIC)技术先解出强干扰信号,从接收信号中减去干扰信号之后再解出自身信息,从而实现非正交的频谱复用。NOMA技术首先由Saito等人提出<sup>[6]</sup>,并进行了深入的系统级仿真<sup>[7]</sup>,验证了这一技术在网络容量和小区边缘用户吞吐量方面,相较于传统的正交多址接入有相当明显的性能提升。由此,NOMA技术受到了人们的广泛关注。文献[8]在上行非正交多址中提出了一种新的子载波和功率联合分配方案,以最大化用户的和速率;文献[9]从用户公平性角度重新设计了功率分配算法;文献[10]分析了用户配对方案对系统性能的影响。在NOMA技术中,由于近端用户解出了远端用户的信号,还可以作为中继节点,协助远端用户的信号接收<sup>[11]</sup>。

## 2 部分自供电的NOMA接入技术的框架

通过前面的讨论我们知道:WPT

技术在实际应用中受到距离的严格限制;而NOMA技术则给WPT提供了天然的应用场景,当近端用户离发射端很近时,可以在接收信息的同时采集能量。而且,由于在同一频段叠加了多用户信息和能量,而能量采集不区分有用信号和干扰,近端用户可以采集足够的无线能量。基于此,我们

提出部分自供电的NOMA技术框架,如图3所示。这一框架包括3个基本模块:

(1)发射端。在同一频段上用不同的功率叠加多个用户的信息,同时发送给多个用户。这一模块与传统的NOMA系统相同。

(2)近端用户。自供电用户,利用近距离接收信号功率大,分割一部分接收能量进行无线能量采集,采集到的能量可用于多种用途,另一部分通过连续干扰消除进行信息解码。根据信息解码和能量采集的需求,通过调节2部分的功率比例,以实现不同的功能。

(3)远端用户。普通用户,由电池或其他方式供电,与传统的NOMA系统相同,从无线接收信号中解码得到有用信息。

从上述框架中可以看到:相比于传统的NOMA技术,近端用户具有了无线能量采集功能,使得整个系统可以采取部分自供电(近端用户)的方式,为系统的设计提供了便利,也可以应用到更多、更广的领域。根据无线能量的用途,部分自供电的NOMA技术有以下可能的应用场景:

(1)上行反馈。近端用户利用采集到的无线能量进行短距信息上传,典型的应用场景为射频识别(RFID)。我们在非正交多址的框架

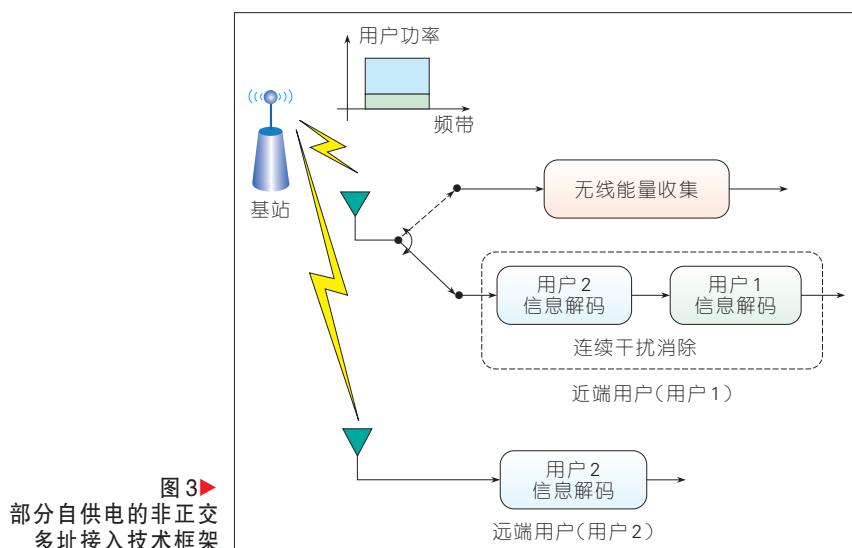


图3▶  
部分自供电的非正交  
多址接入技术框架

下,可以进行有效的频谱复用,并支持多用户下行传输和上行信息反馈。

(2)信息解码。在实际中,数据的解码也需要消耗能量<sup>[12]</sup>,当解码的过程较复杂时(如连续干扰消除),解码能耗会很大。实现近端用户的自供电,首先需要用采集的无线能量满足解码的需求。

(3)中继传输。近端用户一方面采集了无线能量,另一方面在连续干扰消除过程中对远端用户的数据进行了解码。因此,可利用采集的能量发送这部分数据,通过中继的方式提高远端用户的信噪比。基于WPT的协作中继已有些初步研究工作<sup>[13-14]</sup>,在直射链路有遮挡的情况下作用十分明显<sup>[15]</sup>。

### 3 部分自供电的 NOMA 技术的问题及研究方向

部分自供电的 NOMA 有效地结合了 WPT 和 NOMA 2 个技术,具有实际的应用前景。然而,这一框架还存在着很多待解决的问题,由这些问题引出了未来的研究方向。

(1)能量采集与信息接收的折中。由于在接收到无线电波后且解码之前,有用信号和干扰信号无法区分开,因此,无线能量采集势必造成信息接收的性能损失,即接收信号强度减弱。如何取得 2 部分的最优折中,以满足实际应用的需求,是首先需要解决的一个问题,也是 WPT 领域的基本问题之一。在 NOMA 场景下,近距传输的高能量接收信号使得能量分配有更大的自由度,但同时信息接收的复杂度也会增高。

(2)多天线设计与多用户支持。无论是在 WPT 中,还是在 NOMA 里,利用多天线波束赋形进行无线电波定向传输,都是颇具吸引力的一种设计思路。这种设计可大幅度提高传输效率,但也增加了波束赋形设计的复杂度。在多用户场景下,多波束设计和用户配对问题有待进一步考虑。从能量的角度,每个用户希望收

到尽可能多的无线电波;而从信息的角度,用户希望干扰越小越好。因此,多用户波束设计中需要考虑两者的折中。

(3)非理想因素的影响。考虑到信道信息训练和反馈,无线能量还需要满足这部分能量消耗。在多天线场景下的信道信息训练和反馈开销很大,通常无法忽略。近端用户由于距离太近,其信道特性会有所不同,如何进行建模和训练,也是一个很有意义的问题。

### 4 部分自供电的 NOMA 技术中两用户系统可达速率初探

我们研究如图 3 所示的两用户 NOMA 系统的可达速率。其中,近端用户完全由采集的无线能量给解码模块供电,因此需要保证足够的电量采集。考虑一种混合的能量采集协议:每个时隙分成 2 个子时隙,第 1 个子时隙仅发送远端用户(用户 2)的信息,此时近端用户(用户 1)完全采集能量;第 2 个子时隙发送两用户叠加信息,用户 1 根据能量需求进行功率分割。每个子时隙中均需要满足发射功率约束和传输速率约束,具体来说,在第 1 个子时隙中,由于只发送用户 2 的信息,用户 1 的功率为零,因此功率约束为:

$$P_2^{(1)} \leq P_{\max}, \quad (1)$$

其中功率下标表示用户,上标表示子时隙。传输速率约束为:

$$R_2^{(1)} \leq \log_2 \left( 1 + \frac{|h_2|^2 P_2^{(1)}}{\sigma^2} \right), \quad (2)$$

其中  $|h_1|$  为用户 2 的信道增益,  $\sigma^2$  为噪声功率。

在第 2 个子时隙中,两用户的信号受到总功率限制为:

$$P_1^{(2)} + P_2^{(2)} \leq P_{\max}, \quad (3)$$

设用户能量采集的信号比例为  $\rho$ 。由于非正交多址的技术特点,用

户 1 可完全消除干扰信号,因此其传输速率约束为:

$$R_1^{(2)} \leq \log_2 \left( 1 + \frac{|h_1|^2 (1-\rho) P_1^{(2)}}{\sigma^2} \right). \quad (4)$$

对于用户 2 来说,其速率受 2 方面约束。首先,为了保证用户 1 能完全消除用户 2 的干扰,用户 2 的速率不能超过用户 1 对用户 2 信息解码的能力范围,即:

$$R_2^{(2)} \leq \log_2 \left( 1 + \frac{|h_1|^2 (1-\rho) P_2^{(2)}}{|h_1|^2 (1-\rho) P_1^{(2)} + \sigma^2} \right). \quad (5)$$

其次,用户 2 自身的信息解码也受到信道容量限制,即:

$$R_2^{(2)} \leq \log_2 \left( 1 + \frac{|h_2|^2 P_2^{(2)}}{|h_2|^2 P_1^{(2)} + \sigma^2} \right). \quad (6)$$

最后,由于用户 1 是一个自供电系统,采集的能量应不低于消耗的能量。设第 1 个子时隙的时间占比为  $t$ ,信息解码的功耗为  $P_{sc}$ ,则有:

$$t\varepsilon|h_1|^2 P_2^{(1)} + (1-t)\rho\varepsilon|h_1|^2 (P_1^{(2)} + P_2^{(2)}) \geq (1-t)P_{sc}, \quad (7)$$

其中  $\varepsilon$  为无线能量转化效率。为了刻画两用户系统的可达速率区域,我们求解以下问题:在上述约束下,给定其中一个用户的速率,最大化另一个用户的速率。这个问题其实可以建模为:

$$\begin{aligned} & \max tR_2^{(1)} + (1-t)R_2^{(2)} \\ & s.t. (1-t)R_1^{(2)} = r \end{aligned}, \quad (8)$$

即给定用户 1 的速率  $r$ ,最大化用户 2 的速率。

可以证明:上述问题是一个凸优化问题,可以用凸优化理论有效地求解。通过遍历所有可能的  $r$  值,可以刻画出两用户的可达速率区域。图 4 给出了一组参数下的结果。图中 4 条曲线分别代表传统的功率分割技术、时间分割技术、我们提出的混合能量采集协议,以及时分多址(TDMA)。比较这几条曲线,我们所提的混合协议能获得最大的可达速

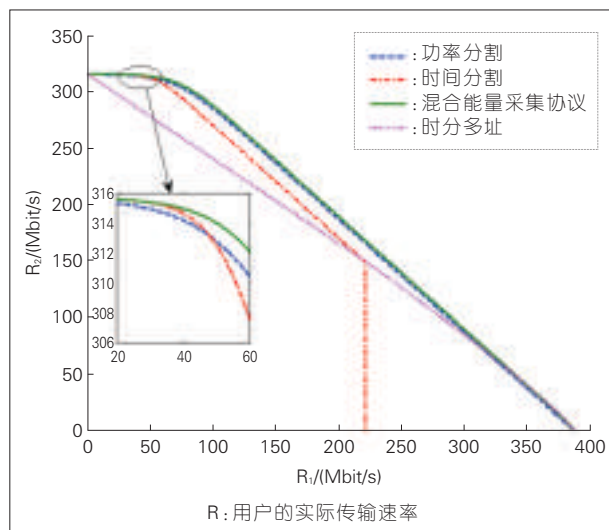


图4  
两用户部分自供电非正交多址接入系统可达速率

率域。实际上,混合协议包含了传统的功率分割和时间分割,因此这一结果是自然的。在时间分割技术的曲线上我们发现:速率2在约220 Mbit/s时突然降为0。其原因在于:为了保证有足够的能量,第1个子时隙的长度有一个非零下界,低于这个下界系统将无法工作。

在上述问题中,当 $\rho=0$ 或者 $t=0$ 时,退化到传统的时间分割和功率分割问题。这两种特殊情况可以得到闭式的可达速率域。为了得到更大的可达速率域,可以根据传输速率动态调节解码能耗。这些问题的具体分析参见文献[16]。

## 5 结束语

本文所提出的部分自供电的NOMA框架,结合了NOMA技术和WPT技术的特点和优势,可广泛应用于能量受限的多用户系统。这一框架的实现仍有很多技术难点有待攻克。在解码能量受限的两用户系统分析中,我们所提出的混合能量采集协议可以得到比传统时间分割或功率分割更大的可达速率域。

### 参考文献

- [1] ZHANG R, K HO C. MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 1989–2001. DOI: 10.1109/

- TWC.2013.031813.120224  
[2] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Wireless Information and Power Transfer: A Dynamic Power Splitting Approach [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 3990–4001. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.071813.130105  
[3] ZHOU X, ZHANG R, HO C K. Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate–Energy Tradeoff [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4754–4767. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.071813.130105  
[4] PARK J, CLERCKX B. Joint Wireless Information and Energy Transfer in a Two–User MIMO Interference Channel [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(8): 4210–4221  
[5] LEE S, LIU L, ZHANG R. Collaborative Wireless Energy and Information Transfer in Interference Channel [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 545–557. DOI: 10.1109/TWC.2014.2354335  
[6] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A. Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access[C]// IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), Jun. 2013, pp. 1–5  
[7] SAITO Y, BENJEBBOUR A, KISHIYAMA Y, et al. System Level Performance Evaluation of Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)[C]// 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE: USA, 2013: 611–615. DOI: 10.1109/PIMRC.2013.6666209  
[8] AI-IMARI M, XIAO P, IMRAN M A, et al. Uplink Nonorthogonal Multiple Access for 5G Wireless Networks[C]// 2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS). IEEE: USA, 2014: 781–785. DOI: 10.1109/ISWCS.2014.6933459  
[9] TIMOTHEOU S, KRIKIDIS I. Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(10): 1647–1651. DOI: 10.1109/LSP.2015.2417119  
[10] DING Z, FAN P, POOR H V. Impact of User

Pairing on 5G Nonorthogonal Multiple–Access Downlink Transmissions [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 65(8): 6010–6023. DOI: 10.1109/LSP.2015.2417119

- [11] DING Z, PENG M, POOR H V. Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems [J]. IEEE Communication Letters, 2015, 19(8): 1462–1465. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2441064  
[12] ZHOU S, CHEN T, CHEN W, et al. Outage Minimization for A Fading Wireless Link with Energy Harvesting Transmitter and Receiver [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(3): 496–511  
[13] LIU Y, DING Z, ELKASHLAN M, et al. Cooperative Nonorthogonal Multiple Access with Simultaneous Wireless Information and Power Transfer [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4): 938–953. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2549378  
[14] XU Y, SHEN C, DING Z, SUN X, et al. Joint Beamforming Design and Power Splitting Control in Cooperative SWIPT NOMA Systems[C]// IEEE Transactions on Signal Processing. USA: IEEE, 2017: 4847–4886. DOI: 10.1109/TSP.2017.2715008  
[15] LIU L, ZHANG Z, SHEN C, et al. Wireless Powered Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access Transmission[C]// IEEE ICC Workshops. USA: IEEE, 2018  
[16] GONG J, CHEN X. Achievable Rate Region of Non-Orthogonal Multiple Access Systems with Wireless Powered Decoder [C]// IEEE Journal on Selected Areas in Communications. USA: IEEE, 2017, 35(12): 2846–2859. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2726242

### 作者简介



龚杰, 中山大学数据科学与计算机学院副教授; 主要研究方向为绿色通信与网络、移动缓存与边缘计算、无人机通信等; 先后主持2项国家自然科学基金项目, 参加多项国家自然科学基金和科技部项目; 已发表论文50余篇, 其中SCI检索论文20余篇。



陈翔, 中山大学电子与信息工程学院副教授; 主要研究方向为5G移动通信与物联网、移动大数据、卫星通信等; 先后主持国家级省部级科研项目10余项; 已发表论文80余篇, 其中SCI检索论文30余篇, 申请并获得授权发明专利30余项。



# 基于摩擦纳米发电机的自驱动微系统

## Self-Powered Microsystem Based on Triboelectric Nanogenerator

陈号天/CHEN Haotian

宋宇/SONG Yu

张海霞/ZHANG Haixia

(北京大学, 北京 100871)

(Peking University, Beijing 100871, China)

随着科学技术的飞速发展,电子设备呈现出小型化、低功耗和多功能的趋势,万物互联的物联网(IoT)时代已经拉开序幕。物联网的搭建依赖于无数的分布式传感器,用于生命健康监测、环境污染防控、基础设施安全等诸多领域。尽管单个传感器能耗有限,但是整个物联网包含着上亿个传感器,这就对能源供给问题提出了挑战。电池是最为常见的储能元件,但是在面对数量庞大的分布式传感器系统时,电池因其有限的寿命,需要循环充电以及自身体积过大等问题,无法解决物联网中海量传感器节点的能量供给问题。因此,开发出一种可以随时随地从周围环境中收集能量用于驱动微纳米传感器的自驱动微系统成为当务之急。

在周围环境中,相比于光能、热能等,机械能来源更为广泛,种类更加丰富,大到风能、水能,小到人体的自身运动都充满着大量的机械能。常用的机械能采集方式包括电磁感应、压电效应和摩擦起电效应。环境

收稿日期: 2018-07-15

网络出版日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61674004, 91323304)、北京市自然科学基金(4141002)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0028-007

**摘要:** 针对物联网的多样性和应用环境复杂性,提出基于摩擦纳米发电机(TENG)的自驱动微系统解决方案。首先分析搭建自驱动微系统需要的3个基础模块:基于人体运动的摩擦纳米发电机的能量采集(EH)模块、主动式传感模块、高效率的能量存储模块,在此基础上搭建适用于不同应用场景的自驱动微系统,既可以有效地解决海量传感器节点的长期稳定能量供给问题,又有利于物联网技术向着多维度和多形态的方向发展。

**关键词:** 微能源系统; EH; TENG; 自驱动; 主动式传感; 能量管理

**Abstract:** Triboelectric nanogenerator (TENG)-based self-powered microsystem is beneficial for solving the energy problem of Internet of things (IoT). In this paper, the design of the self-powered micro system is investigated, and three fundamental modulus including the human motion-based TENG, active sensor and energy storage unit to establish the self-powered system are proposed. This methodology can effectively overcome the difficulty of energy supply for mass various sensor units in IoT applications, which provides a promising solution for the long term energy supply problem in the IoT technology, and push the IoT forward to multi-dimensional and various morphological developing trend.

**Keywords:** micro energy system; energy harvesting; TENG; self-sensing; active sensor; power management

中的机械能多呈现频率偏低、振动随机等特点,这就给能量采集(EH)方式提出了挑战。相比于传统的基于电磁感应原理的大型发电机,新型的压电式纳米发电机和摩擦式纳米发电机更加适用于这类“低频随机能量”的采集。而摩擦纳米发电机(TENG)因为其优异的输出特性以及不受材料限制等突出优点,成为近年来最受关注的微能源采集技术<sup>[1]</sup>。同时,TENG可以自发地对外界的刺激产生响应,也作为主动式传感器使用。因此,基于TENG的自驱动微系统主要包含3个基本模块:EH模块、主动式传感模块和能量存储模块。文中,我们将针对自驱动微系统的3

个基础模块的核心技术逐一介绍。

## 1 微型EH技术

### 1.1 TENG的工作原理

摩擦起电效应在数千年前就已经被人类发现,该效应是一种由接触引发的带电效应,广泛地存在于人们的日常生活当中。2012年佐治亚理工学院王中林院士首次提出了TENG,它基于接触起电效应和静电感应效应。当2种不同材料接触之后,电荷会在二者接触面进行转移并重新分布,2个物体表面会产生电势差,因此2种材料表面贴附电极并连接之后,2个物体产生相对位移之



后,在电势差的驱动下会使电荷在2个电极之间移动,从而实现机械能转化为电能。

对 TENG 的分析就是揭示其电容行为的过程<sup>[2]</sup>。对于任意 TENG 来说,都会有一对相互朝向的材料,成为2个摩擦层或者1组摩擦副。2个摩擦层之间的距离 $x$ ,将会随外力作用产生变化。一旦通过外力作用接触,在接触起电原理的作用下,2个摩擦层将会携带符号相反数目相同的静电荷。通过在2个摩擦层外侧贴附电极,并当2个摩擦层距离产生变化时,电极电势的不同将驱使电荷在电极之间转移。如果定义转移的电荷量为 $Q$ ,那么失去电荷量为 $-Q$ ,而得到的电荷量为 $+Q$ ,以保证电荷守恒。

两电极的电势差将分为2个部分。第1部分来自于极化的摩擦电荷,它们将贡献的电势差为 $V_{oc}(x)$ 。另外,已经转移的电荷也会导致一定的电势差变化。如果我们假设没有摩擦电荷在这个系统中,那么整个结构就是一个典型的电容结构,所以,将已转移的电荷贡献的电容记做 $-Q/C(x)$ ,这里 $C(x)$ 是两电极之间的电容。根据电场叠加原理,总的电势差可以记做:

$$V = -\frac{1}{C(x)}Q + V_{oc}(x) \quad (1)$$

式(1)为 TENG 的最基础公式。在短路情况下,转移的电荷量 $Q_{sc}$ 将完全覆盖因剩余极化电荷造成的电势差,所以此时摩擦发电机的短路情况下可表示为:

$$0 = -\frac{1}{C(x)}Q_{sc} + V_{oc}(x), \quad (2)$$

$$Q_{sc}(x) = C(x)V_{oc}(x). \quad (3)$$

如图1所示,摩擦发电机有4种基本的工作方式<sup>[3]</sup>,分别为:接触分离式、滑动式、单电极式和自由式。

## 1.2 TEMG 的应用

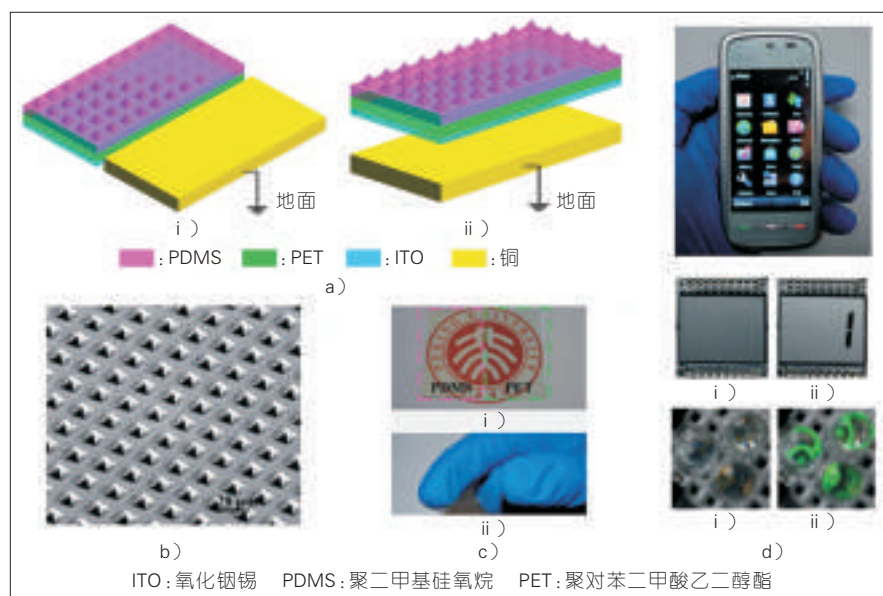
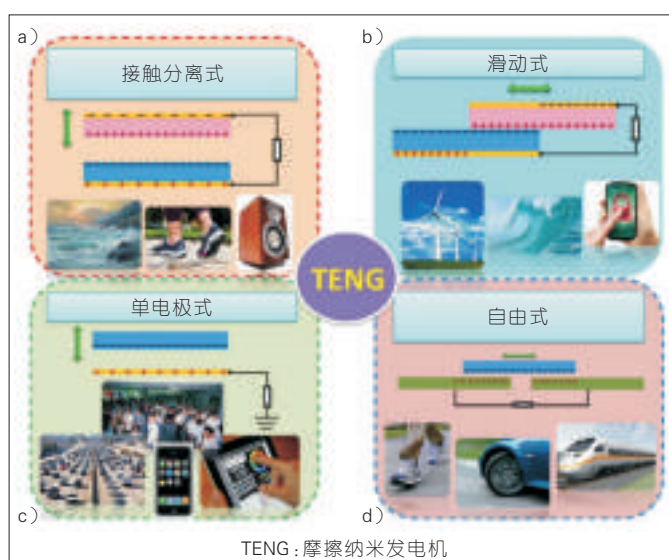
日常生活中蕴含着无数的能量,

以人体为例,我们每日的一举一动都能产生能量。研究表明<sup>[4]</sup>:一个正常身材的男子挥动手臂1 min将产生1.8~72 J的能量,跑步1 min将产生300~510 J的能量,即使打字这种轻微的动作,持续1 min也可以产生0.3~1.44 J的能量;而现代电子设备,比如智能手机,一天消耗的电能约为60 J。由此可见:如果可以将日常的运动能成功采集,可以满足绝大多数电子设备的能量供给。

2013年研究人员提出一种单表面透明的 TENG<sup>[5]</sup>,如图2所示。该工

作采用单摩擦表面结构,简化了器件设计及制备工艺,极大地提高了发电机的输出,并拓展了 TENG 的应用领域。当手指等可动物体与摩擦表面触碰并分离时,即与摩擦表面构成摩擦副,产生摩擦电荷。在摩擦电荷所产生的电场驱动下,电荷经由外部负载电路,不断在感应电极和参考地之间往复流动,形成电流,从而将可动物体运动的机械能转化为电能输出。在手指轻敲驱动下,其输出电压可达130 V,输出电流的密度大概为 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,远高于现有的透明纳米发

图1  
摩擦发电机4种  
基本工作形式



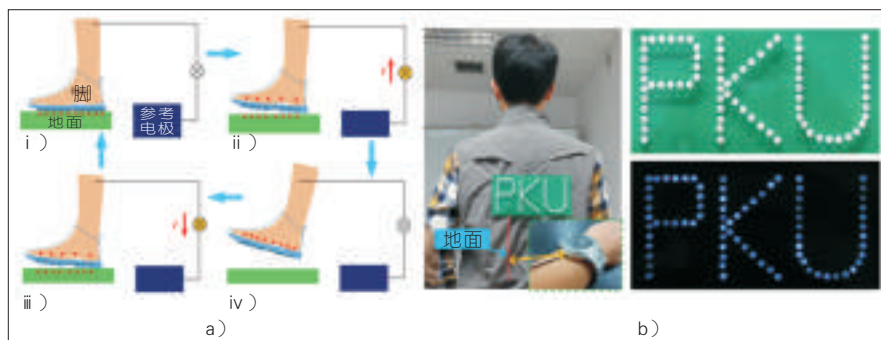
▲图2 单表面透明摩擦发电机

电机。将此发电机裁剪、装贴于智能手机屏幕上,在用户日常操作下,输出电能可同时点亮3个发光二极管。进一步地,以此发电机为基础,利用二极管搭建逻辑电路,研究人员开发了自供能的触觉传感器。当手机用户触摸由4个单表面摩擦发电机构成的触摸板时,即可驱动单色液晶显示屏,并可在屏幕上显示对应的数字。

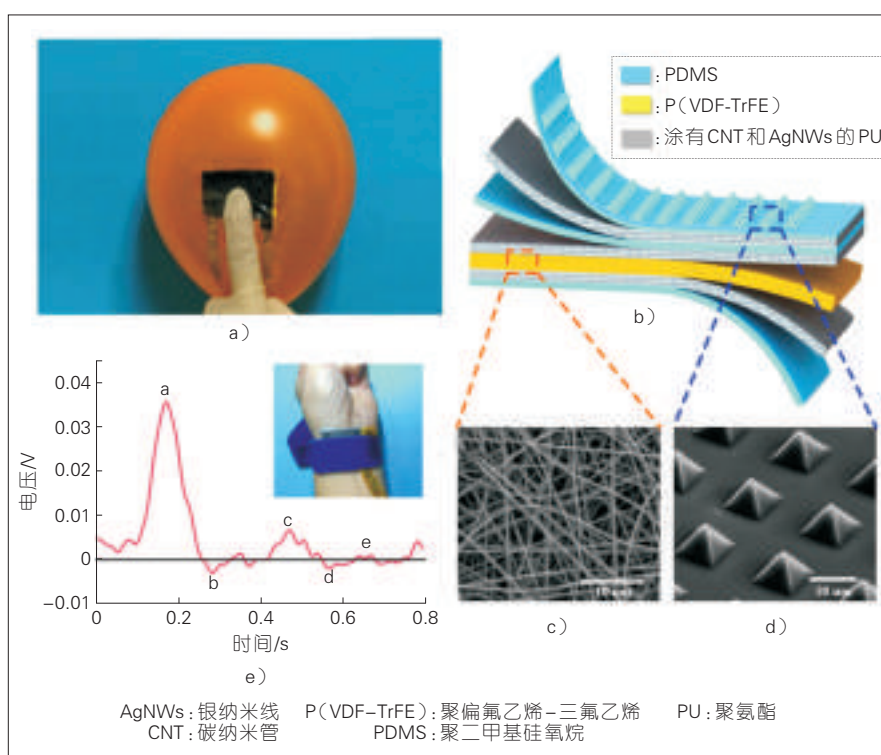
进一步地,研究人员利用“人体是电的良导体”的特点,将人体作为电导实现了一种柔性全透明的摩擦发电机,如图3所示<sup>[6]</sup>。相比于上述工作,其结构更简单,无需单独提供对地电极,适用范围更广泛,输出电流和转移电荷的输出分别提高210%和81%。这种透明的TENG可贴于手机、平板电脑等设备表面,在设备后面贴一层电极用于与手掌、手腕等部位接触,形成人体接触电极,从而构成一个完整回路,在日常使用中,由于手指与电极材料得失电子能力不同,手指不断与透明发电机接触,即可引起电子在回路中流动,形成电流为一些低功率设备供电。由于以人体为电导有诸多优点,基于此有希望做出更多面向应用的新型发电机,如进一步提升发电机的输出,将可能作为移动设备、可穿戴设备的备用电源使用。

### 1.3 复合式EH技术

相对于单一的EH技术,复合式EH技术将多种EH技术集成,从而进一步提高EH的效率。2017年研究人员提出了一种摩擦与压电复合的纳米发电机,如图4所示<sup>[7]</sup>。该器件采用静电纺丝工艺加工的柔性纳米纤维作为功能材料和电极骨架,通过添加导电纳米材料制作柔性电极,引入纳米结构增加表面摩擦层接触面积。针对摩擦发电机需相对位移和压电发电机需产生形变的工作特点,将二者垂直结合,构成多层薄膜状结构,从而使器件可保形覆盖在人体皮



▲图3 可穿戴摩擦发电机



▲图4 复合式能量采集器件

肤等柔性表面,并在外力情况下随柔性物体一起产生形变,进行能量转换。其中,TENG部分将物体与器件接触分离过程中的机械能转化为电能输出,压电发电机部分则对器件形变过程中的机械能进行能量转换,由此提升器件在一次按压释放过程中的EH效率。除了针对柔性表面进行EH外,由于压电静电纺丝薄膜具有比较高的压力灵敏度,器件还可贴附于人体腹部或者手腕处,用于呼吸、脉搏振动等一系列生理信号的监测,在自供能健康监测系统中有着非

常广阔的应用前景。

## 2 主动式传感技术

利用摩擦发电的原理发展起来的新型主动式传感技术,无需外接电源即可对外部信号,包括力学、热学、声学等,产生响应,是一项潜力巨大的技术,特别在备受关注我们的人造电子皮肤领域取得了一定的成功。电子皮肤同时兼备力学上的柔性和电学上的传感功能,但是应用环境如医疗健康、人工智能、便携式电子等领域又要求它体积小兼具柔性和舒适性,



因此不可能佩带硬质电池等电源,所以利用摩擦发电原理正好适合这一应用场景。

## 2.1 模拟定位传感技术

科研人员将摩擦起电原理与横向的静电感应效应相结合,研制出一种新型自驱动的柔性透明多功能电子皮肤,如图5 a)所示<sup>[8]</sup>。有别于传统电子皮肤基于传感器阵列实现对压力、位置等物理量的数字式感知,该模拟电子皮肤利用目标物体与电子皮肤表面接触产生的摩擦电荷,根据距离对摩擦电荷与测量电极静电感应效应强度的影响,通过计算2个相对电极之间的电势比例( $R_{ac}$ 和 $R_{bd}$ )来实现各个方向上的定位。如图5 b)所示,各个电极上的电压值可以直接测试得到。这里以a、c2个相对电极为例,通过计算两电极上电压的比例,可以得知接触位置,如图5 c)所示。由于利用摩擦表面自主产生的摩擦电荷,也实现了完全的自驱动传感。又由于模拟定位方法的运用,只需4个电极即可实现二维高精度定位,极大地减少电极数量,从而降低了后端处理电路的复杂性。

该电子皮肤通过使用表面具有

微结构且修饰氟碳聚合物的聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为摩擦面,不仅提高了摩擦电荷密度,也增强了信号的强度与高稳定性。该电子皮肤在平面和曲面一系列的重复测试中均达到1.9 mm的空间分辨率,表现出很高的感应灵敏度,例如:可以感知蜜蜂四肢( $\sim 0.16$  g)落在电子皮肤上的扰动。此外,利用被测物体靠近电子皮肤时各个电极上信号强度的绝对值,还可以实现对接触速度的测量。由于使用了全透明柔性材料、银纳米线电极,该电子皮肤也表现出优异的柔性和透明性。

## 2.2 力学传感技术

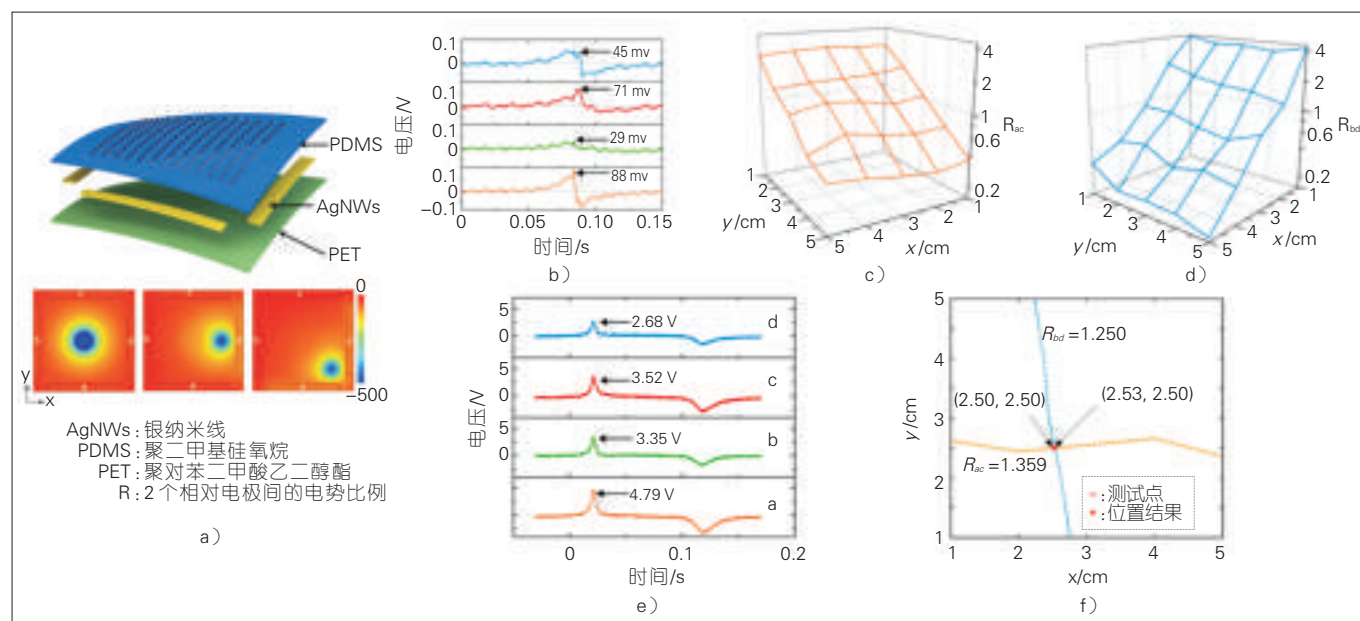
研究人员以人类指纹结构为突破口,受人体皮肤传感机制和结构的启发,通过研究皮肤传感生理机制和手指生理结构,创造性地将摩擦式动态传感与压阻式静态传感加以结合,设计了一种基于指纹结构的新颖多功能电子皮肤,如图6所示<sup>[9]</sup>。器件模仿指纹结构设计双螺旋电极的TENG,通过摩擦电压输出频率检测滑动物体的粗糙度,首次提出了数字式的摩擦检测方案。仿真皮结构制备多孔碳纳米管(CNT)/PDMS,通过

接触电阻变化检测压力大小,合理调控纳米导电网络及多孔率,可大幅提升压阻传感灵敏度。同时集成动态滑动检测和静态压力检测的功能,体现了该多功能电子皮肤在执行复杂任务的强大能力,显示了其在机器人传感领域的巨大潜力。

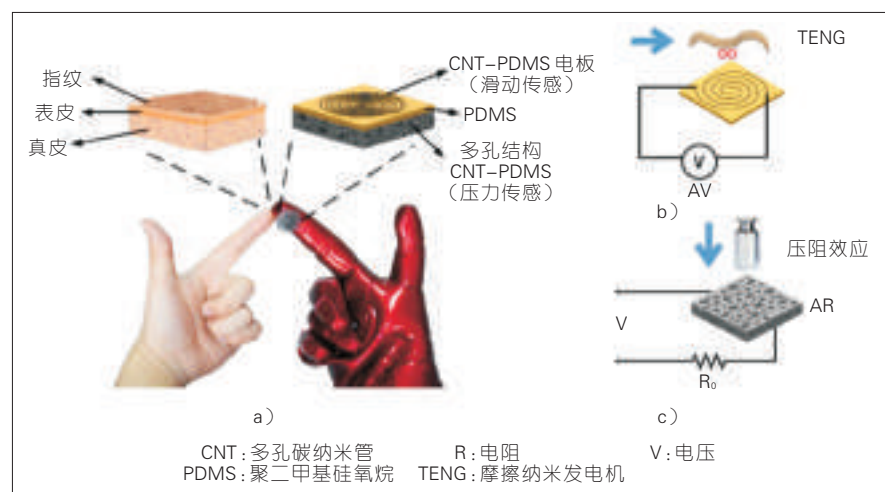
## 2.3 非接触传感技术

现有电子皮肤大多依靠集成压力传感元件的方式实现接触式位置传感,其分辨率受制于传感单元个数,且无法完全发挥电子皮肤的潜能与优势。针对这一问题,科研人员研制出一种新型的自驱动非接触式透明柔性电子皮肤,如图7所示<sup>[10]</sup>。它结合摩擦起电原理与空间静电感应效应,利用4个电极即可达到1.5 mm的二维空间分辨率。与此同时,该电子皮肤还能够检测垂直距离不超过5 cm的带电体在平行平面内的运动,因此实现了非接触式位置传感。

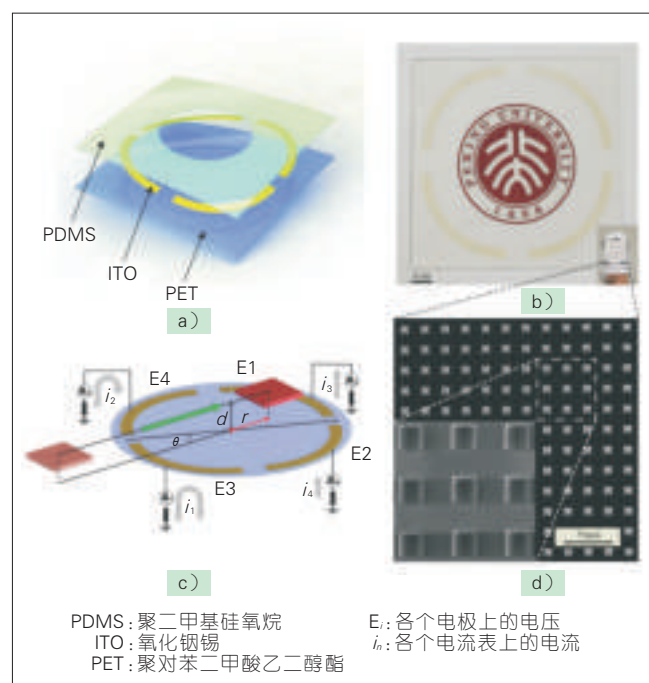
不同于传统电子皮肤基于传感单元阵列实现对于压力、位置等物理量的数字式感知,该模拟电子皮肤利用预起电过程中积累于带电体表面的电荷,根据空间位移造成的静电势变化在电极上所产生的感应电流,通



▲图5 自驱动模拟定位电子皮肤



▲图6 仿指纹多功能电子皮肤



◀图7 非接触电子皮肤

过计算多个电极电压的相对大小实现极坐标平面上的定位。由于利用摩擦表面自主产生的摩擦电荷,电子皮肤实现了完全的自驱动传感;又由于模拟定位方法的运用,只需4个电极即可实现二维高精度定位,相较于传统数字式电子皮肤,极大降低了电极数量;空间静电感应原理使得目标物体的位移可脱离并平行于电子皮肤所在平面,可作为实时游戏平台的人机交互界面使用,将用户的手指运动转化为电信号发送给计算机。该

电子皮肤通过使用表面具有微结构的PDMS作为摩擦面,不仅增强了摩擦电荷密度,也提高了信号的强度。此外,使用磁控溅射在聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)衬底表面的氧化铟锡(ITO)为电极,因此具有很好的柔性与透明性。

### 3 能量存储技术

#### 3.1 超级电容器

近年来,随着可穿戴电子设备的

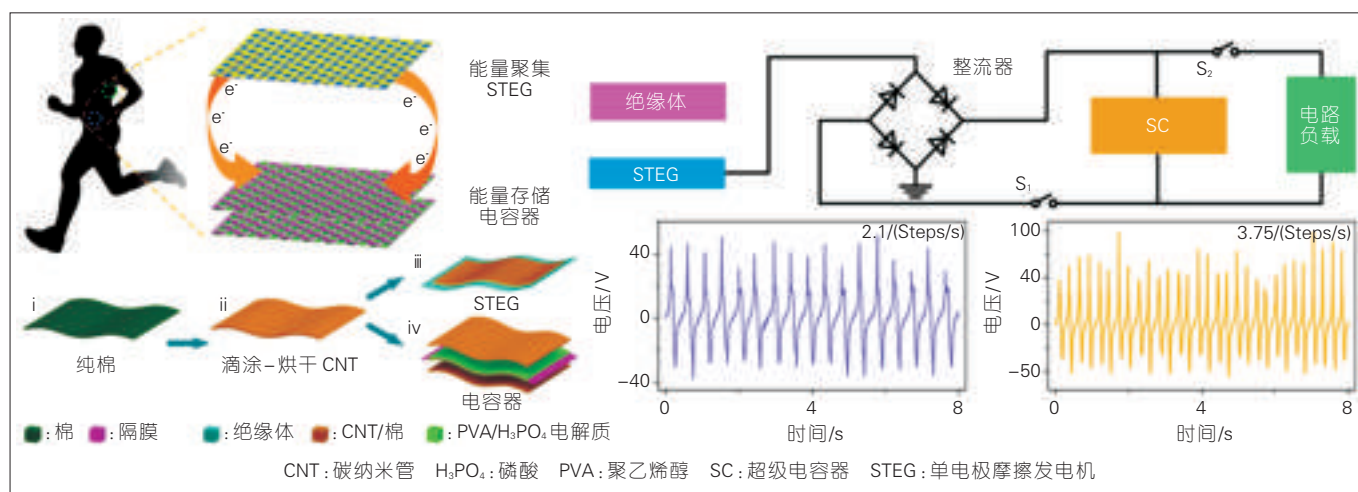
迅猛发展,多功能集成化的智能器件的需求日益增长,电子设备不仅需要具有小型化、低功耗的特点,同时需要满足可穿戴的各项特质,并具有良好的稳定的性能。因此,具有同步EH与存储过程的自充电能量系统是一种潜在的解决方案。然而,现阶段高效稳定的能量系统的发展,仍然存在一定的制约。一方面,考虑到普通的能量存储设备充电不方便等劣势,研究学者提出将超级电容器与太阳能电池相结合的方式,为电子设备持续供电;但是,太阳能电池容易受到环境与工作条件的制约,无法实时采集能量,限制了太阳能电池在可穿戴设备中的应用。另一方面,随着各类EH器的快速发展,克服外部环境限制而随时采集环境中各类能量的TENG,在可穿戴电子中具有独特的优势;但是,普通的接触分离模式的摩擦发电机则需要较大的空间,无法满足集成式智能衣物的需求。因此,如何将EH与能量存储设备高效地集成起来,并应用于可穿戴电子系统,是一个亟待解决的巨大挑战。

研究人员以导电织物作为通用电极,将单表面TENG与柔性超级电容器集成起来,通过制备通用织物电极,得到一种高集成度的自充电能量服,在人体运动的过程中对机械能进行同步采集与存储,如图8所示<sup>[11]</sup>。一方面,为了更有效地采集人体运动能量,单表面TENG可以直接贴附于衣物表面,并且表现出了极好的输出性能。同时,利用织物结构表面积大与碳纳米管导电性良好的优势,可穿戴的超级电容器同样具有较高的比电容值与稳定的循环特性。最终,在人体运动的过程中,这种高集成度的自充电能量服可以持续稳定地存储能量,具有较高的集成度与可穿戴兼容性,在自供能可穿戴电子与智能衣物等方面具有潜在的应用前景。

#### 3.2 能量管理电路

TENG由于自身内阻较大,因此



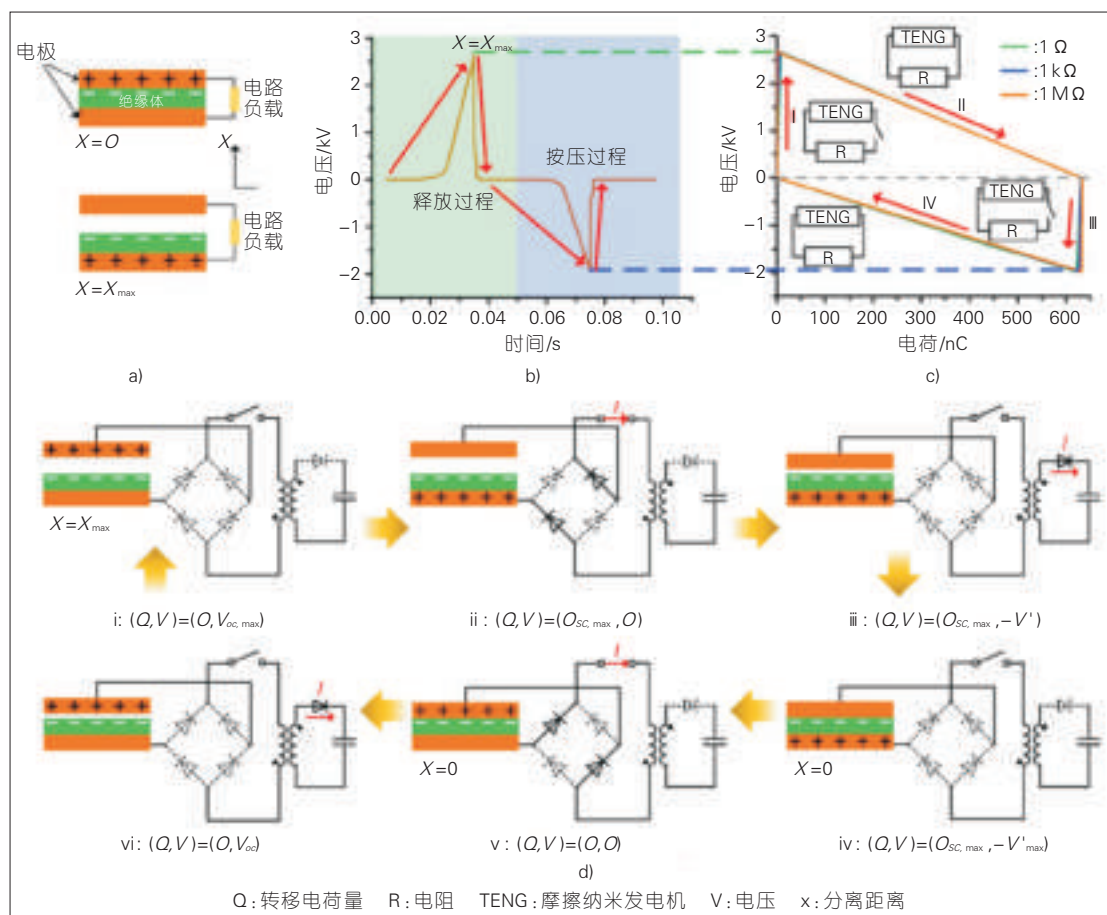


▲图8 可穿戴自充电能量服

对现有电路直接供电难以达到阻抗匹配,效率较低,是限制其实用化的一大因素。研究人员针对这一问题,利用谐振(LC)振荡原理,开发了一种适用于TENG的高效通用电源管理方案与系统,如图9所示<sup>[12]</sup>。该工作

从理论分析摩擦发电机的内部阻抗模型出发,首先采用串联开关的方式,在短路情况下实现开路电压与短路电流同步输出,从而获得TENG单周期的最大输出能量。在此基础上采用LC振荡原理,于1/4周期内完成

能量从TENG内部电容到电感的转移,达到高能量转移效率。基于以上原理,该工作成功搭建了相应的能量管理模块,使用该模块对4.7 mF电容充电的能量存储效率相比于标准模块提升最多达2 600倍,交直流功率



▲图9 高效摩擦发电机能量管理电路

转换效率高达72%,并且适用于不同模式的TENG。利用该能量管理模块,在手指按压、滑动过程中,即可成功驱动商用电子模块的实时工作,包括持续照明的发光二极管(LED)灯、电子计算器、计步器以及电子手表等。该工作不仅从原理上提出了适用于TENG电源管理的新思路与方案,同时搭建了一种通用的、高效的能量管理模块,清除了TENG未来实用化的一大障碍,成为本领域的一大突破。

#### 4 结束语

摩擦发电作为一种新型的、高效的EH技术正在迅速蓬勃发展,本文从其工作原理入手,分析了其性能提升的关键因素,并给出若干实际应用案例,展现了TENG在日常EH中的强大潜力。此外,还介绍了基于TENG原理发展起来的主动式传感技术,无需外接电源即可对外部特定信号产生响应,大大降低了器件功耗。最后,针对TENG后端能量存储的问题进行了介绍,并重点研究了与超级电容器相集成的自充电能量单元及相应能量管理电路的设计。这3种技术是物联网的基础,它们的集成和组合将为多种物联网应用场景提供可行的解决方案。

#### 参考文献

- [1] WANG Z L. On Maxwell's Displacement Current for Energy and Sensors: the Origin of Nanogenerators [J]. Materials today, 2017, 20 (2): 74–82. DOI:10.1016/j.attod.2016.12.001
- [2] NIU S M, WANG Z L. Theoretical Systems of Triboelectric Nanogenerators [J]. Nano Energy, 2015, 14: 161–192. DOI:10.1016/j.nanoen.2014.11.034
- [3] WANG S H, LIN L, WANG Z L. Triboelectric Nanogenerators as Self-Powered Active Sensors [J]. Nano Energy, 2015, 11: 436–462. DOI:10.1016/j.nanoen.2014.10.034
- [4] BYUN K E, LEE M H, CHO Y, et al. Potential Role of Motion for Enhancing Maximum Output Energy of Triboelectric Nanogenerator [J]. APL Materials, 2017, 5(7): 074107. DOI:10.1063/1.4979955
- [5] MENG B, TANG W, TOO Z H, et al. A Transparent Single-Friction-Surface Triboelectric Generator and Self-Powered Touch Sensor [J]. Energy & Environmental Science, 2013, 6(11): 3235–3240. DOI: 10.1039/c3ee42311e
- [6] CHENG X L, MENG B, ZHANG X S, et al. Wearable Electrode-Free Triboelectric Generator for Harvesting Biomechanical Energy [J]. Nano Energy, 2015, 12: 19–25. DOI:10.1016/j.nanoen.2014.12.009
- [7] CHEN X X, SONG Y, SU Z M, et al. Flexible Fiber-Based Hybrid Nanogenerator for Biomechanical Energy Harvesting and Physiological Monitoring [J]. Nano Energy, 2017, 38: 43–50. DOI:10.1016/j.nanoen.2017.05.047
- [8] SHI M Y, ZHANG J X, CHEN H T, et al. Self-Powered Analogue Smart Skin [J]. ACS Nano, 2016, 10: 4083–4091. DOI: 10.1021/acsnano.5b07074
- [9] CHEN H, MIAO L, SU Z, et al. Fingertip-Inspired Electronic Skin Based on Triboelectric Sliding Sensing and Porous Piezoresistive Pressure Detection [J]. Nano Energy, 2017, 40: 65–72. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.08.001
- [10] WU H X, SU Z M, SHI M Y, et al. Self-Powered Noncontact Electronic Skin for Motion Sensing [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(6): 1704641. DOI: 10.1002/adfm.201704641
- [11] SONG Y, ZHANG J X, GUO H, et al. All-Fabric-Based Wearable Self-Charging Power Cloth [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(7): 073901. DOI:10.1063/1.4998426
- [12] CHENG X L, MIAO L M, SONG Y, et al. High Efficiency Power Management and Charge Boosting Strategy for a Triboelectric Nanogenerator [J]. Nano Energy, 2017, 38: 438–446. DOI:10.1016/j.nanoen.2017.05.063

#### 作者简介



**陈号天**, 北京大学前沿交叉学科研究院在读博士生;研究方向为可拉伸导电材料的制备和新型多功能电子皮肤;获得国家奖学金、北京大学“三好学生”等荣誉奖励;发表论文40余篇。



**宋宇**, 北京大学信息科学技术学院在读博士生;研究方向为集成化微能源器件的研究与应用;曾多次获得国家奖学金、北京大学校长奖学金等荣誉奖励;发表学术论文25篇,拥有3项授权中国发明专利。



**张海霞**, 北京大学信息科学技术学院教授, 国际大学生iCAN创新创业大赛发起人、国际iCAN联盟主席、全球华人微纳米分子系统学会秘书长、IEEE NTC北京分会主席、2013年IEEE NEMS国际会议主席及其他10余个国际会议的组织者;多年来专注于微纳技术和微能源的研究;2006年获得国家技术发明二等奖,2013年获得北京市教学成果二等奖,2014年获得日内瓦国际发明展金奖,2017年被评为北京大学十佳导师和北京市优秀教师,2018年荣获北京市五一劳动奖章;发表学术论文共250篇,拥有42项授权中国发明专利和3项美国授权发明专利,出版专著和编著8本。

# 摩擦纳米发电机等效电路模型研究

## Equivalent Circuit Models of Triboelectric Nanogenerators

魏子钧/WEI Zijun<sup>1</sup>  
耿来鑫/GENG Laixin<sup>2</sup>  
边森/BIAN Sen<sup>1</sup>

(1. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053;

2. 北京交通大学, 北京 100044)

(1. The Research Institution of China Mobile, Beijing 100053, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0035-005

**摘要:** 推导出了摩擦纳米发电机(TENG)的电路方程, 由此建立了 TENG 等效电路, 并进行了 PSpice 仿真。该项工作对后续 TENG 的发电理论分析、能量管理电路开发等工作提供了理论依据和实际物理模型。

**关键词:** TENG; 能量收集; 等效电路; 机械能

**Abstract:** In this paper, the circuit equation of triboelectric nanogenerators (TENG) is derived. Then, the equivalent circuit of TENG is established and the PSpice simulation is carried out. This work provides theoretical basis and actual physical model for the subsequent theoretical analysis of generators and energy management circuit development of TENG.

**Key words:** TENG; energy harvesting; equivalent circuit; mechanical energy

随着便携式电子设备、传感器低功耗电子设备应用的快速增长, 从周围环境收集机械能量驱动这些设备的可持续电源的研究已经引起了全世界的关注。迄今为止, 基于压电<sup>[1-4]</sup>、电磁<sup>[5-6]</sup>效应的能量收集技术证明了收集环境机械能的可行性。其中, 电磁式收集方法密度低、集成度差、成本高; 压电式收集法中的压电材料若在较大应变下工作, 压电陶瓷会出现电疲劳, 使电性能下降<sup>[7-8]</sup>, 且该过程不可逆。近几年发明的摩擦纳米发电机(TENG)因结构简单、可靠性高、无污染等优点<sup>[9-12]</sup>, 为能量收集技术提供了全新的思路和方案。

通过近几年的研究, TENG 的面积功率密度达到了 313 W/m<sup>2</sup>, 体积功率密度达到了 490 kW/m<sup>3</sup><sup>[13]</sup>, 机械能转换效率最高已达 85% 左右<sup>[14]</sup>。TENG 已被用作直接电源给手机电池充电, 并可作为自供电有源传感器<sup>[15-16]</sup>。然而, TENG 的实际广泛应用还需要解决 2 方面的难题: 一方面仍然需要从

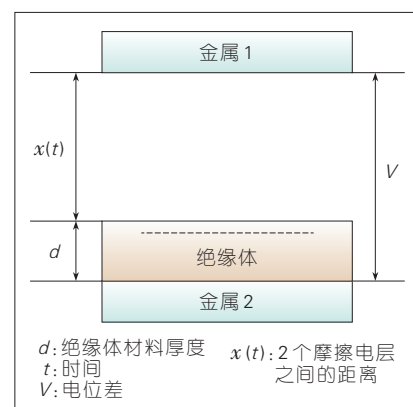
材料、结构、工艺等多方面进一步优化提升器件的输出性能; 另一方面, 面向 TENG 的电源管理电路、信号处理电路、能量存储元件开发等电路开发工作也是实用化的关键环节, 这需要从 TENG 发电的物理过程出发, 建立等效电路模型和仿真, 分析整个系统的输出性能。Niu 等人<sup>[17]</sup>对 TENG 的机理进行了详细分析, 理论与实验结果吻合较好。然而, 在 Niu 的理论中, 摩擦带电是通过指定的现象参数表面摩擦电荷密度( $\sigma_0$ )来考虑的, 仅分析了电场的输出, 忽略了内部高阻损耗, 这并不具有实际的物理意义。本文从接触-分离式 TENG 的物理图像出发, 推导得到等效电路方程和电路模型, 最后我们用 PSpice 实现 TENG 的电学仿真, 为 TENG 开发和优化设计提供理论指导。

### 1 TENG 建模和等效电路方程

在 Niu 的工作中, 我们了解到

TENG 可分为导体-介质型(c-d)和介质-介质型(d-d)2种。其中 c-d 型和 d-d 型 TENG 输出特性具有相同的数学表达式, 以下我们以 c-d 型 TENG 为例进行分析。

如图 1 所示, c-d 型 TENG 的 2 个摩擦电层在外界激励作用下受迫彼此接触, 然后在自身弹力作用下发生分离。2 个摩擦电层之间的距离设为  $x(t)$ 。2 个摩擦层接触后, 忽略表面电



▲ 图1 导体-介质(c-d)型摩擦纳米发电机的物理模型

收稿日期: 2018-07-18  
网络出版日期: 2018-10-15



荷的衰减影响,摩擦电层的内表面将产生电量相同、电性相反的静电荷(摩擦电荷),因此也具有相等的电荷密度。有研究表明:摩擦电荷量在2~3个周期趋于稳定<sup>[18]</sup>,故电荷密度 $\sigma$ 为常数。当2个摩擦电层开始彼此分离时,随着距离增加,2个电极之间产生了电位差 $V$ 。绝缘材料厚度为 $d$ ,介电常数为 $\varepsilon_0$ 。

通常 TENG 的金属电极的面积大小 $S$ 比发电机在外力作用下的分隔距离 $x$ 大几个数量级,因此可以假设2个金属极板为无限大平行极板。在这种条件下,金属电极上的电荷将均匀地分布在2种金属的内表面上,在电介质和空气间隙内,忽略其边缘效应,电场可视作匀强电场,电场方向为仅具有垂直于表面的方向的分量。由当上极板纵向移动时,因摩擦面为绝缘介质,通过静电感应实现电荷的转移。现假设转移电荷量为 $Q_i$ ,此时电阻两端电压为 $V_R$ 。因聚二甲基硅氧烷(PDMS)的相对介电常数 $2 < \varepsilon_r < 3$ ,且 $d < x(t)$ ,故我们可以近似认为 $d/\varepsilon_r = d$ 。

由静电学基本定理,可求出空气间隙电势,如式(1):

$$U_{air} = \frac{\sigma S - Q_i}{S \cdot \varepsilon_0} x(t) \quad (1)$$

摩擦层和金属电极之间的电场强度:

$$E2 = \frac{1}{d}(V_{air} - V_R) \quad (2)$$

由 $\sigma = \varepsilon E$ 可得:

$$Q_i = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \left( -\frac{Q_i}{S} + \sigma \right) \cdot x(t) - V_R \quad (3)$$

将式(3)整理可得:

$$Q_i = \frac{S}{d} (\sigma x(t) - \varepsilon_0 V_R) \quad (4)$$

流经外部电阻 $R$ 的电流为:

$$i = \frac{dQ_i}{dt} \quad (5)$$

将式(4)带入式(5)可得:

$$i = \frac{S}{(d+x(t))^2} \left[ \sigma dx'(t) - \varepsilon_0 [d+x(t)] \frac{dV}{dt} + \varepsilon_0 V_R x'(t) \right] \quad (6)$$

由欧姆定律可知 $i = V/R$ ,带入式(6),整理可得:

$$\frac{\varepsilon_0 S}{d+x(t)} \cdot \frac{dV}{dt} + \left( \frac{1}{R} - \frac{S \varepsilon_0 x'(t)}{(d+x(t))^2} \right) V_R = \frac{S \varepsilon_0 x'(t)}{(d+x(t))^2} \cdot \frac{\sigma d}{\varepsilon_0} \quad (7)$$

$$\text{令 } C(t) = \frac{\varepsilon_0 S}{d+x(t)}, V_i = -\frac{\sigma d}{\varepsilon_0},$$

带入式(7)可得:

$$\frac{dV_R}{dt} + \left( \frac{1}{RC} + \frac{1}{C(t)} \cdot \frac{dC(t)}{dt} \right) V_R + \frac{V_i}{C(t)} \cdot \frac{dC(t)}{dt} = 0 \quad (8)$$

TENG 工作时,电极做纵向运动,由于电极距离变化,导致其电容量发生变化,从而在外电路中产生电流,整个等效电路如图2所示,由带直流电源的可变电容和可变电阻来等效模拟。其中,直流电源 $V_i$ 是由绝缘层表面电位引入的等效直流电源, $r$ 为电源限流电阻,其值与电路结构有关, $R_p$ 为等效内阻, $C_r$ 为隔直电容。

## 2 TENG 等效电路 PSpice 仿真分析

上述分析中我们已经得到如图2所示的 TENG 等效电路,但在 PSpice 库中并不存在随时间变化的非线性可变电阻和非线性电容。接下来我们需要构建可变电阻和可变电容器件的 PSpice 模型,以实现 TENG 等效

电路的 PSpice 仿真分析。

### 2.1 可变电阻的 PSpice 模型

构造非线性时变元件的 PSpice 模型必须解决好2个问题:首先,必须做出非线性时变元件的非线性特性曲线,并求出表达该曲线的逼近多项式的数学表达式,即进行曲线拟合工作;然后,根据曲线拟合的结果构造出 PSpice 程序能识别的非线性时变元件的模型拓扑结构,即等效电路。

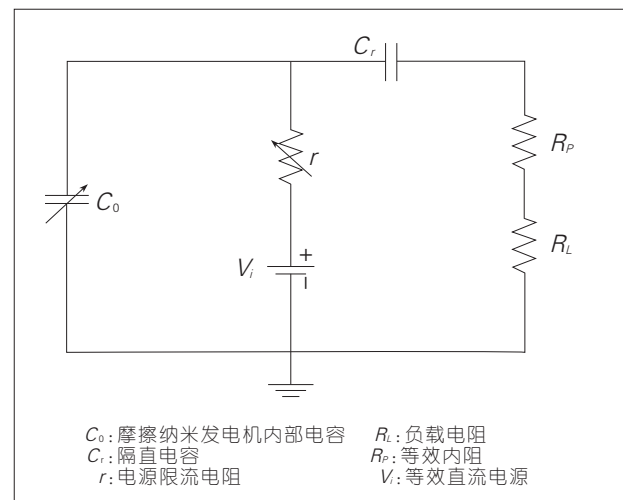
对于可变电阻,可用如图3电路拓扑结构来模拟。图中 $v_i(t)$ 是随时间变化的电压源, $v(t)$ 是固定电阻 $R$ 两端的瞬时电压值; $E_R$ 是一个受 $v(t)$ 和 $v_i(t)$ 双电压源控制的电压源, $E_R = v(t)f[v_i(t)]$ ;  $R_i$ 是 PSpice 源程序的需要,在 $v_i(t)$ 两端并入的常值电阻; $R(t)$ 为从2-0端口看入的等效电阻;流过固定电阻 $R$ 的电流为 $i(t) = v(t)/R$ 。则有:

$$R(t) = \frac{V_{\Sigma}}{i(t)} = \frac{v(t) + E_R}{i(t)} = \frac{v(t) + v(t)f[v_i(t)]}{v(t)/R} = R[1 + f[v_i(t)]] \quad (9)$$

显然 $R(t)$ 是由固定电阻 $R$ 和电压源 $E_R$ 控制的可变电阻。

对于 TENG,设限流电阻 $r$ 是与结构有关的大值电阻,当 TENG 电路的极板距离做微小的周期变化时, $r$ 简化处理为: $r(t) = R + r \sin(\omega t) = R[1 + r/R \sin(\omega t)]$ ,此即是可变电阻 $r(t)$ 的电阻值

图2 摩擦纳米发电机等效电路示意图





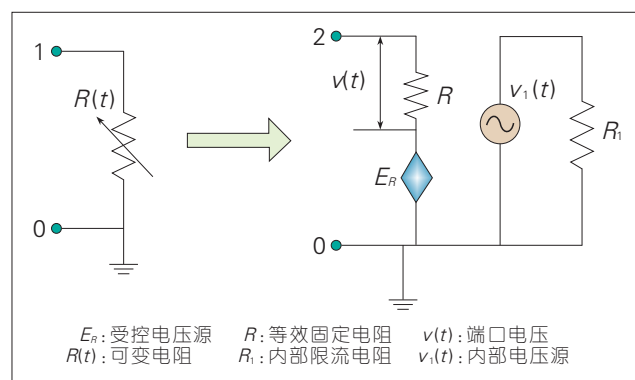


图3  
可变电阻的PSpice模型

非线性特性曲线。为构造 PSpice 程序能识别的非线性时变元件的模型拓扑结构，令左端的 $R_i=1$ ， $v_i(t)$ 为幅度为 $r/R$ ，频率为 $\omega$ 的交流电压源，则 $R_i$ 两端的电压值为：

$$v_i(t) = \frac{r}{R} \sin(\omega t), \quad (10)$$

则2-0端口的等效电阻为：

$$r(t) = R + r \sin(\omega t) = R[1 + \frac{r}{R} \sin(\omega t)]. \quad (11)$$

## 2.2 可变电容的PSpice模型

对于可变电容，其构造如图4所示：图中 $v_i(t)$ 是随时间变化的独立电压源， $v(t)$ 是端口2-0两端的瞬时电压值； $C$ 是等效模型中恒定电容； $E_R$ 是一个受 $v(t)$ 和 $v_i(t)$ 双电压源控制的电压源， $E_R = v(t)f[v_i(t)]$ ，其中 $f[v_i(t)]$ 是独立时变电压源的多项式函数； $R_i$ 是根据PSpice源程序的需要，在 $v_i(t)$ 两端并入的常值电阻； $C(t)$ 为从2-0端口看入的等效电容值。端口2-0间的积累的电荷总量与固定电容 $C$ 上积累的电荷总量相等，故有 $Q = C \times V_c(t) = C(t) \times v(t)$ ，而 $V_c(t)$ 是固定电容 $C$ 两端的电压值：

$$v_c(t) = v(t) - E_c = v(t) - v(t)f[v_i(t)] = v(t)(1 - f[v_i(t)]). \quad (12)$$

因此有：

$$C(t) = \frac{C \cdot v_c(t)}{v(t)} = C(1 - f[v_i(t)]). \quad (13)$$

我们首先对可变电容部分做模拟。通过有限元法模拟分析，文献[19]给出了图4中的电路电容值的经

验公式：

$$C(x) = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} + \left( \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2} \right) \times \cos\left(\frac{2\pi x}{b}\right), \quad (14)$$

其中 $x = X \sin(\omega t)$ ， $X$ 是振幅。若是电路的电容值 $C(t)$ 可表示成随时间变化的函数，则可进行泰勒展开。如图5所示，为了在PSpice中模拟电容值 $C(t)$ ，对式(14)逼近多项式的数学表达式中余弦函数做泰勒展开，并取前4项做为近似。

## 2.3 等效电路仿真验证

综合可变电容和可变电阻的

PSpice模型，最终得到 TENG 的仿真电路图，如图6a)所示。其中电流源 $I_1$ ，电阻 $R_2$ 、 $R_0$ 和电压控制的电压源 $E_2$ 构成可变电阻的模型电路，电压控制的电流源 $G_2$ ，电阻 $R_1$ 、 $R_3$ ，电流源 $I_1$ ，固定电容 $C_1$ 和电压控制的电压源 $E_1$ 构成可变电容的模型电路，直流电源 $V_i$ 是由于表面电位引入的等效直流电源， $R_i$ 为外接电阻， $R_p$ 为等效内阻， $C_d$ 为隔直电容。

根据我们实际制备的摩擦纳米发电机的输出性能测试结果，当负载电阻 $R_L=60 \text{ M}\Omega$ 时，TENG达到最大输出功率，因此设定电路的等效内阻 $R_p=60 \text{ M}\Omega$ 。当 $R_L=60 \text{ M}\Omega$ ，有 $R_L=R_p$ ，满足电路的输出功率最大的条件。由于电路限流电阻 $R_0$ 是额外引入的元件，通过电阻值扫描的方法来确定其值，最终定在 $R_0=10 \text{ k}\Omega$ 时，等效电路能最佳地模拟原电路的电学性能。我们制备和测试 TENG 实际参数如表1所示。根据表1中参数及式(8)、(9)，我们可以得到元件参数，并能够进行仿真，仿真的具体结果如

图4  
可变电容的PSpice模型

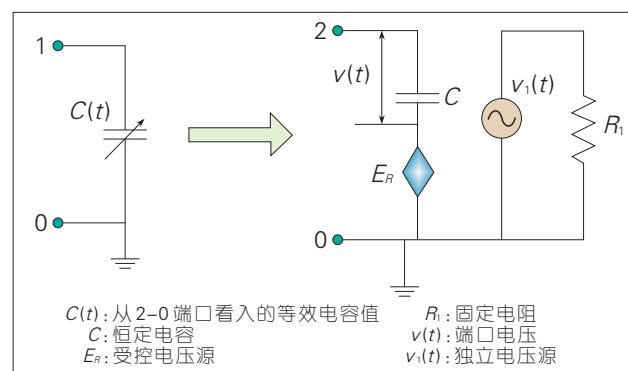
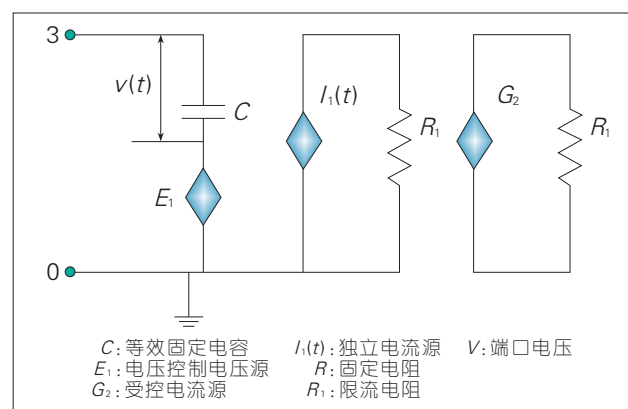
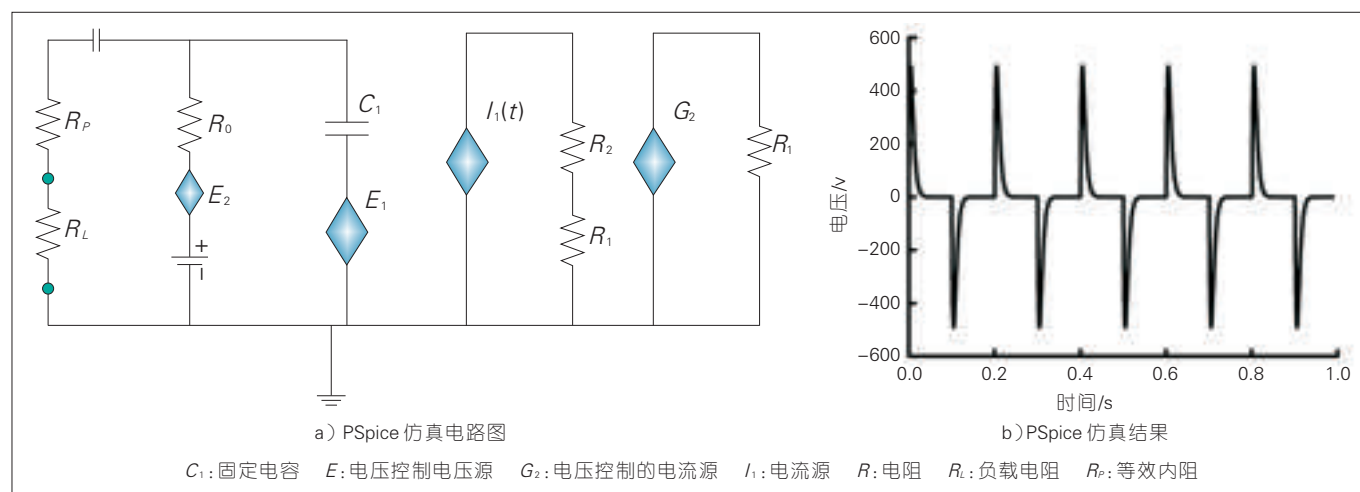


图5  
可变电容的等效电路拓扑结构图





▲ 图6 摩擦纳米发电机的 PSpice 仿真

▼ 表1 TENG 实际运行参数

参数项	介质层厚度/m	金属板面积/ $\text{cm}^2$	摩擦层表面电荷密度/ $\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	最大分离距离/m	外界激励周期/Hz
参数值	$2 \times 10^{-4}$	36	16	0.02	5

图6 b)所示。

#### 2.4 模型仿真与实验对比

我们搭建了实测 TENG 输出特性的平台,该平台提供可控频率、压力的外界激振信号,如图7所示。测试平台共由3个部分构成:第1部分为可控信号源输出系统,由 RIGOL 公司 DG1022U 型号的信号发生器和 SINOCERA 公司 YE6872A 型号的功率放大器组成;第2部为可控激振系统,由 SINOCERA 公司 JKZ-20 型号的激振器组成;第3部分为纳米摩擦发电机的输出信号测试系统,由 RIGOL 公司 DS1102E 型号的数字示波器组成,其探头阻抗为  $100\text{ M}\Omega$ 。我们通过示波器来测试摩擦纳米发电机的输出电压特性。

将 TENG 的实测输出特性和等效电路 PSpice 仿真曲线对比分析,如图8所示。从图中可见:输出电压为正极性时,拟合较为相似;输出电压为负极性时,拟合不佳。这是由于仿真和实测中, TENG 的压缩和回弹2个过程的速率不同。在实测中由稳定控制的外界激励压缩 TENG 的2个电

极,而回弹过程主要靠电极材料本身的弹力,这2个过程中电极移动的速率是不同的;而在仿真过程中,这2个过程中电极移动的速率则是相同的。若要更加精准地修正仿真模型,

则需要在仿真中加入一个衰减速度  $v$  来近似逼近。但从对比分析来看:2条特性曲线具有良好的重叠,这已经充分说明了 TENG 等效电路模型的正确性。

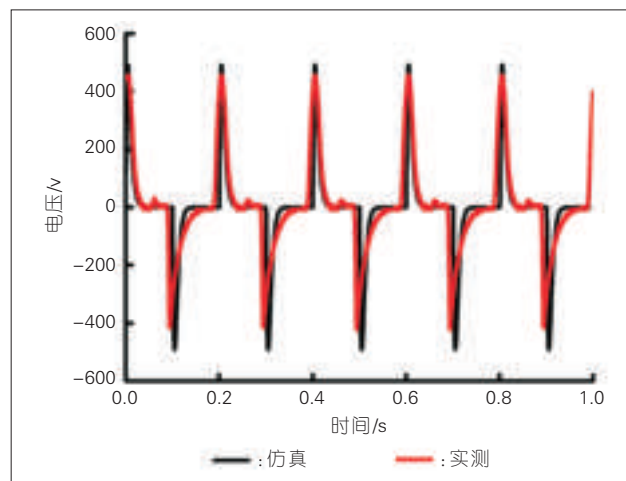
### 3 结束语

本文介绍了摩擦纳米发电机的基本理论,分析了分离-接触型摩擦纳米发电机发电机理,并根据  $V-Q-x$

图7  
摩擦纳米发电机测试平台



图8  
仿真与实测波形



分析得到了发电机输出控制方程,结合发电过程的实际物理意义,创造性地建立了TENG等效电路模型,同时还对等效电路进行了PSpice仿真分析,最后通过仿真和实验结果的对比分析验证了等效电路的正确性。该项工作对后续TENG的发电机理论分析、能量管理电路开发等工作提供了理论依据和实际物理模型。

#### 参考文献

- [1] WANG J, SHI Z F, XIANG H J, et al. Modeling on Energy Harvesting from A Railway System Using Piezoelectric Transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(10): 105017. DOI: 10.1088/0964-1726/24/10/105017
- [2] YANG R S, QIN Y, DAI L M, et al. Power Generation with Laterally Packaged Piezoelectric Fine Wires [J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4(1): 34-39. DOI: 10.1038/nnano.2008.314
- [3] XU S, QIN Y, XU C, et al. Self-Powered Nanowire Devices [J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(5): 366-373. DOI: 10.1038/nnano.2010.46
- [4] CHANG C, VAN H T, WANG J B, et al. Direct-Write Piezoelectric Polymeric Nanogenerator with High Energy Conversion Efficiency [J]. Nano Letters, 2010, 10(2): 726-731. DOI: 10.1021/nl9040719
- [5] BEEBY S P, TORAH R N, TUDOR M J, et al. A Micro Electromagnetic Generator for Vibration Energy Harvesting [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(7): 1257-1265. DOI:10.1088/0960-1317/17/7/007
- [6] KOUKHARENKO E, BEEBY S P, TUDOR M J, et al. Microelectromechanical Systems Vibration Powered Electromagnetic Generator for Wireless Sensor Applications [J]. Microsystem Technologies, 2006, 12(10/11): 1071-1077. DOI: 10.1007/s00542-006-0137-8
- [7] 杨刚, 岳振星, 李龙土. 压电陶瓷场致疲劳特性与机理研究进展[J]. 无机材料学报, 2007, 22(1): 1-6. DOI:10.3321/j.issn:1000-324X.2007.01.001
- [8] 刘海峰, 田时, 谢军. 压电陶瓷电疲劳研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(6):1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2000.06.001
- [9] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible Triboelectric Generator[J]. Nano Energy, 2012, 1(2): 328-334. DOI:10.1016/j.nanoen.2012.01.004
- [10] WANG S, LIN L, WANG Z L. Nanoscale Triboelectric-Effect-Enabled Energy Conversion for Sustainably Powering Portable Electronics [J]. Nano Letters, 2012, 12(12): 6339-6346. DOI: 10.1021/nl303573d
- [11] LIN L, WANG S H, XIE Y N, et al. Segmentally Structured Disk Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Rotational Mechanical Energy [J]. Nano Letters, 2013, 13(6): 2916-2923. DOI:10.1021/nl4013002
- [12] ZHU G, LIN Z H, JING Q S, et al. Toward Large-Scale Energy Harvesting by Ananoparticle-Enhanced Triboelectric Nanogenerator [J]. Nano Letters, 2013, 13(2): 847-853. DOI:10.1021/nl4001053
- [13] WANG Z L. Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors[J]. Acs Nano, 2013, 7(11): 9533. DOI: 10.1021/nn404614z
- [14] XIE Y, WANG S, NIU S, et al. Grating-Structured Freestanding Triboelectric-Layer Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy at 85% Total Conversion Efficiency [J]. Advanced Materials, 2014, 26(38):6599-6607
- [15] ZHU G, CHEN J, ZHANG T J, et al. Radial-Arrayed Rotary Electrification for High Performance Triboelectric Generator [J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 3426. DOI:10.1038/ncomms4426
- [16] ZHU G, ZHOU Y S, BAI P, et al. A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification [J]. Advanced Materials, 2014, 26(23): 3788-3796. DOI:10.1002/adma.201400021
- [17] NIU S M, WANG Z L. Theoretical Systems of Triboelectric Nanogenerators [J]. Nano Energy, 2015, 14: 161-192. DOI:10.1016/j.nanoen.2014.11.034
- [18] ZI Y L, NIU S M, WANG J, et al. Standards and Figure-of-Merits for Quantifying the Performance of Triboelectric Nanogenerators [J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 8376. DOI: 10.1038/ncomms9376
- [19] STERKEN T, ALTENA G, FIORINI P, et al. Characterisation of an Electrostatic Vibration Harvester [EB/OL]. [2018-07-18]. [http://www.academia.edu/6081850/Characterisation\\_of\\_an\\_Electrostatic\\_Vibration\\_Harvester](http://www.academia.edu/6081850/Characterisation_of_an_Electrostatic_Vibration_Harvester)

#### 作者简介



**魏子钧**, 中国移动通信有限公司研究院绿色通信技术研究部研究员; 主要从事从材料、工艺、器件等层面开展绿色能量收集和节能技术研究; 已发表论文2篇, 专利2篇。



**耿来鑫**, 北京交通大学电气工程学院牵引供电研究所读硕士研究生; 主要从事微弱能量收集及其应用技术的研究; 发表学术论文2篇, 专利1篇。



**边森**, 中国移动通信有限公司研究院绿色通信技术研究部高级技术经理; 主要从事无线网络能量效率的提升, 包括 RAN 的资源休眠机制、热控制技术; 已发表学术论文10余篇, 专利16篇。

# 绿色通信:如何“笑”到最后

## Green Communications: How to "SMILE" (Send More Information Bits with Less Energy)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0040-003

**摘要:** 绿色通信的研究应从能量的“节流”和“开源”2个方向同时展开,其中节流最有效的手段来自网络覆盖层,即通过引入超蜂窝的网络架构实现控制覆盖与业务覆盖的解耦,使得业务基站有更多的休眠机会,从而大幅度提高网络的能量效率。开源的最有效手段是大量引入可再生能源,通过高效地利用可再生的能量降低电网的能耗,从而提高网络整体的能量效率。无论采用哪种手段,其核心技术挑战将是如何实现信息流与能量流的智能匹配,这既是未来绿色通信能够“笑”(SMILE: Send More Information bits with Less Energy)到最后的关键,也催生出了一个全新的交叉学科领域,即能量信息学。

**关键词:** 绿色通信; 可再生能源; 能量信息学

**Abstract:** The researches on green communications can be divided into two major approaches: one is by saving energy and the other is by exploiting renewable energy. For the energy-saving approaches, the most effective way comes from the network coverage layer by decoupling the traffic serving coverage from the control signaling coverage so that the traffic base stations have more opportunities to sleep (and therefore bring a great amount of energy savings) with the coverage guarantee by control base stations. This is so-called hyper-cellular architecture. For the renewable-energy exploiting approaches, the key is to adaptively match the information flows to the energy flows and vice versa, which is extremely hard because both the information flows and energy flows are highly dynamic. These are not only the core parts of the SMILE (Send More Information bits with Less Energy) for green communications, but also open up a new research fields called energy informatics.

**Key words:** green communications; renewable energy; energy informatics

牛志升/NIU Zhisheng

(清华大学, 北京 100084)  
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

限(尽管毫米波、太赫兹等高频段可以提供更大的带宽,但其巨大的传输损耗以及由此引发的频繁越区切换将很大程度上抵消掉大带宽所带来的好处),上述问题则转换为:如何能够使用更少的能量来传输更多的信息,即我们如何才能“笑”(SMILE: Send More Information bits with Less Energy)到最后?

如果我们继续从移动通信的基础理论,即香农公式出发,看上去是不可能的,因为香农公式告诉我们:要想提高传输容量,要么需要更大的带宽或是更大的空间自由度,要么需要大幅度提高信噪比,即提高发射功率。由此可见:要想笑到最后,首先必须要跳出物理层的范畴,从网络层或是系统层寻找解决方案。其中一个解决方案是改造目前的蜂窝网络架构,通过控制覆盖和业务覆盖的逻辑分离与解耦,构建一个由永远在线的控制覆盖和按需部署的业务覆盖构成的超蜂窝网络新架构<sup>[1]</sup>,在保证蜂窝网络无缝覆盖和频谱效率的同时,引入业务基站的动态休眠和资源调度,从而大幅度降低整体能耗。该解决方案的核心是能量的“节流”,即通过减少蜂窝网络中的能量浪费来

各种信息技术,特别是遍布于地球各个角落的通信与网络基础设施,在经历了几十年高速发展之后都逐渐遇到了能耗的瓶颈,其快速增长的自身能耗也已演变为全球气候变暖的元凶之一。以移动通信网络为例,通过从1G到4G的技术进步已经使得网络容量增长了100万倍以

上,各种丰富多彩的移动业务也已经大幅度地改变了人类的生活方式。但各种预测均显示:随着全息媒体和万物互联时代的到来,未来5~10年人们对移动网络容量的需求仍将呈现指数增长的态势,相应地,其自身的能耗瓶颈也会越来越凸显。由此引出了一个非常基础性的科学问题:在频谱与能量资源双双受限的情况下,如何进一步大幅度提高网络容量?由于频谱资源只能是越来越受

收稿日期: 2018-08-15  
网络出版日期: 2018-10-22



提高能量效率,解决了传统蜂窝架构的绿色可持续发展问题。这是蜂窝网络架构在过去40多年来的第一次重大转变,并有望成为5G及其后续演进的关键技术。

另外一个解决方案则是源于能量“开源”的思路,通过引入能量收割技术,从而大幅度降低实际电网的能耗。能量收集技术是一种新兴的绿色能源技术,它可直接把环境中的可再生能源,例如:风能、太阳能、机械能、电磁场辐射等直接转化为电能,某种意义上讲是一种“取之不尽、用之不竭”的新能源。同时,随着智能电网技术和电池储能技术的飞速发展,可再生能源的存储和利用效率大大提高,能量收集技术已步入实用阶段,并逐步应用到了各种信息系统中,例如:传感器网、蜂窝通信网等。可以预见:未来信息系统的供电模式将日趋多样化,甚至会出现完全依赖于可再生能源的自供电信息系统,这不仅可大幅降低信息系统对传统电网的依赖,而且可以减少布线需求和运维成本。特别是针对基站超密集部署的超密集组网(UDN)和分布式多输入多输出(MIMO)移动通信系统,其广泛部署的小基站或是天线前端很有可能无法或是难以直接连接到电网,需要完全依赖于可再生能源供电。

为了更好地用好可再生能源,必须要解决好能量供给随机性的问题。在传统电网供电的移动通信中,能量供给是稳定的,研究人员主要面对的是业务需求的随机性和传输信道的随机性问题;而在可再生能源供电的移动通信系统中,除了上述两种随机性之外,需要同时面对能量供给的随机性。为此,我们需要扩展传统绿色通信的内涵,即仅仅关注能量效率是远远不够的,需要同时关注能量持续性指标。该指标包含能量中断和能量溢出2个层面,前者意指虽有信息服务的需求但却没有足够能量供给所导致的服务中断现象,后者则

指由于能量缓存容量的限制,虽有充足的能量供给但却没有相应的信息服务需求,从而导致的能量溢出现象。很显然,这2种现象都是需要尽量避免的,即应该尽量做好能量流与信息流的实时匹配,从而在保证信息服务稳定性的前提下尽量提高可再生能源的利用率,这实际上是能量信息学的核心,也是可再生能源供给信息系统的核心挑战所在。为此,我们需要回归原点,从根本上思考一下能量与信息之间的理论关系。

众所周知,宇宙是由物质、能量和信息3个基本要素组成的,其中物质是本源的存在,没有物质,什么也不存在;能量是运动的存在,没有能量,什么也不会发生;信息则是联系的存在,没有信息,任何事物都没意义。经典牛顿力学的理论告诉我们:在封闭的物理世界中物质总量是守恒的,能量也是守恒的;爱因斯坦进一步揭示了物质与能量之间的理论关系,即物质与能量之间是可以相互转换的,且总量守恒,即著名的物质能量守恒公式 $E=mc^2$ 。但能量和信息之间是否也可以相互转换、且遵循某种守恒定律呢?这个问题迄今为止没有任何明确的结论。

为了回答上述问题,我们需要重新思考一下信息与物质和能量的不同。根据维纳和香农的定义,信息是对事物运动状态或存在方式不确定性的描述,它与物质和能量有着本质的区别,即它可以在不损失任何信息的前提下被无限地复制,也就是说信息本身并不守恒。同时,最近已有实验展示:信息与能量之间的确可以互相转换,但应该不守恒,因为使用同样的能量可以传递更多的信息比特(如使用多播或是广播机制);相反,在没有传输任何信息比特的情况下也有可能消耗能量(如空转的服务器)。可见,由于信息本身的不守恒特性导致了信息与能量转换之间的非守恒特性,这实际上为进一步提高网络的能量效率提供了理论依据,即

我们的确可以使用更少的能量传输更多的信息比特,即SMILE是完全可行的。

那么究竟该如何笑(SMILE)到最后呢?基本上这是一个信息流如何与能量流更好地匹配的问题。一方面,我们可以让能量流更好地去适配信息流,即在需要传输更多信息时分配更多的能量,反之则分配更少的能量。这在传统电网供电的信息系统中是比较容易实现的,但在可再生能源供电的信息系统中将面临巨大的挑战。虽然可以通过调控能量缓存器的充放电来解决,但如何做到时间尺度的实时匹配以及空间维度的动态调度是问题的难点。另一方面,我们也可以让信息流更好地去适配能量流,即能量供给比较充足时可以传输更多的信息,比如引入缓存与推送机制,通过对用户需求的预测计算出用户的潜在需求,在能量充足时进行推送或缓存。这可以形象地比喻为“将明天的工作放到今天来做: do tomorrow's job today”;反之,在能量供给不足时则可以减少信息的传递,比如只提供最基本的信息服务,而推迟提供增强服务,直至能量变得更加充足,或是将任务卸载到一些能量充足的基站。这可以形象地比喻为“将今天的任务留给明天: do today's jobs tomorrow”<sup>[2]</sup>。

总之,绿色通信的研究应从能量的节流和开源2个方向同时展开,其中节流最有效的手段来自网络覆盖层,通过引入超蜂窝的网络架构实现控制覆盖与业务覆盖的解耦,使得业务基站有更多的休眠机会,从而大幅度提高网络的能量效率。而开源的最有效手段是大量引入可再生能源,通过高效地利用可再生的能量降低电网的能耗,从而提高网络整体的能量效率。但无论采用上述哪种手段,其核心技术挑战将是如何实现信息流与能量流的智能匹配,这既是未来绿色通信能够笑(SMILE)到最后的关键,也催生出了一个全新的交叉学

科领域,即能量信息学:Energy Informatics for Smart Interaction of Energy and Information (Einstein)。通过对能量与信息之间相互作用机理的深入研究,希望能够建立起类似于爱因斯坦物质与能量转换关系的理论,其核心可以概述为2个不等式,即  $\text{Energy} + \text{Information} < \text{Energy}$  和  $\text{Information} - \text{Energy} > \text{Information}$ ,其中前者意指现有的能量系统(如交通、建筑、制造业等任何需要消耗能量的系统)如何通过引入更多的环境信息来使其更加节能;后者则意指现有的信息系统(如互联网、移动通信

等)如何以更少的能量传递更多的信息?这是本期专刊的目的所在,也是支撑我们能够笑(SMILE)到最后的理论基础。

## 参考文献

- [1] 牛志升,郑福春,杨晨阳,等. 基于超蜂窝架构的绿色通信专刊编者按[J]. 中国科学:信息科学, 2017,47(5):527-528
- [2] ZHOU S, GONG J, ZHOU Z Y, et al. GreenDelivery: Proactive Content Caching and Push with Energy-Harvesting-Based Small Cells [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 142-149. DOI: 10.1109/mcom.2015.7081087

## 作者简介



牛志升,1985年毕业于北方交通大学,1989年和1992年分别获日本丰桥技术科学大学硕士和博士学位,1992—1994年就职于日本富士通研究所,1994年回清华大学电子工程系任教至今,担任电子信息通信学会(IEICE) Fellow 和国际电气电子学会(IEEE) Fellow,并为国家重点基础研究发展(“973”)计划项目“能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统基础研究”(2012—2016年)首席科学家;主要研究方向包括通信话务理论、排队论、通信网络的流量控制与性能分析、无线网络的资源分配及跨层优化、通信与广播融合网络、绿色通信与网络等;曾获得 IEEE 通信学会亚太区2013年度“最佳论文奖”。

## 专题预告

## 《中兴通讯技术》2019年专题计划

期次	专题名称	策划人
1	5G 商用支撑理论及关键技术	中兴通讯股份有限公司 CTO 王喜瑜
2	云网一体化技术	中国联通网络技术研究院首席专家 唐雄燕
3	边缘计算技术及其应用	清华大学教授 郑伟民 佐治亚州立大学教授 潘毅
4	5G 通信安全技术	清华大学教授 李军
5	新型光互连与光接入技术	北京大学教授 李红滨
6	5G 通信系统示范应用	中国信息通信研究院科技委主任 蒋林涛

# 无线数据与能量协同传输技术: 编码与调制设计

## Simultaneous Wireless Information and Power Transfer: Coding and Modulation Design

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0043-004

**摘要:** 利用射频(RF)信号的远场传输特性,无线数据与能量协同传输技术(简称为无线数能同传)(SWIPT)可以将数据与能量通过同一无线射频信号传输到通信设备,从而同时满足设备的通信与用能需求。该技术的实现需要从硬件方面对无线射频电路、收发天线以及电磁波束重新设计以提升无线能量传输(WPT)的效率,另一方面也需要在信息和通信理论方面取得突破,实现编码和调制级别的SWIPT控制。

**关键词:** RF WPT; SWIPT; 编码与调制

**Abstract:** Thanks to the far-field transmission characteristics, radio frequency (RF) signals can be relied upon for realising simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT). Thus, both the communication and charging requests of devices are satisfied. In order to make SWIPT a reality, wireless RF circuits have to be redesigned for improving the efficiency of wireless power transfer (WPT). The breakthrough in the classic information and communication theory has to be achieved in order to control SWIPT in both coding and modulation levels.

**Key words:** RF WPT; SWIPT; coding and modulation

胡杰/HU Jie<sup>1</sup>  
金石/JIN Shi<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学, 四川 成都 611731;  
2. 东南大学, 江苏 南京 210096)  
(1. University of Electronic Science and  
Technology of China, Chengdu 611731,  
China;  
2. Southeast University, Nanjing 210096,  
China)

### 1 未来通信设备能量危机 及解决方案

在即将到来的物联网时代,无线通信网络需要满足未来大规模机器类通信需求。广泛部署的低功耗机器类通信设备(例如:传感器、智能电网、共享单车等)的数据接收、数据采集、数据上传等操作依赖于自身配备的电池;但有限的电池容量极大制约了该类通信设备的使用寿命,更换电池提升了网络运营商的运营成本,依赖于化学储能的电池也会对环境造成有害影响。因此,无线自供电

通信网络的出现可以从根本上解除低功耗通信设备对传统电池的依赖。

在无线自供电通信网络中,能量的来源多样化。低功耗通信设备可以从太阳能、风能等可再生能源采集能量来支持自身操作<sup>[1]</sup>。然而可再生能源的采集极大地依赖周围环境,例如:在阴雨天气、夜间或者植被覆盖丰富的地区,光照严重不足,通信设备并不能获取足够的太阳能以支持自身操作。此外,通信设备也可以采集广泛存在于周围环境中的射频信号能量。各种类型的射频信号发射机广泛部署于周边环境,例如:广播电视发射塔、音频广播服务发射塔、蜂窝通信基站、Wi-Fi接入热点等。这些发射机发射的信号广泛分

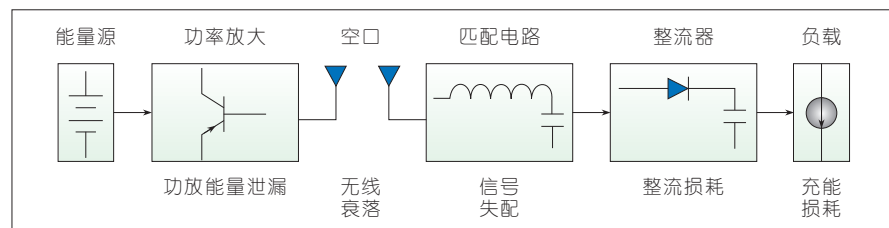
布于 300 MHz ~ 300 GHz 的射频频段。通信设备装配相应的射频能量采集装置,就可实现对周边射频信号能量的获取。但环境中的射频(RF)能量密度只有 0.0002~1 Mw/cm<sup>2</sup>,只能支撑一些较长工作周期的通信设备。为了克服能量在时间空间分布的不均匀性,可以采取主动控制的无线能量传输(WPT)技术,实现对低功耗通信设备的无线充电,如:电感耦合技术<sup>[2]</sup>、磁感耦合技术<sup>[3]</sup>,以及射频传能技术<sup>[4]</sup>等。值得注意的是:电感耦合和磁感耦合技术只适应于收发机之间距离小于 2 m 的近场能量传输。在无线自供电通信网络中,射频传能技术更加适合于为处于远场位置(大于 2 m)的低功耗通信设备进行能量补充。

### 2 无线射频能量传输

一条完整的无线射频能量传输链路如图 1 所示。在发射端能量源提供的直流能量通过功率放大器以射频信号的形式从天线发出,经过无线信道的传输到达接收天线后,射频

收稿日期: 2018-07-20  
网络出版日期: 2018-10-18





▲ 图1 无线射频能量传输链路

信号携带的交流能量由匹配电路和整流器转化为直流能量。直流能量经过充能管理电路完成对储能单元的充电操作或者直接用于驱动用电设备。为了对抗无线能量传输过程中的损耗,需要在不同的模块采用以下应对措施。

(1)无线射频能量传输通常需要较高的射频信号发射功率。若发射功率超过功率放大器的线性工作区间,就会产生功放能量的泄露问题。因此需要开发全固态功率放大器,有效增加功放的线性工作区间,减小功放能量泄露对无线能量传输效率的影响。

(2)无线空口传输损耗会带来射频能量的显著衰减。为克服无线信道的路径损耗,收发机两侧均需要设计高增益定向天线,将射频能量集中在某一个方向发射以提升能量传输效率。接收机一侧也可以采用人造电磁结构以及超表面技术来提升对空间射频能量的采集能力<sup>[5]</sup>。工作于射频频段的艾力波束(Airy Beam)具备非散射特性和自加速特性<sup>[6]</sup>。这些特性使得艾力波束可以在传输过程中实现自治愈和自聚焦,以减少射频能量在传输过程中的损失,提升无线射频能量的传输效率。

(3)由于收发机可能发生的移动,造成接收射频信号的频率与接收机最佳匹配频率之间发生偏移。由此产生的信号失配会造成射频能量的极大损失。因此需要采用宽带匹配电路,对抗频率偏移产生的信号失配影响,提升无线能量的传输效率。

(4)在完美匹配的情况下,整流器具备如下特性:输入的射频信号功

率需要高于某一门限值,其射频能量才可被转换为直流能量。整流器输出的直流电流是关于输入射频信号功率各项系数为正数的多项式函数。因此提升接收射频信号的功率一方面可以有效激活整流器,另一方面也可以提升整流效率<sup>[7]</sup>。

(5)能量管理电路可以起到升压和稳压的作用,以保证用电设备的稳定工作。能量管理电路也可以有效减缓能量存储单元的放电现象,保证能量的存储效率<sup>[8]</sup>。

为有效提升整条无线射频能量传输链路的传输效率,需要对上述各个模块的传能效率进行联合设计和优化。

工业界当前已在无线射频能量传输技术的商用化上取得了进展。Energous WattUp 公司在 5.8 GHz 射频频段利用阵列天线技术实现 4.5 m 范围内的无线射频充电,能量发射机的发射功率至少为 16 W; OSSIA Costa 公司开发的射频能量发射机利用阵列天线技术在 2.8 GHz 频段发射定向能量波束,其充电范围可达 9 m。Powercast 公司提供了一种低功耗射频能量发射设备,在 915 MHz 频段以 3 W 的射频发射功率可在 3 m 的范围内对鼠标、键盘等用电设备进行充电,并在 18~24 m 的范围内对小型传感器设备进行充电。也就是说,无线射频传能正在走向实践。

### 3 全新的数能编码与调制机制

由于同时竞争有限的码字和空口资源,工作在同一射频频段的无线数据传输和 WPT 会对彼此的性能产

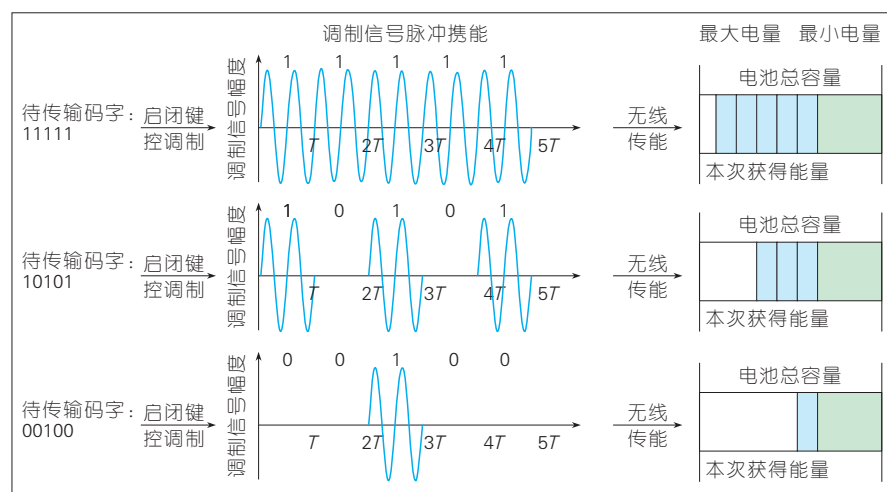
生损害。为实现无线数能的协作传输,需要突破传统的信息与通信理论建立起一套全新的数能编码与调制的相关机制。

#### 3.1 无线数能传输联合编码

编码器将信源产生的消息转化为由二进制比特串构成的码字,使得其可在数字通信系统中进行传输。由二进制符号组成的码字结构可以影响码字的通信性能和传能性能。不同的二进制比特或二进制比特串会被数字调制器映射为不同的符号进行传输。如果采用相移键控等恒包络调制方案,不同比特串形成的符号会产生携带能量相同的符号。在这种情况下,码字结构不会影响其传能性能。如果采用脉冲振幅调制或正交振幅调制等变包络调制方案,那么不同比特串形成携带不同能量的符号。因此控制编码器产生的码字结构,或者控制编码器发出某一具体码字的概率,即可实现对无线能量传输的控制。如果采用最简单的二进制启闭键控(OOK)调制方式,码字中的二进制比特 1 携带能量而比特 0 不携带能量。因此调整码字中比特 1 和比特 0 的数量即可以改变该码字的携能性能,如图 2 所示。

在传统信息论研究中,通过优化信源一侧码字的发射概率可以实现信源和信宿之间的平均互信息量的最大化,从而得到某一具体信道的信息传输极限性能;但为了满足码字传输能量的约束,编码器必需调整信源发出码字的概率。如果码字概率的最优性被破坏,必然使得信息的传输性能下降。当信源编码器只产生全 1 码字时,如采用启闭键控调制,码字会携带最多的能量,但相对应的信息传输能力为 0。因此,从信息论角度出发,可以看到码字的信息传输能力和能量传输能力之间存在制约关系。

通常情况下,传统的信息编码器产生等概率的二进制比特,从而最大化码字的信息传输能力。但是单一



▲图2 基于二进制启闭键控调制的数能联合编码

的码字结构极大地制约了码字的能量传输能力,并不能满足接收机多样化的能量需求。如下的编码器可以实现对码字结构的灵活调整<sup>[10]</sup>:

(1)补偿性能量编码。不携带任何信息的伪比特可以直接链接在信息比特之后使得生成的码字具备能满足某一具体能量需求的结构。这种编码器的编解码方案具备最低的复杂度;但不携带任何信息的伪比特只起到能量补充的作用,会显著降低信息传输的有效性。

(2)逆信源编码。典型的信源编码器将不等概率发送的原始信源消息编成0/1比特等概率出现的二进制比特序列。相反,逆信源编码可将等概率发出的原始信源消息编成0/1比特非等概率出现的二进制比特序列,从而满足序列的无线能量传输需求。但是编码器和解码器之间的异步情形极大地影响接收端解码的有效性。

(3)约束编码。一些约束编码技术具备改变码字结构的自由度,可以实现对无线能量传输的灵活控制。由于该种编码技术并不引入不携带信息的伪比特,因此其信息传输的有效性并不会受到影响。另外,高效的符号级别网格算法可以用于约束编码的相关解码过程,使得其可以在数能编码领域进行广泛应用。典型的

约束编码技术包括游程编码以及一元编码。

在无线数能编码方案的设计中,还可进一步以接收机电池的能量存储状态作为设计依据<sup>[11]</sup>。在无线充电的过程中,一方面为了防止能量的浪费,需要尽可能减小电池中能量的溢出概率;另一方面为了保证接收机的正常工作,需要保证电池中保留的能量要高于最低需求,并尽可能减小电池中能量不足的概率。

### 3.2 无线数能联合调制

收发机两侧装配多天线可以从空间域增加无线数能传输的可用通道,提升无线数能传输的容量。通常情况下,多天线数能发射机的波束要和接收机的信号分割策略进行联合设计,以满足无线数据和能量传输的要求。若发射机发出符合高斯分布的连续信号,那么无线信道的信息传输速率可以被最大化。此时,香农信道容量公式可以用来描述无线数据传输性能。但是基于香农公式得到的收发机波束和信号分割策略与实际数能性能有较大差距。这是因为在一个实际的数能收发系统中,由于调制器的存在,发射符号只能从有限符号中进行选取。在给定符号选取概率的前提下,离散输入信号连续输出信号的平均互信息量可以描述有

限发射符号情形下的数据传输速率。在考虑调制的实际数能收发机设计中,应当以离散输入信号连续输出信号之间的平均互信息量作为衡量无线数据传输性能的标准。当在采用M阶正交幅度调制的情况下,随着发射功率的增长,该速率收敛于 $\log_2 M$  bit/Hz。因此当无线数据传输性能收敛后,更多的功率应当分配给无线能量传输。

当考虑能量接收机的非线性特征时,不同的调制方案具备不同的无线能量传输性能<sup>[11]</sup>。假设能量接收机的激活功率门限为 $P_{th}$ 。只有当接收射频信号功率大于该门限值时,射频信号携带的能量才可以被有效整流为直流能量。图3描述了16阶相移键控、16阶正交幅度调制以及16阶脉冲幅度调制的无线能量传输性能,这3种调制方案均具有相同的平均接收功率。如图3所示,当整流激活门限高于这3种调制方案的平均发射功率时,16阶相移键控的所有符号都会被能量接收机的整流器过滤。经过16阶相移键控调制的符号不能起到能量传输的作用。在16阶正交幅度调制的方案中,尽管有12个符号会被整流器过滤,但仍有4个符号携带的能量可以被接收机获取。16阶脉冲幅度调制具备最佳的能量传输性能,因为同样的整流激活门限下,该种调制方式仍然有8个符号可以实现能量传递。如果接收射频信号的平均功率大于整流激活门限,那么16阶相移键控调制具备最佳的传输性能,因为所有16个调制符号携带的能量都可以被能量接收机获取。对于正交幅度调制和脉冲幅度调制等变包络调制方案,高阶调制在整流激活门限较高时表现较好,而低阶调制在整流激活门限较低时表现更好。同阶调制方案具备相同的频谱利用率(吞吐量),但表现出不同的数据传输可靠性,例如:虽然16阶脉冲幅度调制具备最佳的能量传输性能,但其误比特率性能在同阶调

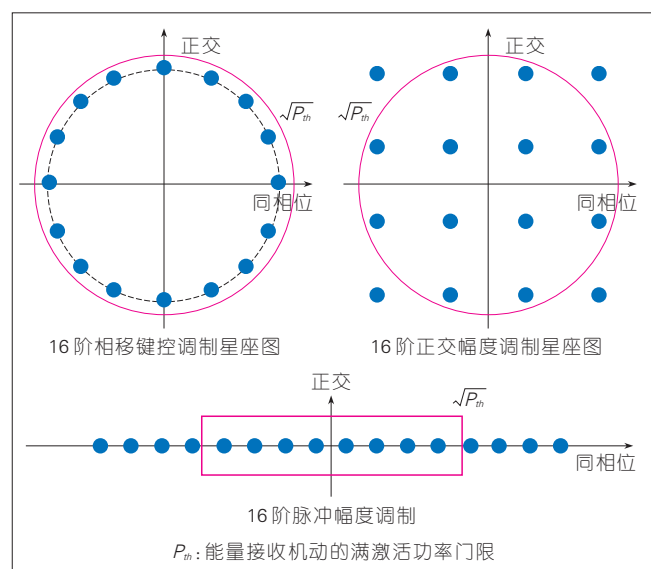


图3  
不同调制方式的传能性能

制方案中最差。因此,需要综合考虑数能用户对吞吐量、可靠性以及传能性能的要求,在不同信道条件下选择最佳的调制方案进行无线数能传输。

通常对于无线数据传输有害的多径衰落反而对于无线能量传输是有益的。信道的反射和散射路径增加后,经过多路径传输的射频信号有更大的机会在接收端进行增益性叠加,从而使得接收射频信号的功率能够有效激活能量接收机的整流功能,促进能量接收。

正是因为不同调制方式呈现出不同的无线能量传输性能,数能发射机需要重新设计一种合理的自适应调制方案,以在不同的无线信道条件下取得数据传输有效性、可靠性以及无线能量传输性能三者之间的权衡。也可设计针对多用户的调制方案,以更好地满足多用户的数能传输需求<sup>[12]</sup>。

## 4 结束语

无线数能同传技术的实现既需要底层射频电路、天线以及电磁波束技术的革新,又需要信息编码与通信调制理论的重构。该技术可以从根本上解决未来5G和后5G时代大规模低功耗设备的通信与供能问题,并首先在无线接入网络中实现数据网

络和供能网络的融合。未来随着电力线通信和以太网供电技术的进一步发展,必将实现数据网络和供能网络的大融合,实现万网归一的愿景。

## 参考文献

- [1] ULUKUS S, YENER A, ERKIP E, et al. Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(3): 360–381. DOI:10.1109/jsac.2015.2391531
- [2] CHOI B H, THAI V X, LEE E S, et al. Dipole-Coil-Based Wide-Range Inductive Power Transfer Systems for Wireless Sensors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3158–3167. DOI:10.1109/tie.2016.2517061
- [3] JIWARIYAVEJ V, IMURA T, HORI Y. Coupling Coefficients Estimation of Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonance Coupling Using Information from Either Side of the System [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 191–200. DOI: 10.1109/jestpe.2014.2332056
- [4] BROWN W C. The History of Power Transmission by Radio Waves [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(9): 1230–1242. DOI: 10.1109/tmtt.1984.1132833
- [5] ALAVIKIA B, ALMONEEF T S, RAMAHI O M. Complementary Split Ring Resonator Arrays for Electromagnetic Energy Harvesting [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(3): 033902. DOI:10.1063/1.4927238
- [6] CHREMMOS I D, FIKIORIS G, EFREMDIS N K. Accelerating and Abruptly-Autofocusing Beam Waves in the Fresnel Zone of Antenna Arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(10): 5048–5056. DOI:10.1109/tap.2013.2274261

- [7] CLERCKX B. Wireless Information and Power Transfer: Nonlinearity, Waveform Design, and Rate-Energy Tradeoff [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(4): 847–862. DOI:10.1109/tsp.2017.2775593
- [8] HWANG Y S, WANG S C, YANG F C, et al. New Compact CMOS Li-Ion Battery Charger Using Charge-Pump Technique for Portable Applications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2007, 54(4): 705–712. DOI:10.1109/tcsi.2007.890605
- [9] BABAR Z, MOHD I M A, NGUYEN H V, et al. Unary-Coded Dimming Control Improves ON-OFF Keying Visible Light Communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(1): 255–264. DOI: 10.1109/tcomm.2017.2759271
- [10] HU Jie, ZHAO Y Z, YANG K. Modulation and Coding Design for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer [J]. IEEE Communication Magazine, 2018
- [11] ZHAO Y Z, HU J, DING Z G, et al. Constellation Rotation Aided Modulation Design for the Multi-User SWIPT-NOMA [C]// Proceedings of IEEE ICC 2018. USA: IEEE, 2018

## 作者简介



**胡杰**, 电子科技大学信息与通信工程学院副教授、硕士生导师; 主要研究方向为无线通信与组网中的物理层设计和资源分配、无线数能一体化传输关键技术等; 现主持国家自然科学基金青年项目1项, 主持重点项目2项; 已发表论文30余篇, 授权及申请国家发明专利7项, 出版英文著作1部。



**金石**, 东南大学教授、博士生导师, 并担任多本国际知名期刊的编委、IEEE信号处理学会通信技术委员会(SPCOM)委员等; 主要研究方向为5G/B5G移动通信理论与关键技术、物联网理论与关键技术、机器学习与大数据处理在移动通信中应用等; 研究成果获2014年度江苏省科学技术一等奖、2014年度教育部高等学校科学研究优秀成果奖二等奖、2011年度国际电气与电子工程师协会通信学会莱斯奖、2010年度国际电气与电子工程师协会信号处理学会青年最佳论文奖、2016年IEEE GLOBECOM最佳论文奖、2009年度全国优秀博士学位论文提名奖, 以及爱思唯尔中国高被引学者(2014–2017年)等; 还获得国家自然科学基金杰出青年基金; 已在无线通信领域发表论文200余篇, 其中国际核心期刊110余篇, IEEE国际学术会议论文130余篇。



# 封装天线技术最新进展

## Recent Advances in Antenna-in-Package Technology

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0047-07

**摘要:** 封装天线(AiP)是基于封装材料与工艺,将天线与芯片集成在封装内实现系统级无线功能的一门技术。AiP技术顺应了硅基半导体工艺集成度提高的潮流,为系统级无线芯片提供了良好的天线与封装解决方案。最新权威市场分析报告断言: AiP技术会是毫米波5G通信与汽车雷达芯片必选的一项技术,所以AiP技术最近受到广泛重视,取得了许多重要进展。尝试全方位总结AiP技术在过去不到1年的时间内所获得的最新成果,内容包括新材料、新工艺、新设计、新测试等方面。

**关键词:** 封装天线;毫米波;无线通信;汽车雷达;物联网

**Abstract:** Antenna-in-Package (AiP) technology is an antenna solution technology that implements an antenna or antennas on (or in) an integrated circuit (IC) package that can carry a highly-integrated radio or radar transceiver die (or dies). Keeping with the trend of silicon semiconductor technologies, AiP technology provides elegant antenna solutions to radio-frequency system-on-chip. A market analysis report concludes that AiP technology is a need rather than an option for millimeter-wave 5G and automotive radars. Hence, AiP technology has received much attention and made great progress very recently. This paper aims to provide a comprehensive summary of the latest achievement in the development of AiP technology, including new materials and processes, design methods, and testing strategies.

**Key words:** antenna-in-package; millimeter wave; wireless communications; car radar; Internet of things (IoT)

张跃平/ZHANG Yueping

(南洋理工大学,新加坡 639798)  
(Nanyang Technological University,  
Singapore 639798, Singapore)

户要求进行定制。卷料、裁剪好的方形片料可供客户选择<sup>[2]</sup>。

有机材料在高密度互连(HDI)工艺中得到广泛应用,它的种类很多,例如:玻璃纤维环氧树脂(FR4)、液晶聚合物(LCP)、陶瓷填充聚四氟乙烯(RO4000)等<sup>[3-5]</sup>。在这些有机材料中,LCP具有良好的介质特性,标称介电常数为2.9,损耗角正切为0.003,非常适合于设计封装天线,而FR4则具有成本低廉的优势。

模塑化合物是晶圆级扇出式封装(FOWLP)工艺中再造晶圆的必需材料,近期也被尝试用于封装天线的设计上<sup>[6-8]</sup>。表1是2种模塑化合物的介电常数及损耗角正切:第1种模塑化合物的相关值是通过谐振法在24~36 GHz频段提取出来的;第2种模塑化合物在不同频段相关值是通过自由空间法所得到的。从表1中可以看出:模塑化合物介电常数基本不随频率变化而变化,损耗角正切则随

▼表1 模塑化合物介电特性

频率/GHz	介电常数	损耗角正切
24 ~ 36	3.34	0.015
40 ~ 60	3.61	0.0045
75 ~ 110	3.62	0.0055
110 ~ 170	3.61	0.0090

作者于2017年发表的《封装天线技术发展历程回顾》一文讲述了封装天线(AiP)技术早期与蓝牙无线技术一起萌芽,中期与60 GHz无线技术及毫米波雷达一起成长,近期助力太赫兹、物联网(IoT)和5G移动通信发展历程<sup>[1]</sup>。时间跨度从20世纪90年代末到2017年10月底,约20年。在文中作者指出: AiP技术开发正围绕着IoT及毫米波5G移动通信与汽车雷达芯片如火如荼地展开。到目前为止,已不断有新的成果出现。本文尝试全方位总结从2017年

10月以后到现在, AiP技术在材料、工艺、设计、测试等方面的新进展。

### 1 AiP的材料

封装天线介质材料主要有陶瓷、有机、模塑化合物3种,导体材料有金、银、铜3种。陶瓷材料是低温共烧陶瓷(LTCC)工艺必用的,典型代表是Ferro A6系列。最近,中国量子汇景公司属下晶材科技开发的陶瓷材料MG60介电常数为 $5.9 \pm 0.2$ ,损耗角正切大约0.002,具有可与Ferro A6相媲美的特性,但是价格却相对低廉。MG60的生瓷带标准厚度约为120  $\mu\text{m}$ ,标准宽幅规格为15.24 cm (6英寸), 20.32 cm (8英寸);可依据客

收稿日期: 2018-07-27  
网络出版日期: 2018-09-26

频率升高而增加。此外,在晶圆级扇出式封装工艺中还需用到聚合物介质,它的介电常数与模塑化合物相近,但损耗角正切一般高一个量级。

最近,无机材料如玻璃也逐渐尝试着被用在 HDI 工艺中作为封装天线的核心层介质材料。玻璃标称介电常数为 3,损耗角正切很小。研究发现:玻璃不仅比传统的核心层有机介质材料更加稳固,不易翘曲,而且可以做得更薄(30~100  $\mu\text{m}$ )、更光滑<sup>[9]</sup>。这样的特性非常有利于其支撑的其他电路层来实现更加良好的电性能。

## 2 AiP 的工艺

AiP 工艺主要有 LTCC、HDI 及 FOWLP3 种。LTCC 工艺是由 IBM 公司于 20 世纪 70 年代初为其大型计算机芯片封装而开发的,后来经过多家公司历经几十年的发展,目前已经相当成熟,中国有多家公司及研究所提供 LTCC 加工服务。

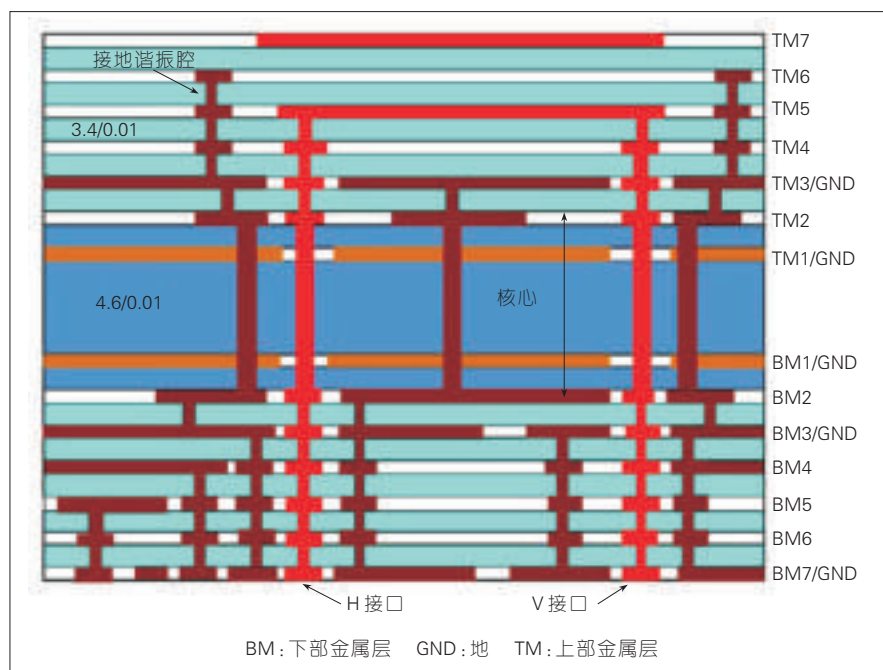
HDI 工艺已被许多公司用于开发毫米波封装天线<sup>[1]</sup>。图 1<sup>[10]</sup>所示的是 IBM 公司为毫米波 5G 通信系统开发的、基于 HDI 工艺的 AiP 结构剖面图。它由 1 个核心层与上下对称的各 5 个介质层及 6 个金属层相互叠加构成,厚度为 1.61 mm。此外,LG 与高通公司也分别发表了它们基于 HDI 工艺为毫米波 5G 通信系统开发的封装天线。LG 公司的 AiP 由 1 个核心层与上下对称的各 4 个介质层及 4 个金属层相互叠加构成,厚度为 0.8 mm<sup>[11]</sup>。高通公司的 AiP 由 1 个核心层与上下对称的各 3 个介质层及 4 个金属层相互叠加构成,厚度略小于 1.1 mm<sup>[12]</sup>。

如图 1 所示,传统 HDI 工艺核心层采用有机介质材料,为了防止整个结构发生翘曲,核心层厚度最少需要 400  $\mu\text{m}$ 。线宽与线距(L/S)取决于介质层及金属层的厚度,目前典型值 L/S = 50/50  $\mu\text{m}$ 。美国佐治亚理工学院系统级封装卓越研究中心研究人员

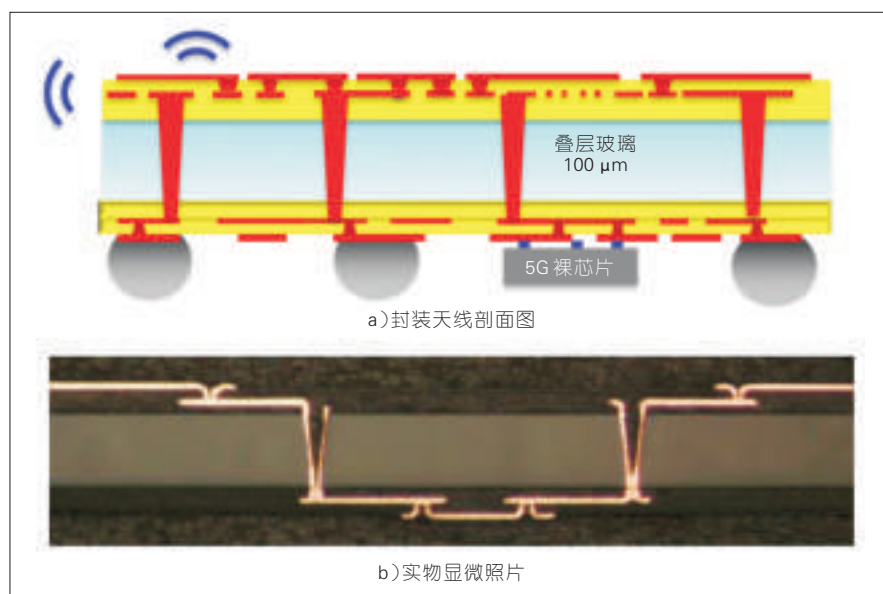
建议核心层采用无机介质材料玻璃,厚度 100  $\mu\text{m}$  就可以,而且在上下叠层中金属线宽与线距可以做得更细,传输损耗可以更小。图 2 所示的是核心层采用玻璃及上下叠层中金属走线的剖面图及实物照片<sup>[9]</sup>。

再如图 1 所示,传统 HDI 工艺为了防止整个结构发生翘曲,在核心层上下实行平衡式布局叠层。矽品

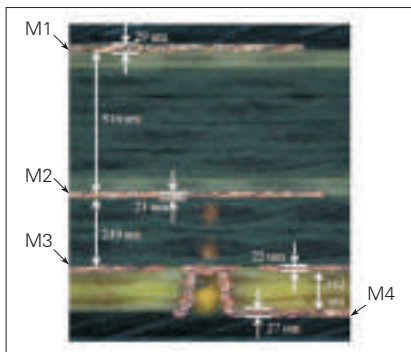
公司工程师建议增加核心层厚度实现叠层非平衡式布局以利于低成本量产毫米波 5G 通信用户终端 AiP。图 3 是矽品公司毫米波汽车雷达 AiP 剖面图实物显微照片。如图 3 所示,AiP 由 4 层金属及 3 层介质构成。金属层 1—4 分别用来实现被动微带天线片、主动微带天线片、封装天线地及封装天线馈电网络。馈电



▲ 图1 IBM公司基于高密度互连工艺的封装天线结构剖面图



▲ 图2 美国佐治亚理工基于玻璃核心层的封装天线剖面图及实物显微照片



▲图3 矽品公司毫米波汽车雷达封装天线剖面图实物显微照片

网络与主动微带天线片互连通过盲孔实现<sup>[13]</sup>。

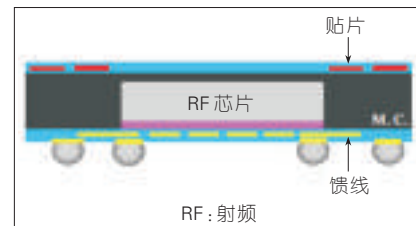
FOWLP工艺不同于LTCC或HDI工艺,它不再需要叠层基片,转而是用模塑化合物、重新配置金属与介质层代替。FOWLP工艺最早是由英飞凌公司研发的,被称为嵌入式晶圆级封装工艺(eWLB)。图4所示的是焊接在系统印制电路板(PCB)板上的eWLB工艺可以实现的封装结构。一般情况下,裸芯片被嵌入在厚度为450  $\mu\text{m}$ ,介电常数为3.2,损耗角正切为0.004的模塑化合物中。保护层厚度为35  $\mu\text{m}$ ,介电常数为3.2,损耗角正切为0.004。在裸芯片的扇入区以及封装的扇出区涂有介质层D1,起到保护裸芯片的作用,D1层的厚度为6.5  $\mu\text{m}$ ,介电常数为3.2,损耗角正切为0.035。重新配置的导体层

(RDL)是沉积厚度为7.5  $\mu\text{m}$ 的铜,用于实现连接线或天线。阻焊掩模层D2用于定义焊球的着落焊盘,其厚度为9.5  $\mu\text{m}$ ,介电常数为3.2,损耗角正切为0.035。目前使用的焊球直径为0.3 mm,间距为0.5 mm。谷歌公司的60 GHz手势雷达第1以及第2版的芯片都采用了基于eWLB工艺设计的AiP。

显然eWLB工艺因为仅有1层金属,不利于AiP天线设计。为了使得FOWLP工艺适合于AiP设计,台湾积体电路制造股份有限公司(简称为台积电)开发出的InFO-AiP技术在模塑化合物上面增加了一层金属。如图5所示,微带天线辐射片由模塑化合物上面增加的那一层金属实现,微带天线地、馈线及耦合槽则在RDL金属层来实现<sup>[16]</sup>。

新加坡微电子研究院(IME)在eWLB的基础上增加了一层模塑化合物、一层金属及穿过原来模塑化合物与RDL相连的盲孔(TMV)实现毫米波AiP设计。图6展示了在eWLB的基础上增加的工艺流程及实现了的AiP实物剖面显微照片<sup>[17]</sup>。

日月光集团开发的低成本先进的单边基片(aS<sup>3</sup>-AiP)工艺强调采用普通封装设备及超薄双层金属基片取代FOWLP介质及RDL层<sup>[18]</sup>。这样不仅成本较低,而且过度损耗可与



▲图5 InFO-AiP结构剖面图

FOWLP媲美,在77 GHz汽车雷达应用方面具有价格与性能优势。

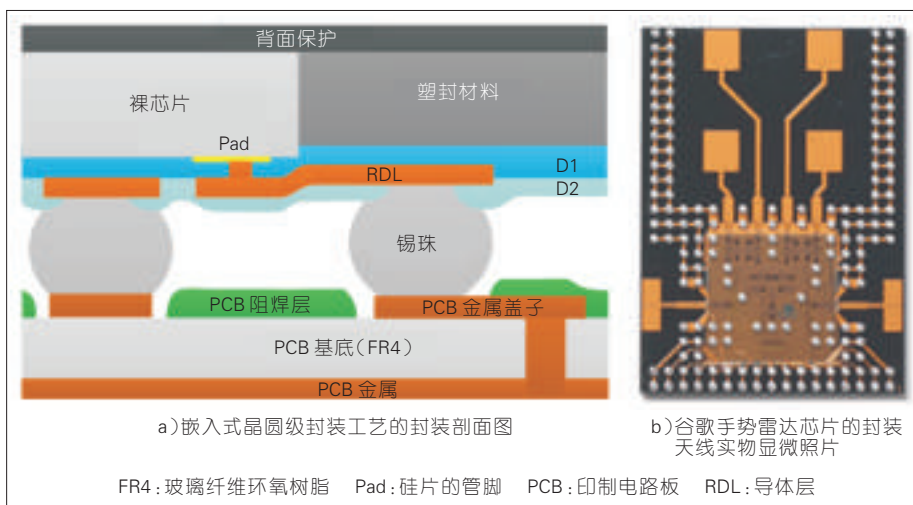
### 3 AiP的设计

AiP设计需要考虑到系统、电路、天线、封装、互连等多个方面。限于篇幅,本节仅介绍AiP设计中的天线部分,并且主要讲述最新发展出的叠层微带天线设计与优化方法。

叠层微带天线可以设计成双频带或宽频带天线。双频带设计由LONG S A等人于1978年发表在《1978天线与传播国际会议论文集》上<sup>[19]</sup>。宽频带设计<sup>[20]</sup>由HALL P S等人于1979年发表在《电子学快报》中。后续对叠层微带天线的研究主要集中在进一步扩展宽频带叠层微带天线的带宽,例如:WATERHOUSE R B透露了高低介电常数基板搭配等增加带宽的设计技巧<sup>[21]</sup>。刘章发等人<sup>[22]</sup>给出了简单计算上下叠层贴片谐振频率的公式及增加带宽的方法。高式昌等人<sup>[23]</sup>发明了新的双线极化槽耦合叠层微带天线,实现了宽带、高极化隔离度、低交叉极化及低后向辐射的良好性能。

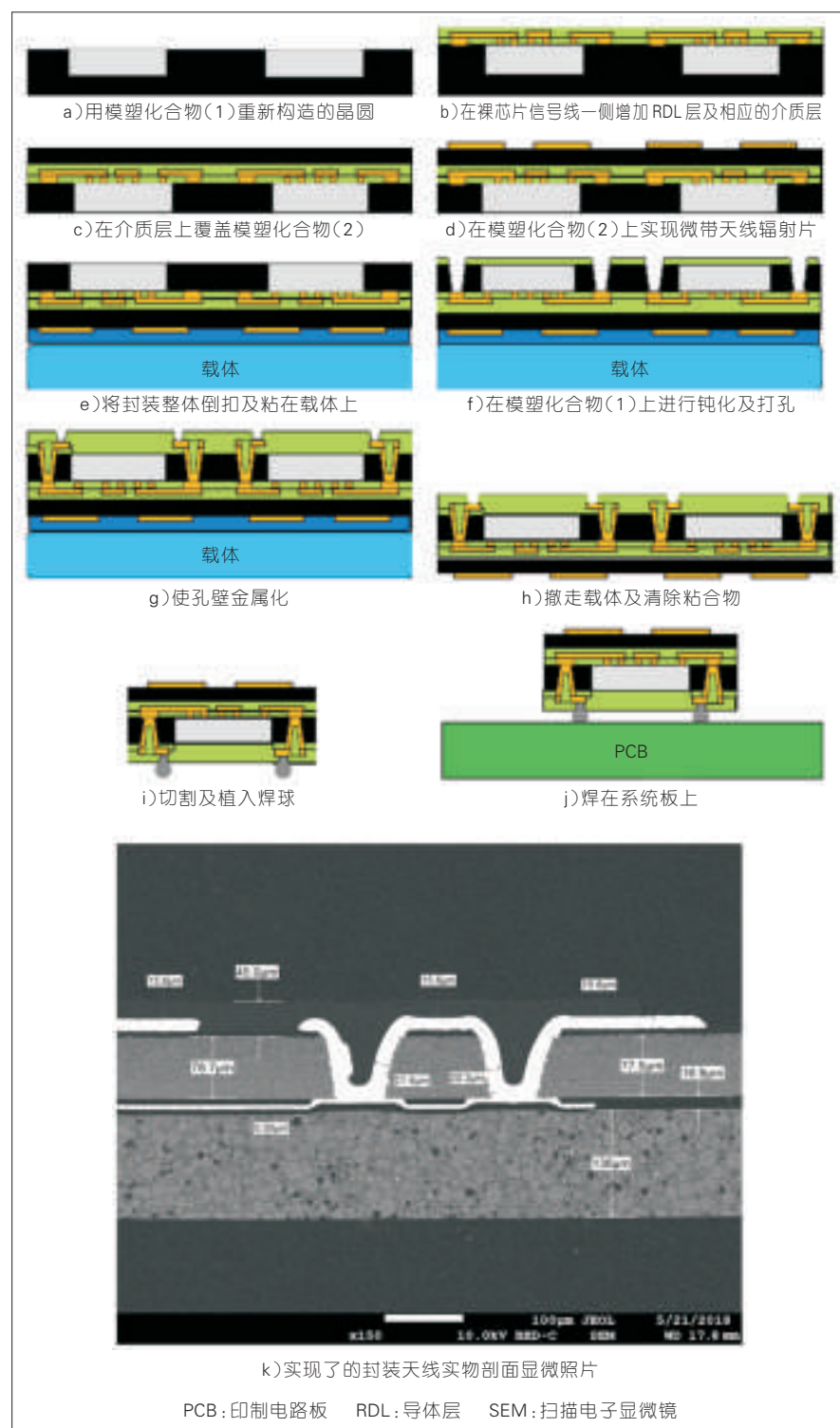
叠层微带天线具有频带宽、波束宽、频域滤波、灵活实现单或双极化、方便静电保护、易于满足多层结构金属化密度要求及利于散热等优点,因而在AiP设计中得到广泛应用。最早将叠层微带天线引入到封装天线设计的是李融林等人<sup>[24]</sup>,他们提出的叠层微带天线设计指导原则对封装天线设计具有很高的参考价值。

叠层微带天线的上下层贴片分别和地之间构成了2个谐振频率不同的微带天线。一般通过选择尺寸



▲图4 嵌入式晶圆级封装工艺的封装剖面图及谷歌手势雷达芯片的封装天线实物显微照片





▲图6 IME在嵌入式晶圆级封装工艺的基础上增加的工艺流程及实现了的封装天线实物剖面显微照片

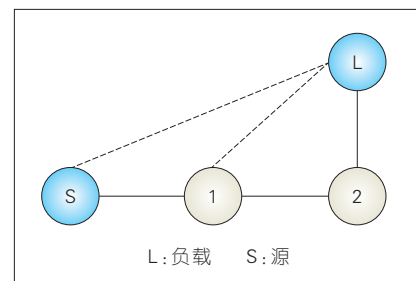
有稍微差异的上下层贴片,产生较为接近的2个谐振频率,达到拓宽频带的效果。此外,研究还发现叠层微带

天线在离开工作频带高段不远处的一个频点上,会出现电流在上下层贴片流向正好相反的状况,从而导致远

场区的辐射在此频点上互相抵消,辐射效率频谱曲线上出现了一个“传输”零点,叠层微带天线也就成为了一个名不副实的滤波器。

叠层微带天线可以更准确地被称为叠层微带滤波天线,它的拓扑结构如图7所示。图7中的辐射体2与1分别代表上下层贴片。馈电探针提供了源(S)与辐射体1之间的外部耦合,而源和负载(L)之间由于探针功率的外泄也存在微弱的耦合。辐射体1与2的辐射分别提供了它们到负载之间的耦合。辐射体1和辐射体2是通过它们之间的间隙进行耦合。

叠层微带天线设计常常遇到的问题是如何调控上下层贴片的谐振频率及二者间的耦合。文献[22]中给出的上下叠层贴片谐振频率的公式较好地解决了计算谐振频率的问题,但是上下叠层贴片之间耦合的问题一直困扰着设计者,没有能得到很好地解决。设计者通常都还是通过参数扫描来确定谐振频率与耦合,这样做存在着很大盲目性,常会遇到在2个谐振频率附近 $|S_{11}|$ 远低于-10 dB,但是在2个谐振频率中间某个频段 $|S_{11}|$ 不论如何调,总是高于-10 dB。目前,这一困扰天线设计者多时的耦合问题由上海交通大学毛军发院士团队的吴林晟博士指导研究生利用滤波器耦合矩阵理论解决了<sup>[25]</sup>。吴林晟等人将叠层微带滤波天线看作一个二阶带通滤波器,天线的输入口当作滤波器的一个端口,天线远场辐射当作滤波器的另一个端口。众所周知二阶带通滤波器有一套成熟的设计方法,诊断与调试通过观测耦合矩



▲图7 叠层贴片天线的拓扑结构

阵来实现。那么现在的问题是如何获取叠层微带滤波天线的耦合矩阵?方法如下:

(1)通过全波仿真软件得到了叠层微带天线  $S_{11}$  和可实现辐射效率信息  $h_{rad}$ ;

(2)去除  $S_{11}$  的群时延与相位加载之后在归一化的频域范围内用矢量拟合的方法得到  $S_{11}$  的表达式<sup>[26-27]</sup>;

(3)通过优化拟合  $h_{rad}$  可得到  $S_{21}$  的一组零点解。这样另外  $2^N-1$  组零点也能得到,其中  $N_z$  是  $S_{21}$  分子的阶数,暂时先选取其中一组解去进行后续的分析;

(4)使用文献[25]中公式得到  $S_{22}$  的留数,同时满足不等式时找到  $S_{22}$  常数项的范围,在所有可能的解中找到最接近于1的解;

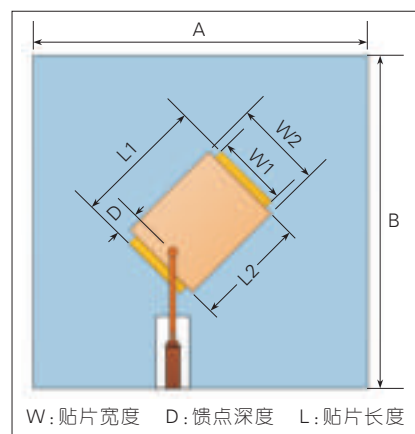
(5)从  $2^N$  组解中找到最终的结果,把  $S_{22}$  和  $S_{21}$  的相位加载效应去掉;

(6)把二端口的散射矩阵转换成导纳矩阵,然后得到耦合矩阵;

(7)计算出灵敏度矩阵,然后得到滤波天线新的几何尺寸;

(8)重复步骤(1)~(7),直到获得我们想要的频率响应。

图8是基于Ferro A6M LTCC材料与工艺设计的45°极化叠层微带天线结构。设计要求天线应具有2 GHz的带宽,以覆盖5G通信的27.5~29.5 GHz频段。设计时的初始值选取参考了文献[24]中的数据,诊断与调试根据上述方法来执行。我们发



▲图8 45°极化叠层微带天线结构

现一般经过3~5个循环就可以达到设计目标。表2是具体的设计尺寸。

图9是45°极化叠层微带天线实物照片及设计与测试的  $S_{11}$  与增益频谱曲线。如图9所示,设计与测试结果吻合得非常好,这表明新方法不仅正确,而且可以提高设计效率<sup>[28]</sup>。

上面提出的方法目前只用于二阶的上下叠层微带滤波天线,而实际的应用中可能面对更严苛的要求,比如:需要三阶的上中下叠层微带滤波天线,然而随着阶数的升高,  $S_{21}$  分子的选择可能性就会呈现指数式的增长,所以对  $S_{21}$  分子零点的选取应该找一些更有力的依据,使其最好只能选取一种情况。同时对于  $S_{22}$  常数项的选取方法也需要一个严格的数学推导。

为了进一步提高AiP技术天线部分设计通用性及效率,上海交通大学毛军发院士团队成功地将蝙蝠优化算法在Matlab中实现,而且通过Script链接到高频电磁结构仿真软件(HFSS)对天线进行自动优化调试,取得了非常令人满意的结果。同样基于Ferro A6M LTCC材料与工艺,二阶的上下叠层微带滤波天线经过优

▼表2 45°极化叠层微带天线设计尺寸

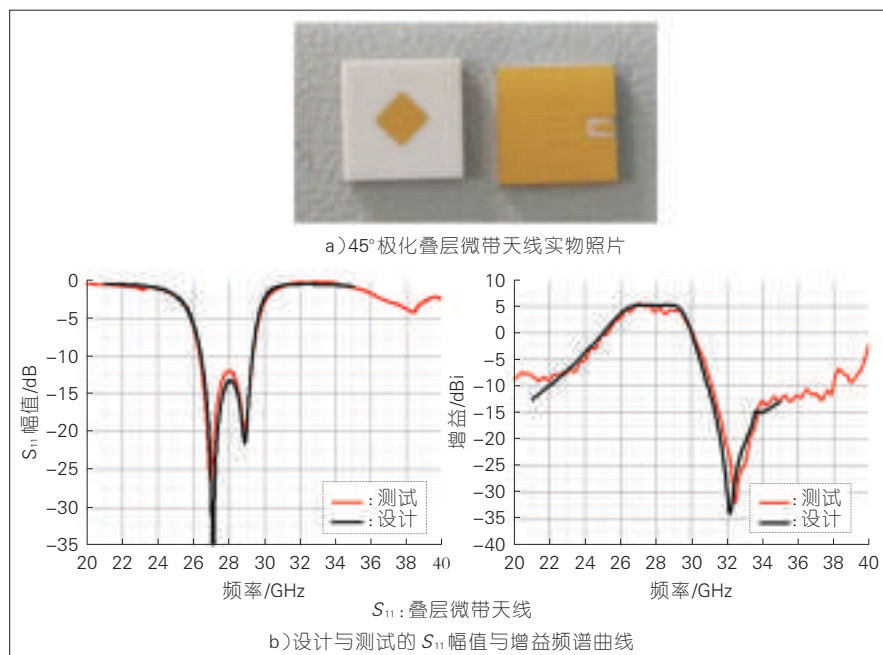
变量	值/mm
A	6
B	6
L1	1.928
L2	1.867
D	0.59
W1	0.79
W2	1.959
上下层贴片之间距离	0.384
下层贴片基板厚度	0.096

W:贴片宽度 L:贴片长度 B:基片长度  
D:馈点深度 A:基片宽度

化实现了6 GHz的带宽,覆盖5G通信的24~30 GHz频段。

## 4 AiP的测试

测试是AiP技术非常重要的一环,目前AiP测试的重点已经由研发环境下仔细深入地测试与表征向生产阶段快速功能测试与系统级标准指标评估方面转移。研发环境下的AiP测试技术相对成熟,一般都采用在小型天线暗室中搭建的探针式测试平台上完成。图10是上海交通大学毛军发院士团队建成的集成天线



▲图9 45°极化叠层微带天线实物照片及设计与测试的  $S_{11}$  幅值与增益频谱曲线

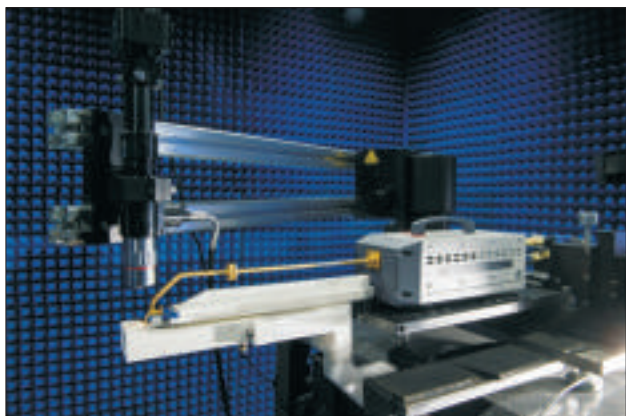


图 10  
上海交通大学集成天线  
远场自动测试平台照片

远场自动测试平台照片。该测试平台可以完成从 18 ~ 32.5 GHz (为适应 THz 频段天线测试可扩展到 500 GHz 或更高) 片上天线及封装天线阻抗及辐射特性测试。平台支持探针及波导馈电, 110 GHz 以下也可用同轴馈电, 性能达到世界先进水平。平台自建成后, 利用率相当高, 已为中国多家科研院所的研究项目及公司产品开发提供了测试服务, 极大地促进了中国在片上天线及封装天线方面的研究与发展。

但是, 图 10 所示的测试平台并不适用于生产线上快速测试的要求。生产阶段快速测试与生产线所采用的封装工艺紧密相关。如果 AiP 采用 HDI 工艺制造, 那么 AiP 本身可以进行独立的传导及空中下载技术 (OTA) 测试, 芯片封装好以后还可以进行 OTA 测试。如果 AiP 采用 FOWLP 工艺制造, 那么 AiP 本身已与芯片融为一体, 仅可以进行 OTA 测试。生产线上 AiP 测试至少需要测试仪、操作仪、接触器、探头及天线暗室等仪器设备。测试仪与操作仪可以在已有的半导体封测设备上添加或扩充, 天线暗室可以直接定制; 但是在接触器与探头方面仍然面临许多挑战。美国 Xcerra 公司最近在为毫米波汽车雷达 AiP 测试方面开发接触器与探头方面取得进展, 接触器工作频率可以到 100 GHz, 适用于球形焊点阵列间距最小到 0.3 mm 封装。此外, 该公司也一直尝试将微

带天线嵌入到接触器中进行无线测量<sup>[29]</sup>。

系统级指标评估是 AiP 已经安装在整机内, 需要按照系统应用标准所进行的测试。目前这一方面的测试系统与方法已取得显著进展, 这里不再赘述。

## 5 结束语

2018 年注定是商用毫米波通信与雷达发展史上重要的一年, 也会是毫米波 5G 通信发展里程碑式的一年, 更会是奏响 AiP 技术进入海量应用序曲的一年。

我们发现开发适用于毫米波 5G 通信用户终端的 AiP 技术是目前大家最关注的热点。一些大公司正在不断地投入大量人力、物力开发适合于 AiP 设计的新材料和新工艺, 旨在实现高辐射效率及低成本量产。反观传统的天线公司, 由于缺乏芯片与封装方面的能力, 正在考虑或尝试看看如何介入。我们还重点介绍了 AiP 技术在材料、工艺、设计、测试等方面的新进展: 在材料方面, 模塑化合物与玻璃受到关注。在 HDI 工艺方面, 增加核心层厚度来实现非平衡式叠层布局, 证明有利于低成本量产毫米波 5G 通信用户终端 AiP; 在 FOWLP 工艺方面, 我们注意到为了更加灵活地实现高性能 AiP, 金属层在增加。设计方面是大学研究生可以着力的地方。上海交通大学毛军发院士团队最近在 AiP 设计方法上取得了新

成果, 成功地将蝙蝠优化算法在 Matlab 中实现, 而且通过 Script 链接到 HFSS 对天线进行自动优化。测试是 AiP 技术非常重要的一环, 目前 AiP 测试的重点已经由研发环境下深入细致地测试与表征向生产阶段快速功能测试与系统级标准指标评估方面转移, 将微带天线嵌入到接触器中进行无线测量是令人耳目一新及有意义的尝试。

## 致谢

本文的研究受到太原理工大学盛剑恒教授、香港中文大学黄振峰博士、香港中文大学程伯中教授、南洋理工大学杜茂安教授的大力支持, 在此对他们表示感谢!

## 参考文献

- [1] 张跃平. 封装天线技术发展历程回顾[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(6): 41-49. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2017.06.010
- [2] Miracle Materials Technology. Information about LTCC [EB/OL]. [2018-07-27]. <http://www.miracle-tek.com/>
- [3] HONG W, BAEK K H, GOUDELEV A. Grid Assembly-Free 60-GHz Antenna Module Embedded in FR-4 Transceiver Carrier Board [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 1573-1580. DOI: 10.1109/tap.2012.2232635
- [4] KAMGAING T, ELSHERBINI A A, OSTER S N, et al. Low-Profile Fully Integrated 60 GHz 18 Element Phased Array on Multilayer Liquid Crystal Polymer Flip Chip Package[C]// 2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). USA: IEEE, 2015: 994-998. DOI: 10.1109/ECTC.2015.7159716
- [5] KAM D G, LIU D, NATARAJAN A, et al. Organic Packages with Embedded Phased-Array Antennas for 60-GHz Wireless Chipsets [J]. IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., 2011, 11(1): 1806-1814
- [6] HASEGAWA T, ABE H, IKEUCHI T. Wafer Level Compression Molding Compounds[C]// 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference. USA: IEEE, 2012: 1400-1405. DOI: 10.1109/ECTC.2012.6249019
- [7] HASEGAWA T, ABE H, IKEUCHI T. Wafer Level Compression Molding Compounds[C]// Proceeding of IEEE Electronic Component Technology Conference. USA: IEEE, 2012
- [8] CHEN Z H, GUAN L T, WEE D H S, et al. Characterization of Molding Compound Material and Dielectric Layer of RDL[C]// 2017 IEEE 19th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). USA: IEEE, 2017: 1-5. DOI: 10.1109/EPTC.2017.8277538.2722873



- [9] LIU D, GU X X, CHRISTIAN W, et al. Antenna-in-Package Design Considerations for Ka-Band 5G Communication Applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6372–6379. DOI: 10.1109/tap.2017.9
- [10] LIU D X, GU X X, BAKS C W, et al. Antenna-in-Package Design Considerations for Ka-Band 5G Communication Applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6372–6379. DOI: 10.1109/tap.2017.2722873
- [11] HONG-TEUK K, BYOUNG-SUN P, SEONG-SIK S, et al. A 28-GHz CMOS Direct Conversion Transceiver with Packaged Antenna Array for 5G Cellular System [J]. 2018, 53(5): 1245–1259. DOI: 10.1109/RFIC.2017.7969019
- [12] OU Y C. MMW Phased Array Antenna and Front-End Co-Design for Smartphones and Small Cells [R]. Presented at the WFH workshop at IMS 2018. IMS, 2018
- [13] LU Y W, FANG B S, MI H H, et al. Mm-Wave Antenna in Package (AiP) Design Applied to 5th Generation (5G) Cellular User Equipment Using Unbalanced Substrate [C]// 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). USA: IEEE, 2018: 208–213. DOI: 10.1109/ECTC.2018.00040
- [14] FISCHER A, TONG Z Q, HAMIDIPOUR A, et al. 77-GHz Multi-Channel Radar Transceiver with Antenna in Package [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(3): 1386–1394. DOI: 10.1109/tap.2013.2294206
- [15] Atap [EB/OL]. <https://atap.google.com/soli/>
- [16] WANG C T. InFO-AiP Technology for High Performance and Compact Millimeter Wave System Integration [C]// Proceeding of IEEE Electronic Components Technology Conference. USA: IEEE, 2018
- [17] CHEN Z H, GUAN L T, WEE Ho D S, et al. Millimeter-Wave Antenna in Fan-Out Wafer Level Packaging for 60 GHz WLAN Application [C]// 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). USA: IEEE, 2018: 331–336. DOI: 10.1109/ECTC.2018.00057
- [18] HO C Y, HSIEH S C, JHONG M F, et al. A 77GHz Antenna-in-Package with Low-Cost Solution for Automotive Radar Applications [C]// 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). USA: IEEE, 2018: 191–196. DOI: 10.1109/ECTC.2018.00037
- [19] LONG S, WALTON M. A Dual Frequency, Stacked Circular Disc Antenna [C]// 1978 Antennas and Propagation Society International Symposium. USA: IEEE, 1978: 260–263. DOI: 10.1109/APS.1978.1147923
- [20] HALL P S, WOOD C, GARRETT C. Wide Bandwidth Microstrip Antennas for Circuit Integration [J]. Electronics Letters, 1979, 15(15): 458. DOI: 10.1049/el:19790329
- [21] WATERHOUSE R B. Small Microstrip Patch Antennas [M]. Microstrip Patch Antennas: A Designer Guide. MA: Springer US, 2003: 197–276
- [22] LIU Z F, KOOL P S, LI L W, et al. A Method for Designing Broad-Band Microstrip Antennas in Multilayered Planar Structures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(9): 1416–1420. DOI: 10.1109/8.793321
- [23] GAO S, LI L W, LEONG M S, et al. A Broad-Band Dual-Polarized Microstrip Patch Antenna with Aperture Coupling [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(4): 898–900. DOI: 10.1109/tap.2003.811080
- [24] LI R, DEJEAN G, MAENG M, et al. Design of Compact Stacked-Patch Antennas in LTCC Multilayer Packaging Modules for Wireless Applications [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2004, 27(4): 581–589. DOI: 10.1109/tadvp.2004.831866
- [25] 周华华. 基于耦合矩阵的滤波天线研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017
- [26] GUSTAVSEN B, SEMLYEN A. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1052–1061. DOI: 10.1109/61.772353
- [27] MENG M, WU K L. An Analytical Approach to Computer-Aided Diagnosis and Tuning of Lossy Microwave Coupled Resonator Filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(12): 3188–3195. DOI: 10.1109/tmtt.2009.2033868
- [28] GUO G, WU L S, ZHANG Y P, et al. Stacked Patch Array in LTCC for 28 GHz Antenna-in-Package Applications [C]// 2017 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS). USA: IEEE, 2017: 1–3. DOI: 10.1109/EDAPS.2017.8277007
- [29] Xcerra. xWave Contactor or WLCSP Probe Head [EB/OL]. [2018-07-27]. <https://xcerra.com/xwave>

## 作者简介



张跃平, 新加坡南洋理工大学电子工程学讲座教授、IEEE Fellow、IEEE 天线与传播学会杰出讲师、上海交通大学“千人计划”国家特聘专家、《ZTE COMMUNICATIONS》编委; 目前研究方向为无线电子学; 曾荣获 IEEE 天线与传播学会谢昆诺夫论文奖; 已发表论文 260 篇, 拥有授权美国专利 7 项。

# 大数据已成为基础通用技术

## Big Data: the Basic General Technology

王德政/WANG Dezheng  
汪绍飞/WANG Shaofei  
王梅/WANG Mei

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳  
518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

### 1 大数据技术的发展趋势

大数据已经成为一种通用的基础技术。作为基础数据平台,一方面数据需要被更严密地组织与管理,才能切合上层应用的需要;另一方面大数据必须与各行业紧密结合,才能被深度挖掘出价值。

各行各业在数据组织与管理上普遍存在数据标准不统一、数据质量低、数据管理困难等挑战。这些挑战一方面需要通过管理手段来解决,另一方面也需要通过合理的技术手段进行辅助。

大数据作为基础技术与基础平台,必须与各个行业应用相结合,在解决实际问题中创造价值。从行业角度看,几乎所有的行业都可以结合大数据构建更好的系统解决方案;从技术角度看,大数据与人工智能、物联网之间有较为明显的技术融合趋势,未来这些领域将以数据为纽带,一体化协同发展。

### 2 大数据治理技术的发展趋势

大数据应用在其组织与管理上

收稿日期: 2018-07-20  
网络出版日期: 2018-10-13

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0054-003

**摘要:** 大数据已在各行业中落地应用,从某种意义上说,已成为“隐身”基础通用技术。一方面数据需要被更严密地组织与管理,才能切合各行业上层应用的需要;另一方面大数据需要与人工智能(AI)、物联网(IoT)等技术紧密结合,才能更好地为行业应用挖掘其自身价值。大数据与数据治理、人工智能、物联网等技术的融合,将促进大数据技术的普及,为行业应用的开发降低成本。

**关键词:** 大数据; 数据治理; AI; IoT

**Abstract:** Big data has been applied in various industries, and it has become the "invisible" basic general technology. On the one hand, the data needs to be more closely organized and managed to meet the needs of upper-layer applications in various industries. On the other hand, big data needs to be closely integrated with artificial intelligence (AI) and Internet of things (IoT) to better excavate its value for industry applications. The integration of big data and data governance, AI, and IoT will promote the popularity of big data technology, and reduce the costs of industry applications.

**Key words:** big data; data governance; AI; IoT

遇到了很多困难与挑战:

(1) 数据缺少业务定义,难以进行业务分析;

(2) 数据往往来自不同的系统,缺乏统一的标准,互通受阻;

(3) 数据质量参差不齐,其完整性、准确性、一致性、时效性难以保证,分析结果的可信度大打折扣;

(4) 数据间的内在关联未能建立,跨业务、跨领域的分析难以开展;

(5) 数据使用中安全与隐私保护不足,存在违反法律法规的风险。

大数据要真正成为企业的核心资产,其治理是必由之路。从2017年伊始,大数据治理已成为产业生态圈中的研发重点。不少企业正在积极开展实践,一般步骤为“建立组织架构和规范→梳理应用需求→梳理企业数据信息→引进大数据治理

技术平台→治理数据”,治理后的数据成为企业资产为数据应用与数据运营提供基础。

大数据治理的最终目标不仅仅是为了管理数据,更是为了应用数据。数据只有被使用不断流通,才能最大限度地发挥其价值。因此大数据治理不能只关注数据本身,还要面向业务需求,根据用户所需开展治理活动。大数据治理是一个系统工程,总体来看需要具备6方面的关键能力与技术:

(1) 统一元数据管理。元数据指“所有系统、文档和流程中包含的所有数据的语境,是生数据的知识”<sup>[1]</sup>,统一元数据管理已成为大数据治理的重要一环,为大数据的质量提升提供基础,使大数据的维护管理工作更加有效。

(2)数据标准管理。大数据治理要能够有序开展,必须建立统一的数据标准,为元数据的统一、数据的集成融合、数据的质量提升等提供依据。

(3)大数据质量管理。数据质量是数据应用的基础,通过大数据质量管理,可以获得干净、可靠的数据。这是大数据治理的重要目标,也是发挥大数据价值的必要前提。

(4)主数据管理。主数据是跨系统、跨模块、跨部门、跨地区、有高质量要求、高时效要求、被各项业务反复使用的基础性和敏感性数据。主数据是业务信息系统的神经中枢,是业务运行和决策分析的基础,也被认为是黄金数据<sup>[2]</sup>。通过对主数据的管理,保证了其完整性、一致性、精确性、及时性,这样才能更好地支撑跨部门、跨应用的数据融合的一些应用需要。

(5)大数据集成<sup>[3]</sup>。大数据集成不仅仅是将数据在物理上集中存储起来,还要依据数据标准、统一元数据的定义,将外部数据加工转换为业务所需要的目标数据,建立数据之间的内在关联。

(6)大数据安全与隐私保护。数据信息化为人类生产和生活带来便利的同时,也带来前所未有的数据安全与隐私威胁,大到国家安全、企业经营,小到个人隐私,都需要从不同的角度加强数据安全与隐私威胁。

通过大数据治理,获得及时、准确、可靠、安全脱敏后的高质量数据,可为大数据深入广泛的应用、企业的数据化转型提供强有力的抓手。

### 3 大数据与 AI 协同的发展趋势

人工智能(AI)在广义上是指任何能够让计算机通过图灵测试的方法和系统;而狭义上则是指通过研究人类智能产生的方式来让电脑模拟人的智能。

进入 21 世纪,随着神经网络算法

的不断优化,面向图形处理器(GPU)的编程接口带来了计算力的提升,这使得可以针对结构更复杂(多层神经元)的网络高效完成训练。传统的神经网络也因其复杂度和层数大幅度增加而改名为深度学习。我们可以把深度学习理解为以数据为基础的复杂神经网络学习系统,是传统神经网络在数据模式驱动下的演进和发展<sup>[4-5]</sup>。

Google 在 2016 年将其战略从“移动优先”转变为现在的“AI 优先”。在移动时代,通过其知识图谱、自然语言处理、翻译、语音识别、图像识别、地图等相关产品积累大量的数据和技术,为今天 Google 的 AI 优先战略构建坚实的基础。所以,Google 本质上是一个以数据为基础的公司,是一个大数据公司。

我们可以看到:随着互联网/移动互联网的发展,数据量迅速增加。云计算和大数据的兴起,使得计算机存储和处理数据的能力快速提升。从某种意义上说,大数据为 AI 提供数据处理能力,而 AI 为大数据提供应用场景。例如:当数据治理涉及跨多个系统与业务时,往往需要借助 AI 技术以提升其处理能力,才能满足快速激增的海量数据以及快速发展的大数据应用需要。

大数据与 AI 相互融合,已经成为事实。AI 技术通过大数据,获取突破性成果,而以 AI 技术为特征的大数据应用则遍地开花,逐步渗透到各个行业和各个领域。我们面对的是一个以大数据应用为标志,以人工智能技术为特征的新时代。为客户提供融合大数据平台的 AI 解决方案是适应当前技术发展趋势并且具备良好的市场需求的产品。

### 4 大数据与 IoT 协同的发展趋势

物联网本身不是新概念,在 20 世纪 90 年代就已被提出。最近,以物联网为基础的智慧生活、智慧城市、

智慧地球等设想正在不断成为现实,物联网成为各技术巨头竞相布局的技术高地。

物联网广泛融合了大量的现有技术,涉及到通信、大数据、人工智能、数据挖掘、云计算、自动化、电子、材料等众多领域。其最核心的特性是连接与数据:在连接方面,物联网拓展了传统通信网络的功能和范围,将其延伸到更为广泛的物理世界;在数据方面,物联网接入了种类繁多的海量设备,极大地拓展了网络信息数据的来源渠道。据统计,新近全球创建、获取和复制的数据总量中,20% 来自物联网,而且增速最快。凭借越来越无处不在的连接、越来越丰富的数据,物联网正成为各类技术进步的新动力和助推器<sup>[6]</sup>。

简单的、局部的物联网孤岛应用,其数据类型简单、数据量小,很难形成规模和产业效应,影响力极其有限。而大数据存储、大数据分析、云计算、人工智能等新兴数据存储和处理技术的出现,满足了物联网的大数据存储、智能化处理的要求,大大加速了物联网的前进步伐,加快了物联网孤岛应用的融合。

在存储方面,大数据拥有丰富的分布式云存储系统,可以满足物联网在大规模数据存储方面的要求<sup>[7]</sup>。例如:Hadoop 分布式文件系统(HDFS)、分布式列存储系统(HBASE)、亚马逊 S3 云存储、微软 azure 云存储等。

在处理方面,面对不同的应用场景,大数据提供了不同的大规模数据处理框架,可以实现对物联网大规模数据的离线和实时分析,发掘物联网大规模数据中更多潜在的价值,催生物联网更多的应用,如:MapReduce、Spark、Storm 等。

在交换及共享方面,为解决物联网应用碎片化、孤岛化的痛点,业界相关标准化组织正致力于对物联网的数据模型和业务流程进行规范化和标准化,如:开放移动联盟(OMA)提出的轻量级机器到机器(LWM2M)



架构;欧洲电信标准化协会(ETSI)发起的、由多个标准化组织共同成立的物联网国际化标组织 oneM2M 提供的 oneM2M 架构;由微软、英特尔、三星、高通、思科等多家企业组成的开放连接基金会(OCF)提出的物联网设备标准等。这些架构和标准的提出,有力促进了物联网的发展<sup>[8]</sup>。

物联网提供了广泛海量的连接,可以获得大规模的数据;而大数据以及 AI 的相关技术提供了智能分析能力,包括机器学习以及深度学习,可以用于分类、预测、自动决策以及视频、图像、语音的识别等。随着物联网采集数据的增多,智能化程度的提高,从这些数据中挖掘更多价值的需求就更加迫切,物联网与大数据之间的技术融合将更加紧密。

## 5 结束语

一个技术的成熟,只有当大众意识不到其存在时,才算是真正成熟,例如:历史上文字的发明、金属冶炼的发明等。这些深刻改变人类社会的技术,在当今社会或被“视而不

见”,或被视为如砂石一般理所当然存在的外部环境。

随着市场应用的深入,大数据与其他技术结合得越强,其作为基础技术的特征也就越显著。或许在不久的将来,大数据将“无迹可寻”,但同时又无处不在。

## 致谢

本篇文章得到中兴通讯网管及服务规划部高级工程师郭海生、工程师周永康的帮助,谨致谢意!

## 参考文献

- [1] 麦考.元数据仓储的构建与管理[M].北京:机械工业出版社,2004
- [2] 中国信息通信研究院.数据资产管理实践白皮书[IC]//大数据产业峰会.北京:中国信息通信研究院、数据中心联盟,2018
- [3] 董欣.大数据集成[M].北京:机械工业出版社,2017
- [4] 孙运雷.物联网服务质量动态保障方法研究[D].北京:北京邮电大学,2014
- [5] 邓雪峰.设施农业物联网系统建模与模型验证[D].北京:中国农业大学,2016
- [6] 刘畅.物联网中多层/跨层接入管理关键技术[D].大连:大连理工大学,2014

[7] 李开复.人工智能:李开复谈 AI 如何重塑个人、商业与社会的未来图谱[M].北京:文化发展出版社,2017

[8] 吴军.智能时代:大数据与智能革命重新定义未来[J].榆林科技,2017(1):66

## 作者简介



**王德政**,中兴通讯股份有限公司中心研究院总工;主要负责大数据平台的规划,曾先后参与中兴通讯 WCDMA 核心网、3G 平台、IMS、统一网管,以及大数据平台等系统的规划与研发工作。



**汪绍飞**,中兴通讯股份有限公司物联网平台项目经理;目前主要从事物联网平台方面的研发工作,曾参与软交换、IMS、大数据平台 DAP 和物联网平台的研制工作;发表论文 10 余篇,参与《大数据架构师指南》的编写。



**王梅**,中兴通讯股份有限公司网管及服务系统部平台项目经理;主要负责数据管理与数据治理领域,并曾参与公司统一网管、大数据平台 DAP 和政企 UOC 平台的研制工作。

# 基于卫星的流媒体应用技术研究

## Streaming Media Application Technology Based on Satellite

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0057-005

**摘要:** 带宽贵、时延大和误码率高是流媒体在卫星链路传输中亟待解决的三大问题。针对带宽贵的问题,提出将传输链路根据特点进行分段并分别采用传输控制协议(TCP)和用户数据报协议(UDP)协议,使得带宽占用与在线客户端数量无关,极大地提高卫星带宽利用率;针对时延大的问题,提出将获取流媒体的触发机制采用终端主动拉取并加入过滤机制,在协议改造前提下使得已经存在媒体流只需要解码时延而不需拉流时延,从而极大地缩减时延;针对误码高的问题,采用在流媒体源端进行冗余编码的前向纠错(FEC)方法,有效提高流媒体终端解码的成功率,从而提升流媒体应用的用户友好度。

**关键词:** 卫星传输;流媒体;UDP;FEC

**Abstract:** High bandwidth, high delay and high error rate are three main problems for streaming media in satellite link transmission. For the high bandwidth problem, the transmission link is segmented according to its characteristics, and the transmission control protocol (TCP) and the user datagram protocol (UDP) are adopted respectively, which makes the bandwidth occupation independent of the number of online clients and greatly improves the utilization of satellite bandwidth. The triggering mechanism of streaming media can be actively pulled by the terminal and added into the filtering mechanism. Under the premise of protocol transformation, the existing media stream only needs the decoding delay instead of the pulling delay, so that the delay can be reduced extremely. The forward error correction (FEC) method for redundant encoding at the source of streaming media is proposed, which effectively improves the success rate of streaming media terminal decoding and enhances the user-friendliness of streaming media applications.

**Key words:** satellite transmission; streaming media; UDP; FEC

黄泽武/HUANG Zewu

韩桂鲁/HAN Guilu

李双全/LI Shuangquan

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)

(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

前,流媒体服务主要基于客户端/服务器(C/S)架构实现,其架构图如图1所示。

然而,因为高昂的建设成本导致地球表面依然有很多没有被蜂窝移动信号覆盖,比如大海、沙漠、高山、边缘地带等。卫星通信因其自身特点使其成为一种重要的移动通信的补充手段。具体而言,卫星传输链路具有如下优势:

(1)覆盖范围广。对地面的情况如高山海洋等不敏感,可以在业务量比较稀少的地区提供大范围的覆盖,在覆盖区内的任意点均可以进行通信,而且成本与距离无关<sup>[1]</sup>。

(2)通信质量好。卫星通信中电磁波主要在大气层以外传播,电波传播非常稳定。虽然在大气层内的传播会受到天气的影响,但仍然是一种可靠性很高的通信系统。

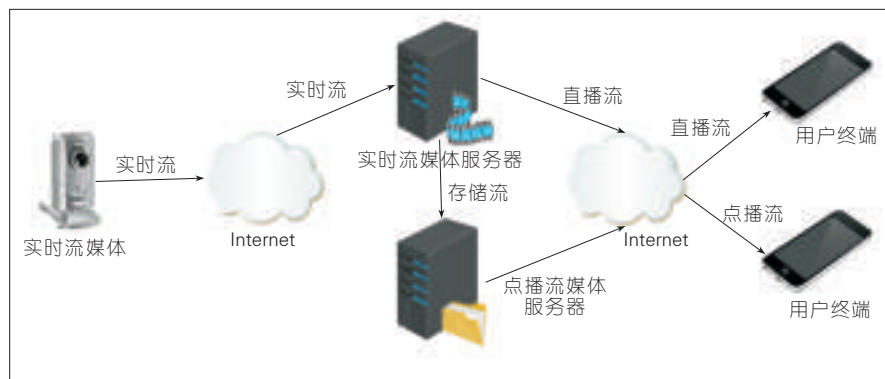
(3)成本低廉。卫星通信系统由卫星端、地面站、用户端3部分组成,除卫星固有成本外,只需要建设地面站,而无需其他的地面施工,因此卫星网络建设速度快、成本低,运行维护费用也相对低。

由于卫星信道具有与地面信道不同的一些特点,导致基于卫星传输

随着第4代移动通信(4G)技术的普及移动手持设备性能的飞速提升,流媒体服务如远程监测控制、视频会议、远程教育、视频点播、网络直播等也得到高速发展。据统计:截至2017年6月,中国网络视频用户规模达5.65亿,较2016年底增加2 026万人,增长率为3.7%;网络视频用户使用率为75.2%<sup>[1]</sup>。

流媒体业务成为运营商继语音、短信和数据业务之后的第4种基本业务。所谓流媒体就是指采用流式传输技术在网络上连续实时播放的媒体格式,如实时音视频或多媒体文件。流媒体技术就是把连续的音视频信息经过压缩处理后放上网服务器,由流媒体服务器向用户顺序或实时地传送各个压缩包,让用户一边下载一边观看、收听,而不需要等整个压缩文件下载到自己的计算机上才可以观看的网络传输技术<sup>[2]</sup>。目

收稿日期: 2018-04-23  
网络出版日期: 2018-10-24



▲图1 流媒体系统架构图

的流媒体应用发展非常缓慢。具体而言,基于卫星传输的流媒体应用主要有以下问题:

(1)低带宽、高费用。卫星频谱是宝贵的有限资源,因此价格昂贵,例如:Ku波段的频率范围是12.4~18 GHz,卫星发射机只有54 Mbit/s带宽,且费用高昂。然而,流媒体因自己特点导致对带宽占用较大,例如:采取H264编码、1 920×1 080分辨率和24帧/秒的视频传输需要的带宽为256 kbit/s,此视频仅传输成本约20万元人民币。

(2)较长的通信延时。卫星传输距离远且通过无线电波传输导致通信延时较大,例如:典型的卫星通信

延时在540 ms左右,传输控制协议(TCP)3次握手的延时可达到1.5 s,此性能对于实时多媒体系统是无法接受的。

(3)高误码率。卫星采取无线电波传输,其受环境、天气、太阳活动等各方面影响较大,从而导致实际的卫星通信中有较高的误码,由此对多媒体应用的用户体验极为不利,而如果采取TCP进行重传会降低TCP的发送窗口,从而会引起传输的带宽利用率下降<sup>[4]</sup>。

一般来说,流媒体应用对于数据传输流畅度要求大于数据传输稳定性,也就是说用户对于流媒体卡顿忍耐度小于数据花屏或者清晰度下降。针

对流媒体应用特点和卫星传输的特点,文中我们提出一种基于一种TCP叠加用户数据报协议(UDP)混合分段传输优化组合技术方案,以满足卫星传输流媒体应用。

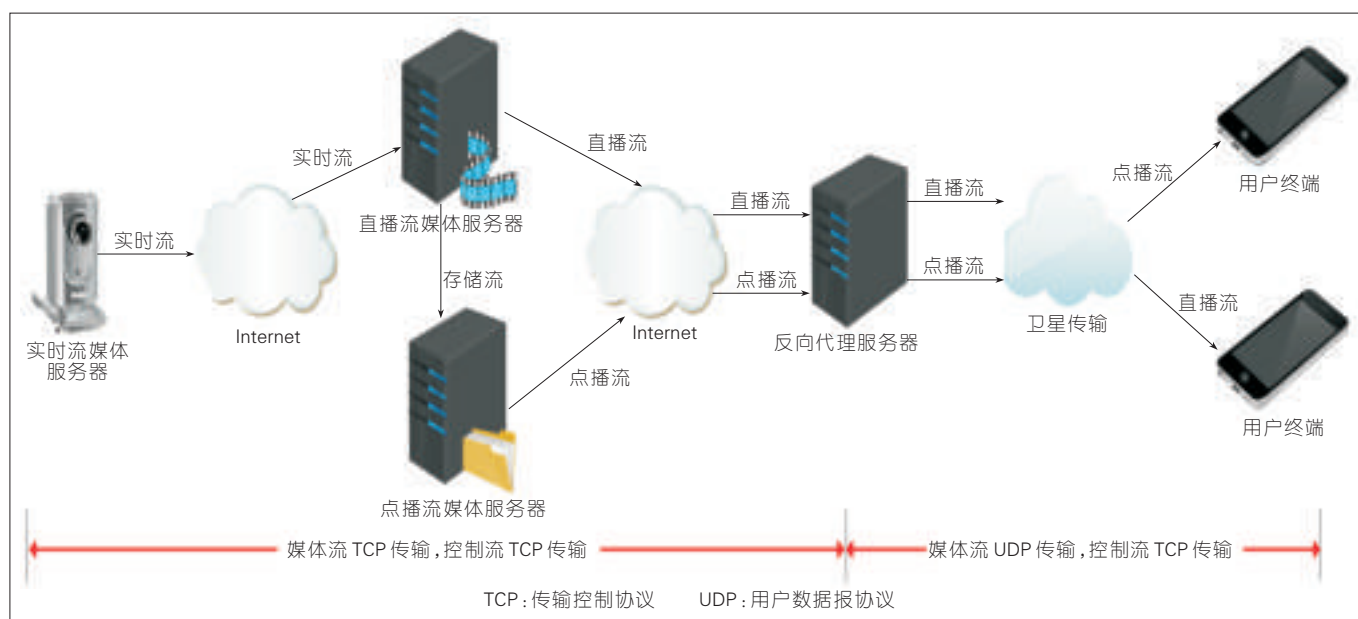
## 1 适合基于卫星传输的流媒体系统架构

基于卫星传输的流媒体系统的传输有2部分:一部分与传统流媒体系统相同,均基于固网传输;另一部分是基于卫星反射广播传输。卫星链路的传输层不适合采用面向连接的协议,因此我们提出了一种TCP叠加UDP混合分段传输方式的基于卫星通信的流媒体系统,其架构图如图2所示。

图2中重要部分的功能描述具体如下:

(1)实时多媒体源对多媒体进行采集、编码、压缩、音视频混合等操作形成原始实时流媒体,然后将实时流媒体源与直播流媒体服务器采用传输层TCP协议建立连接,并且将原始实时流媒体推送到直播流媒体服务器之上。

(2)因卫星传输中误码率较高,故直播流媒体服务器在接收实时多



▲图2 基于卫星传输的流媒体架构图



媒体流之后,采用前向纠错码(FEC)算法对实时流重新编码;然后对实时多媒体流转码、加密;同时,可将编码后的实时多媒体流转存到点播多媒体服务器形成多媒体文件。

(3)因卫星带宽较昂贵,为避免无用户观看的流占用带宽,本流媒体系统故采用终端触发媒体流下发的机制;终端采用TCP协议与直播流媒体服务器和点播多媒体服务器建立连接,如果卫星空口上没有待拉取的媒体流,则反向代理服务器向媒体流服务器拉取相应的媒体流;如果卫星空口上已经存在待拉取的流,否则终端直接从卫星空口接受广播数据进行解码即可。

(4)多媒体服务器(包括直播和点播)与反向代理服务器建立TCP连接,将相应的流推送到反向代理服务器;反向代理服务器将接收到的流进行协议转换,去除TCP包头并添加UDP包头,然后转发到卫星转发器继而将媒体流推送到卫星上,卫星采用下行广播的方式将流媒体流下发到各个地面接收器。

(5)终端通过UDP协议接收与反向代理服务器协商好的组播组接收多媒体流,然后对多媒体流进行缓冲、解密、音视频解码、FEC纠错、渲染、呈现等处理。

综上所述,本系统具有如下几个重大改进点:

(1)大幅度缩减带宽占用。假设一路多媒体流占用256 kbit/s带宽,如

果有1 000路视频且同时有1万观众观看,新系统的带宽占用只有传统流媒体系统带宽的0.01%(因传统流媒体系统将占用2.560 Tbit/s带宽,而采用本文系统将只占用256 Mbit/s)。从上述结果看:本系统占用的带宽只与流媒体源的数量有关,而与终端用户的数量无关。

(2)传统流媒体系统与本系统无缝对接。因本系统也有基于传统互联网传输链路,使得本系统可以与传统流媒体系统无缝对接。具体而言,从终端用户角度看,可以无感知地接入卫星网络和微蜂窝网络并无缝切换。从系统开发者角度看,其使用方法和与传统流媒体系统没有区别,可实现平滑对接和部署。

(3)大幅度减少时延问题。在本系统拉流时,反向代理服务器会判断媒体是否已经下发,所以本系统的时延只在流媒体首次拉取时发生。对于已经下发的流媒体,新用户拉取时是从卫星终端拉取而不需要从流媒体服务器拉取,从而大大缩短延时,从而大幅提升用户体验。

(4)有效部分解决误码问题。本系统采用FEC算法进行解决,因为传输数据有冗余导致对带宽略有损失,但这样避免终端经常出现的花屏,从而有效提升用户体验。

## 2 适合基于卫星传输的流媒体系统关键技术

为了使本系统充分利用卫星传

输特点,我们做了大量创新,本节着重讲解卫星传输在流媒体应用的相关部分。将图2的反向代理至终端部分,细化即为图3。

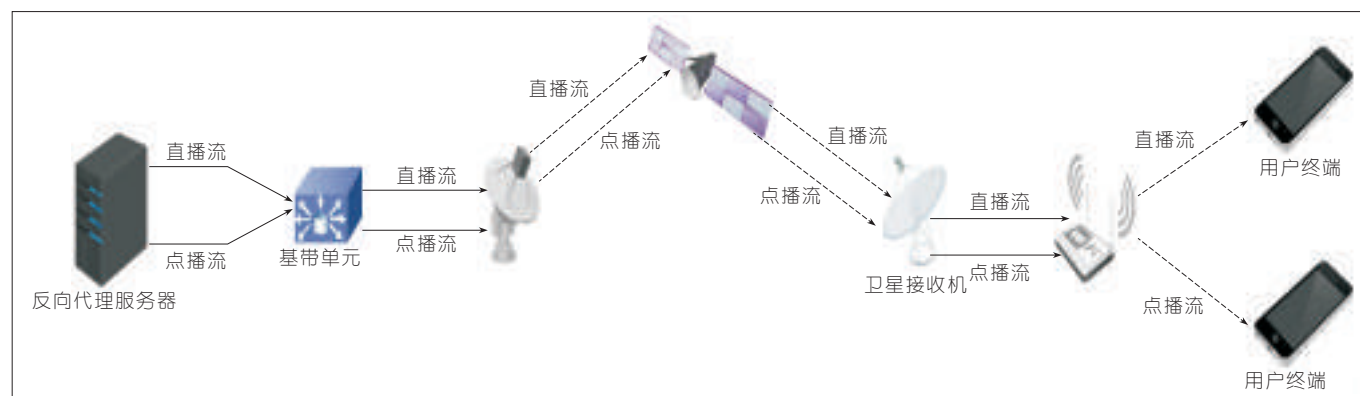
如图3所示,卫星链路传输主要包括反向代理服务、基带处理单元、卫星地面转发器、通信卫星、卫星地面接收器、卫星信号分发器及终端设备。反向代理与基带单元在同一个层二网络中,且一般部署在运营商的机房中且只有内网IP,因此需要通过机房的网络地址转换(NAT)机制与公网进行通信。卫星接收机只需要在通信卫星覆盖范围内即可,且不限数量,此设备负责接受/发送卫星链路数据并进行传输协议解析转换。

为了更加清晰描述上述各设备在流媒体系统中发挥作用,下面我们实例化手机端从流媒体服务器中下拉多媒体流的过程,如图4所示。

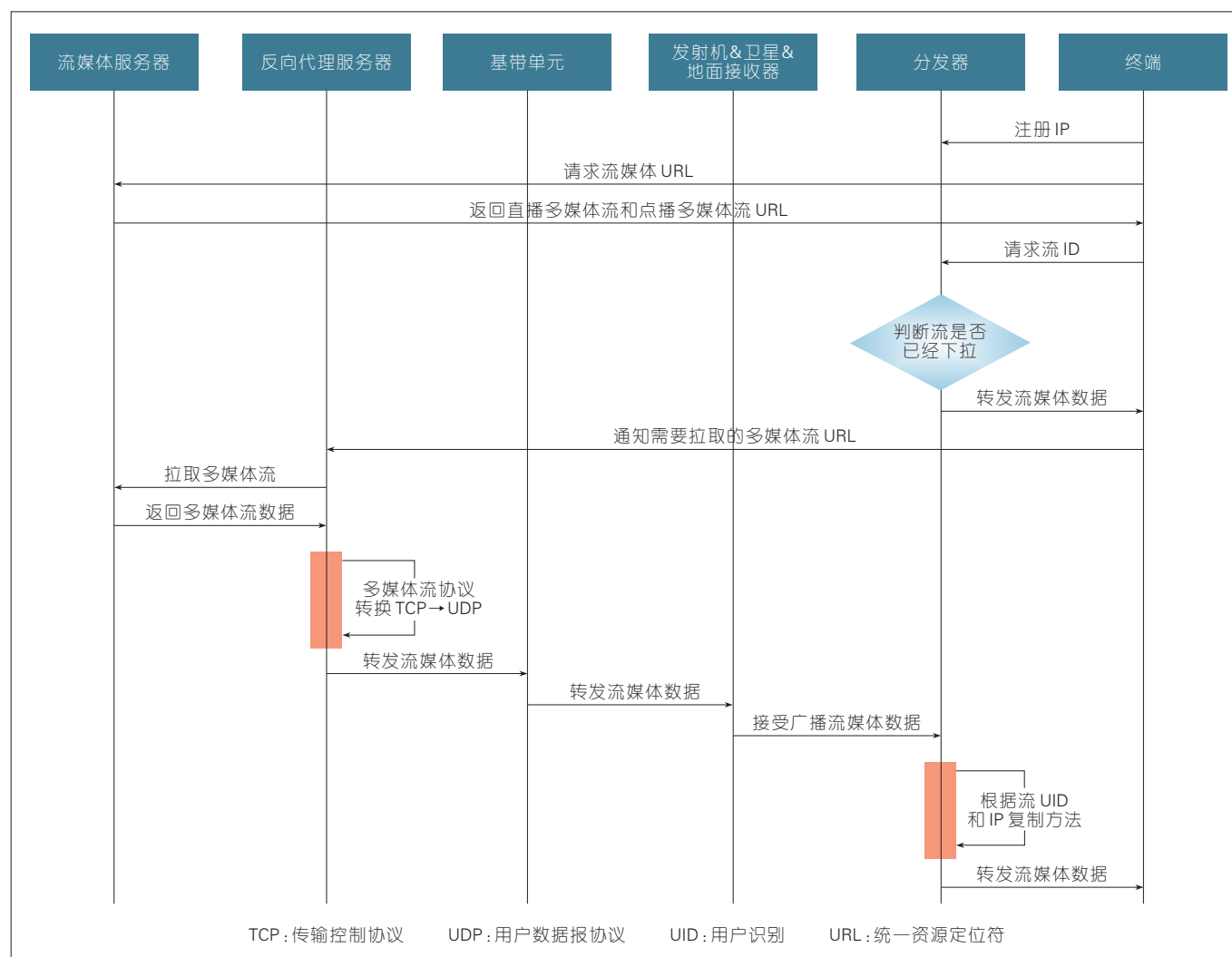
针对图4,需要特别说明2点。

(1)关于多路媒体流。反向代理收到拉取的流媒体数据后,将数据包中包头去掉,重新封装UDP包头。此时转发给基带单元协商好的固定IP和特定组播组发送。由于有多路流,为了避免多路流相互影响,端口就是一个范围,并且反向代理服务器向基带单元转发时选择一个未使用的端口即可,并将组播组详情通知到分发器和终端,这样分发器和终端才从对应的组播组分发和接收数据。

(2)关于节省带宽,主要采取3



▲图3 流媒体卫星传输链路示意图



▲ 图4 基于卫星链路的流媒体系统终端拉取流媒体流过程

种方法:首先,因为卫星链路具有广播特性,当一个流媒体被终端拉取后,除此终端对应的分发器能接受到此流数据外,处于卫星覆盖范围的所有分发器都可以接受到媒体流数据,那当其他分发器下的终端拉取此媒体流时,不需要再拉取流从而节省带宽,如果没有请求此媒体流,那么分发器可以直接抛弃此媒体流数据;其次,对于已经被终端拉取的多媒体流,如果同一个分发器下的其他终端也需要获取相同的多媒体流,此时其将请求流ID发送给分发器,分发器将相应的流复制一份给此终端,不再需要从流媒体服务器上拉取,这样也解决大部分用户的流媒体延时的

问题,提示用户体验友好度;最后,反向代理将拉流情况进行记录,当某一路所有的用户都没有查看时,反向代理服务器主动断掉从流媒体服务器获取媒体流数据,这样既可避免卫星带宽的占用,又可以节省Internet的带宽。

### 3 试验结果

关于文章提出的基于卫星链路的流媒体系统的测试,针对上文中提到的卫星传输的带宽贵、时延大、误码高的3个问题,我们主要从带宽占用、用户延时2个方面进行测试。

针对带宽占比测试,我们采用一路媒体源,因为基于卫星链路,故视

频参数设置较低,通用影像传输格式的摄像头的比特率为64 kbit/s。终端采用2种模式:使用传统方案即基于TCP模式;使用本文所提方案。主要关注点是随着终端的增加(从100个用户增加到1000个用户),卫星空口带宽的占用情况,其具体的测试结果如5所示。

从图5来看:本文所提的系统架构的卫星带宽占用至于流媒体源大小有关,与用户数无关;而传统的系统架构不但与流媒体源大小有关,而且与用户数成直线关系。

关于用户时延测试,本文系统的优势主要在于已经下发流的用户接入情况。针对时延测试,主要有2种

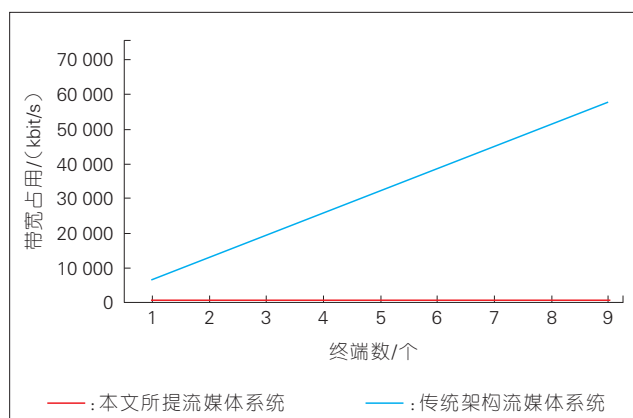


图5  
带宽占用与终端数量的  
关系图

场景:观看当前无人观看的实时流;观看当前已经有人观看的实时流。终端采用2种模式:使用传统方案即基于TCP模式;使用本文所提方案。测试结果如图6所示。

从图6来看,对于流媒体第1次下发,2种统架构时延基本持平;而对于已经下发的流,其他用户再次请求此多媒体流时,其延时急剧降低,

几乎为常量,究其原因分是分发器组播的设计。

## 5 结束语

卫星作为移动通信的有效补充手段,有着部署便利和运维成本低等优势,但带宽贵、时延大、误码高等问题影响基于卫星链路的多媒体应用。通过协议改造、架构优化、冗余

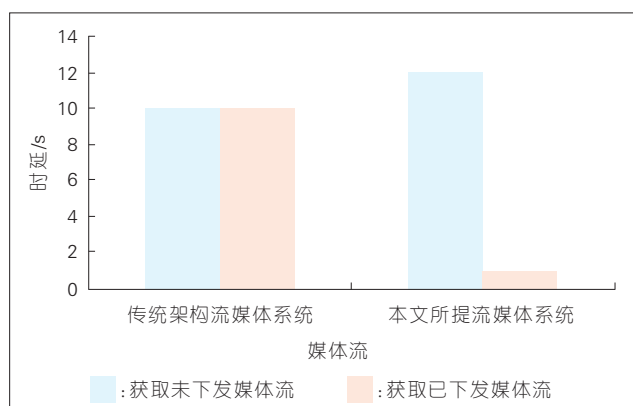


图6  
不同媒体流下发时延  
对比图

纠错等相关手段,可以提高卫星传输的性能,改善卫星作为多媒体特别是流媒体的媒介功能,对移动通信网络系统的扩展至至关重要的作用。

## 参考文献

- [1] CNNIC. 第40次中国互联网络发展状况统计报告[R]. 北京:中国互联网络信息中心, 2017
- [2] 吴莉莉,刘益成. 流媒体技术及应用[J]. 信息技术, 2002, (1): 39-41
- [3] 刘旭东,王罡,马杏池,等. 卫星通信技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2000
- [4] 车晴,王京玲. 数字卫星广播系统[M]. 北京:北京广播学院出版社, 2000

## 作者简介



**黄泽武**,中兴通讯股份有限公司资深软件架构师,参与或主持多项产品产业化研发工作,在嵌入式软件和高并发系统方面有丰富经验;拥有6项创新型发明专利。



**韩桂鲁**,中兴通讯股份有限公司高级工程师,先后从事CDMA、FDD LTE产品软件研发、无线大数据算法工作,在使用大数据进行无线性能优化方面积累了丰富的经验。



**李双全**,中兴通讯股份有限公司资深项目经理、架构师,在嵌入式操作系统方面积累丰富经验。



# 基于深度卷积神经网络的视觉 SLAM 去模糊系统

## Deep Convolutional Neural Network for Visual SLAM Deblurring

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0062-005

**摘要:** 提出了一种高效的、基于深度卷积神经网络(CNN)的图像去模糊算法。网络结构基于条件生成对抗网络,并使用堆叠的自编码器结构与跳跃相连接。相关的试验结果表明:该算法有良好的图像去模糊效果,并且能够大幅度地降低时间与内存开销。

**关键词:** 图像去模糊; 卷积神经网络; 对抗生成网络

**Abstract:** In this paper, an efficient deep convolutional neural network (CNN)-based image deblurring method is proposed. The network architecture is based on conditional generative adversarial network integrated with stacked encoder-decoder architecture and skip connections. Experiment results show that the proposed method achieves good image deblurring performance and in the meanwhile reduce the testing time and required memory resource.

**Key words:** image deblurring; CNN; generative adversarial network

缪弘/MIAO Hong  
张文强/ZHANG Wenqiang

(复旦大学, 上海 200433)  
(Fudan University, Shanghai 200433, China)

### 1 模糊对视觉 SLAM 的影响及图像去模糊简介

同时定位与地图构建(SLAM)的目的是让机器人利用各类传感器信息来得知自身的位置以及周围的环境。因此,SLAM是实现机器人自主移动的一项关键技术。视觉SLAM是指利用视觉传感器的信息的SLAM系统,其输入就是视觉传感器得到的图像。

在机器人运行过程中,因为相机抖动、景物移动等原因,都会造成图像模糊。无论是特征点法还是直接法,模糊的图像输入都会直接影响视觉SLAM系统,降低系统整体的运行

效率。视觉SLAM系统需要将拍摄的前后两帧图像进行匹配,根据匹配结果对自身进行定位,这一过程称为跟踪。在跟踪过程中,模糊的输入图像会造成匹配失准或无法匹配,这被称为跟踪失败。当出现跟踪失败时,需要让整个机器人停止运动或者回退,重新拍摄清晰的图像,同时需要进行全局的地图搜索,定位当前机器人的位置,直至跟踪成功,机器人再重新开始运动。全局的地图搜索是一个相对耗时的操作,如果频繁地触发这一操作,会影响整个SLAM系统的运行效率。同时,每次机器人停止运动或者回退,都使得运行过程变得不连续,影响了流畅性。因此,模糊的输入图像是需要避免的。为了避免模糊的输入图像,我们可以使用去模糊算法对图像进行处理,恢复出清晰的

图像。

相机抖动、相机与景物之间的相对运动造成模糊一般被称为运动模糊。图像中的运动模糊效果通常在空间上是不均匀的,这是由于不同对象的运动经常是彼此不同的。取模糊算法的目的就是恢复出一张没有模糊的清晰的图像。以前的大部分方法都是通过这个模型来建模图像上的模糊:

$$B = K \times S + n \quad (1)$$

其中  $B$ 、 $K$ 、 $S$  和  $n$  分别是模糊的图像、模糊核、潜在的清晰图像和噪声。在去模糊问题中,模糊核是未知的。因此,这些方法需要在只有给定的模糊图像  $B$  同时估计模糊核  $K$  和潜在清晰图像  $S$ ,这其实可以看为一个病态的问题。

实际上,真实世界模糊图像的模糊核往往在空间上不均匀。估计空间非均匀的模糊核是一个难题,因为每个像素的模糊核都可能不同。因此,以前的一些方法<sup>[1-4]</sup>都对模糊来源做了一些简单的假设,以简化模糊核估计。然而,由于实际的模糊核通常比所假设的模糊核更加复杂,所以通

过这些方法估计的模糊核是不准确的。不准确的模糊核的估计直接会降低潜在的清晰图像的质量。因此, 这些方法只适用于几种特定的模糊类型。

近年来, 越来越多的方法使用卷积神经网络(CNN)来解决去模糊问题的方法<sup>[5-10]</sup>。由于缺乏真实场景下的模糊清晰图像对, 文献[5-8]中的方法通过合成模糊核进行卷积来产生模糊图像进行训练。另外, 这些方法不是以端到端的方式, 并且仍然需要估计模糊核或逆模糊核。因此, 这些方法仍然存在模糊核的估计不准确的问题, 而且它们在真实模糊图像上的表现比人工生成的模糊图像要差。文献[9]提出了一个由高速摄像机拍摄的真实场景下的模糊清晰图像数据集, 文献[9-10]中的模型在这个数据集上进行了训练。此外, 两种方法都是以端对端的方式, 直接生成清晰图像, 没有进行模糊核的估计。因此, 这两种方法在性能上都超越了以前的方法。然而, 文献[9]中的方法运行缓慢, 文献[10]中的方法相对较快, 但仍需要大量内存资源, 这使得人们很难在实践中应用这些方法。

基于上述的研究现状, 我们提出了一种基于深度卷积神经网络的图像去模糊算法。算法整体基于条件对抗生成网络, 在网络结构上使用堆叠的自编码器结构与跳跃连接。通过在基准数据集上的实验, 算法表现出了良好的图像去模糊效果, 并且能够大幅度地降低时间与内存开销。算法的高效性使其更容易与视觉SLAM系统相结合。

## 2 基于深度卷积神经网络的去模糊算法

### 2.1 网络结构

我们的网络是基于对抗生成网络设计的, 包含有1个生成器和1个鉴别器。生成器的任务是从输入的模糊图像中提取特征, 利用特征生成

出一张足以“骗过”鉴别器的图像。鉴别器的任务是正确地判别出一张图像是真实的清晰图像, 还是一张生成器生成出来的图像。通过让生成器和鉴别器互相对抗式地学习, 生成器和鉴别器的能力都能得到提升, 最终生成器能从一张输入的模糊图像中生成出一张真实的清晰图像。

生成器的网络结构如图1所示。生成器的结构包括3个部分: 头部、中部与尾部。

头部只包含有一个 $5 \times 5$ 的卷积层。这个卷积层将3通道的输入图像映射为一个64通道的特征映射, 作为生成器中部的的基础。我们并没有在头部的卷积层后接一个激活层, 这是因为我们在生成器中部的构建模块中使用了文献[11]中提到的前置激活层的方法, 所以头部卷积层的激活层包含在了中部的构建模块中。

中部包含有连续 $N$ 个构建模块, 并且每一个构建模块都有一个残差连接。因为构建模块是基于自编码器结构的, 所以我们把构建模块称为“自编码器模块”。因为输入的模糊图像与要输出的清晰图像在数值上很接近, 所以网络所需要学习的函数比起零映射更接近与恒等映射, 而带有残差连接的结构更容易学习到一个恒等映射<sup>[12]</sup>。我们选择将 $N$ 个自编码器模块顺序地堆叠, 因为这使得网络能够重复地从整张图像中提取特征。每一个自编码器模块只需要在输入的特征映射上做一点改进, 最终就能得到一个足够好的特征映射。在实验中, 我们选择 $N=2$ 。

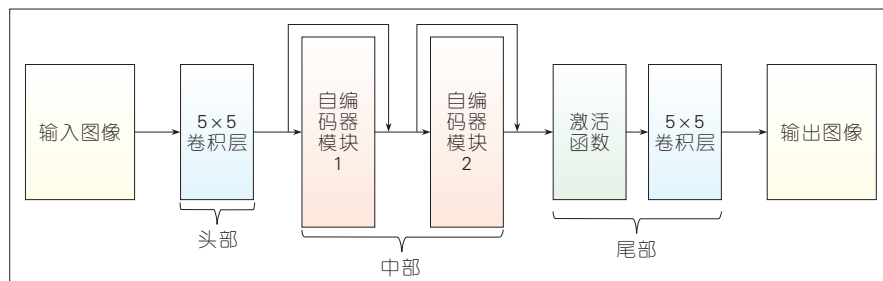
尾部包含有一个激活层和一个

$5 \times 5$ 的卷积层。尾部的任务是将中部产生的特征映射变换到最终的输出图像。在整个生成器中, 我们都没有使用任何归一化层, 因为我们发现添加归一化层反而会使得结果变差, 同时会带来更大的时间与内存开销。

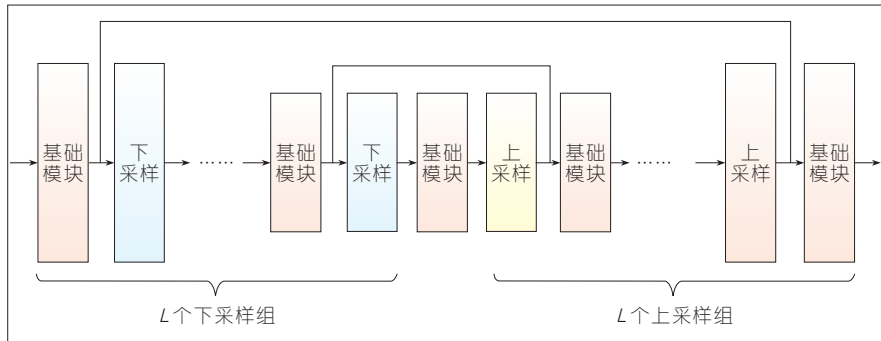
### 2.2 自编码器模块结构

自编码器模块的结构如图2所示。我们使用一种残差模块、最大池化层和最近邻插值层来构建自编码器模块。我们称这种残差模块为“基础模块”。基础模块能生成维度与其输入一样的特征映射。我们将一个基础模块和一个最大池化层定义为一组“上采样组”, 将一个基础模块和一个最近邻插值层定义为一组“下采样组”。在自编码器模块中, 输入的特征映射先经过 $L$ 组下采样组不断下采样, 直至到达瓶颈层(包含一个基础模块), 然后再经过 $L$ 组上采样组不断上采样。同时, 我们在第 $i$ 个最大池化层和第 $L-i$ 个最近邻插值层中添加了跳跃连接, 共 $L$ 个跳跃连接。在实验中, 我们选择 $L=4$ 。

自编码器模块的结构与Hourglass Network<sup>[13]</sup>和U-Net<sup>[14]</sup>的结构类似。类似自编码器的结构能够提取不同尺度的特征, 而跳跃连接能够将它们组合起来。因为同一张图像, 模糊的程度会随着尺度的降低而降低, 所以不同尺度的特征可以用来处理不同程度的模糊。因为输入图像上各处的模糊程度都可能相同, 所以提取不同尺度的特征是很重要的<sup>[15]</sup>。我们使用跳跃连接是因为跳跃连接能直接将网络的低层信息传递到网络的高



▲ 图1 生成器结构



▲ 图2 自编码器模块结构

层,这能让网络的输出共享低层信息。另外,跳跃连接还能直接将梯度信息从高层传递到低层,这会让网络的训练更加容易。

### 2.3 基础模块结构

基础模块的结构如图3所示。基础模块的输入与输出维度相同,我们将输入与输出的通道数定义为 $C_{br}$ 。在一个基础模块中,共有 $C$ 条路径。每一条路径包含两个卷积核大小为 $3 \times 3$ 的卷积层,并且在每个卷积层之前都有一个激活层。第1个卷积层的输出与第2的卷积层的输入通道数相同,都为 $D$ 。每条路径除了卷积层的膨胀系数都相同。每个卷积层的膨胀系数从1增加到 $C$ 。基础模块也包含一个残差连接。我们将所有路径的输出与模块的输入相加,得到最后的输出。在实验中,我们选择 $C_{br}=64, C=4, D=16$ 。

基础模块的结构设计受到了ResNeXt<sup>[16]</sup>中残差模块的启发。这2种模块都使用了残差连接,并且将多路操作聚合起来。但与ResNeXt中的残差模块不同的是:基础模块中每一路操作都不同,而ResNeXt中每一路操作都相同。每一路中使用不同的膨胀系数,可以在不增加参数量的情况下增大了感受域,同时还能提取到不同尺度的特征。

### 2.4 鉴别器结构

鉴别器是基于条件对抗生成网络设计的,需要两组图像对作为输

入。一组图像对包含一张模糊图像与对应的清晰图像,另一对图像对包含模糊图像和对应的经生成器处理的图像。与传统的对抗生成网络相比,条件对抗生成网络的鉴别器需要一张额外的模糊图像作为输入。这样做的好处是在让生成器生成的图像“欺骗”鉴别器的同时,还能保持与输入的模糊图像的一致性。

鉴别器结构的设计参照PatchGAN<sup>[17]</sup>,只包含5个卷积层。鉴别器输出的是一个特征映射,特征映射中的每一个值都对应于输入图像中的一块。因此,比起整张图像,鉴别器更着重于局部的图像块,这会鼓励生成器去生成更清晰的局部边缘与结构。而且,浅层的鉴别器结构也能节约训练的时间。

### 2.5 损失函数

生成器的损失函数包含了 $\ell_1$ 损

失函数和对抗损失函数。 $\ell_1$ 损失函数常常被用于图像恢复任务,它可以让生成图像与目标图像的像素值更接近。然而,只使用 $\ell_1$ 损失函数会导致结果过于平滑。为了防止过于平滑,我们将对抗损失函数与 $\ell_1$ 相结合。我们没有使用文献[18]中使用的对抗损失函数形式,而是使用了最小二乘生成对抗网络(LS-GAN)<sup>[19]</sup>中的形式。鉴别器的对抗损失函数定义如式(2):

$$\mathcal{L}_{adv}^D = \frac{1}{2} E_{x \in B, y \in S} \left[ (D(x, y) - b)^2 \right] + \frac{1}{2} E_{x \in B} \left[ (D(x, G(x)) - a)^2 \right] \quad (2)$$

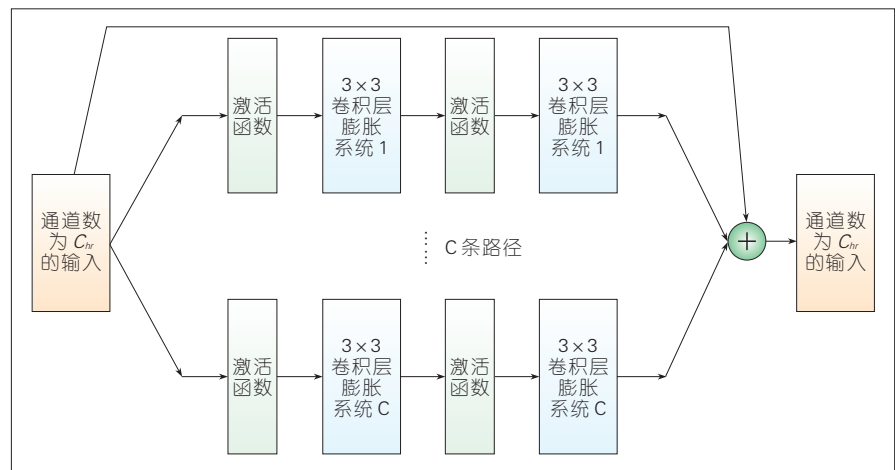
生成器的对抗损失函数定义如式(3):

$$\mathcal{L}_{adv}^G = \frac{1}{2} E_{x \in B} \left[ (D(x, G(x)) - c)^2 \right] \quad (3)$$

其中, $B$ 和 $S$ 分别表示模糊图像集合和清晰图像集合, $a$ 和 $b$ 分别表示生成图像和真实图像的标签, $c$ 表示生成图片想要达到的标签。根据文献[19]中的设置,我们选择 $a=0, b=1, c=1$ 。与文献[18]中的对抗损失函数相比,LS-GAN中的形式在训练中更加稳定,更容易训练。最后,整体的损失函数如公式(4)所示:

$$\mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{\ell_1} + \lambda \mathcal{L}_{adv}^G \quad (4)$$

在实验中,我们将权重系数设为



▲ 图3 基础模块结构



$\lambda = 0.01$ 。

### 3 相关实验

所有的实验都是在同一台使用 Titan XP 显卡的工作站上进行的。我们的模型使用 pytorch 库来实现。

#### 3.1 GOPRO 数据集上的实验

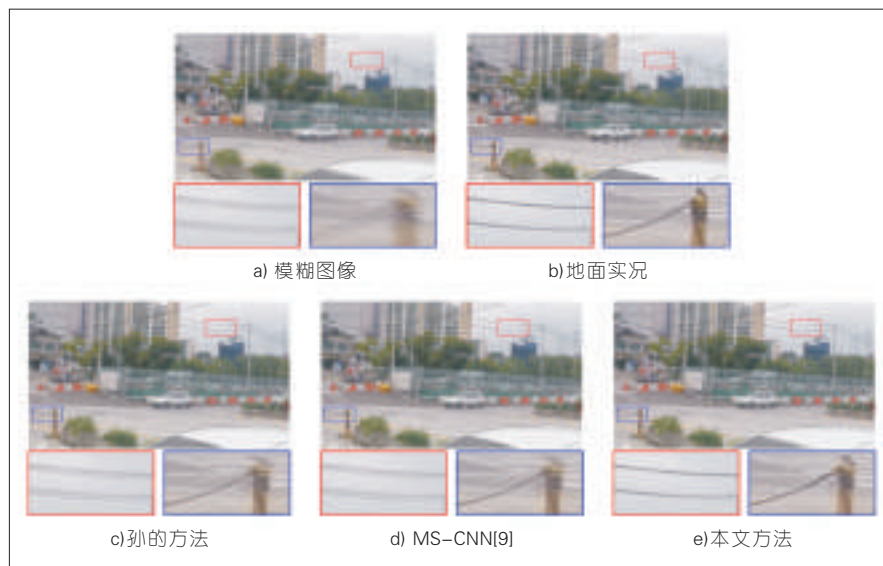
GOPRO 数据集包含了 3 214 对高速摄像机拍摄的模糊清晰图像对,其中训练集包含 2 103 对,测试集包含 1 111 对。我们与其他先进的去模糊算法进行了对比实验,并进行了定性与定量的分析。图 4 展示了一些去模糊效果图,从中我们能看出多尺度卷积神经网络(MS-CNN)方法与孙的方法<sup>[7]</sup>都出现了振铃效应,而我们的方法则避免了这一情况。表 1 展示了定量分析的结果,我们的方法在峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)的指标上都远远超越了其他的一些方法。

#### 3.2 Köhler 数据集上的实验

Köhler 数据集<sup>[20]</sup>包含 4 张清晰图像,每张清晰图片有 12 张对应的模糊图像。作者记录了 12 条不同的相机轨迹来生成 12 张不同的模糊图像。我们在 Köhler 数据集上进行了对比实验,并做了定量分析,如表 2 所示。

#### 3.3 时间与内存开销

我们在时间与内存开销上与其他方法做了对比。为了公平起见,我们用 pytorch 库重新实现了 MS-CNN<sup>[9]</sup>与深度对抗滤波(DGF)<sup>[10]</sup>。对于每一个方法,我们分别测试了 1 000 张 1 280×720 的图片,计算平均的时间与内存开销。对于时间测试,我们只计算正向传播的时间,不考虑反向传播的时间。对于内存测试,我们只计算生成器的内存开销,不考虑鉴别器的内存开销。表 3 展示了时间与内存开销的对比实验。我们的方法比 DGF 快 3.4 倍,比 MS-CNN 快 8.4 倍,



▲ 图 4 在 GOPRO 数据集上的对比实验效果图

▼ 表 1 在 GOPRO 数据集上的对比实验结果

方法	PSNR	SSIM
孙的方法 <sup>[7]</sup>	24.6980	0.8561
MS-CNN <sup>[9]</sup>	28.4498	0.9008
本文方法	29.2168	0.9208

MS-CNN: 多尺度卷积神经网络  
PSNR: 峰值信噪比  
SSIM: 结构相似性

▼ 表 2 在 Köhler 数据集上的对比实验结果

方法	PSNR	MSSIM
孙的方法 <sup>[7]</sup>	25.12	0.7748
MS-CNN <sup>[9]</sup>	26.51	0.8083
本文方法	25.91	0.8115

MS-CNN: 多尺度卷积神经网络  
MSSIM: 结构相似度均值  
PSNR: 峰值信噪比

▼ 表 3 平均时间与内存开销表

方法	时间/s	内存/MB
MS-CNN <sup>[9]</sup>	2.9285	8 279
DGF <sup>[10]</sup>	1.1823	7 665
本文方法	0.3478	2 119

DGF: 深度对抗滤波  
MS-CNN: 多尺度卷积神经网络

同时消耗的内存是 DGF 的 25.59%, 是 MS-CNN 的 27.65%。这显示出我们的方法更加高效, 更容易应用于实际

场景中。

### 4 结束语

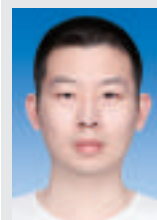
本文中,我们提出了一种基于深度 CNN 的图像去模糊方法。与现有方法相比,该方法更加高效。通过在不同数据集上的测试,该方法与目前最先进的方法效果相当,同时速度更快,所需内存空间更少。运行速度快与所需内存少的特性,使这种方法更容易应用于包含视觉 SLAM 系统在内的实际应用中。

#### 参考文献

- [1] GUPTA A, JOSHI N, ZITNICK C L, et al. Single Image Deblurring Using Motion Density Functions[C]// European Conference on Computer Vision. German: Springer, 2010: 171-184.
- [2] KIM T H, AHN B, LEE K M. Dynamic Scene Deblurring[C]//International Conference on Computer Vision. USA:IEEE, 2013:3160-3167. DOI: 10.1109/ICCV.2013.392.
- [3] KIM T H, LEE K M. Segmentationfree Dynamic Scene Deblurring[C]//Computer Vision and Pattern Recognition. USA:IEEE, 2014:2766-2773. DOI: 10.1109/CVPR.2014.348.
- [4] WHYTE O, SIVIC J, ZISSERMAN A, et al. Non-Uniform Deblurring for Shaken Images [J]. International Journal of Computer Vision, 2012, 98(2): 168-186.
- [5] CHAKRABARTI A. A neural Approach to Blind Motion Deblurring[C]//European Conference on Computer Vision. German: Springer, 2016: 221-235.

- [6] SCHULER C J, HIRSCH M, HARMELING S, et al. Learning to Deblur[J]. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, USA: IEEE, 2016, 38(7): 1439–1451. DOI: 10.1109/TPAMI.2015.2481418
- [7] SUN J, CAO W, XU Z, et al. Learning a Convolutional Neural Network for Nonuniform Motion Blur Removal[C]// Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2015:769–777. DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298677
- [8] XU L, REN J S J, LIU C L, et al. Deep Convolutional Neural Network for Image Deconvolution[C]//Advances in Neural Information Processing Systems. USA: MIT Press, 2014: 1790–1798
- [9] NAH S, KIM T H, LEE K M. Deep Multi-Scale Convolutional Neural Network for Dynamic Scene Deblurring[C]//Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/CVPR.2017.35
- [10] RAMAKRISHNAN S, PACHORI S, RAMAN S. Deep Generative Filter for Motion Deblurring[C]// International Conference on Computer Vision. USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICCVW.2017.353
- [11] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Identity Mappings in Deep Residual Networks[C]// European Conference on Computer Vision. German: Springer, 2016: 630–645
- [12] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep Residual Learning for Image Recognition[C]// Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2016: 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90
- [13] NEWELL A, YANG K, DENG J. Stacked Hourglass Networks for Human Pose Estimation[C]// European Conference on Computer Vision. German: Springer, 2016: 483–499
- [14] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation[C]// International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. German: Springer, 2015: 234–241
- [15] MICHAELI T, IRANI M. Blind Deblurring Using Internal Patch Recurrence[C]// European Conference on Computer Vision. German: Springer, 2014: 783–798
- [16] XIE S, GIRSHICK R, DOLL'AR P, et al. Aggregated Residual Transformations for Deep Neural Networks[C]//Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2017: 5987–5995. DOI: 10.1109/CVPR.2017.634
- [17] ISOLA P, ZHU J Y, ZHOU T H, et al. Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks[C]//Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/CVPR.2017.632
- [18] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative Adversarial Nets [C]//Advances in Neural Information Processing Systems. USA: MIT Press, 2014: 2672–2680
- [19] MAO X, LI Q, XIE H, LAU R YK, et al. Least Squares Generative Adversarial Networks [C]//International Conference on Computer Vision. USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICCV.2017.304
- [20] KOHLER R, HIRSCH M, MOHLER B, et al. Recording and Playback of Camera Shake: Benchmarking Blind Deconvolution with A Real-world Database[C]//European Conference on Computer Vision. German: Springer, 2012: 27–40

## 作者简介



缪弘, 复旦大学计算机科学技术学院在读研究生; 研究方向主要包括计算机视觉和人工智能。



张文强, 复旦大学研究员, 智能机器人研究院副院长; 研究方向主要包括机器人、人工智能、机器学习。

# 《中兴通讯技术》杂志(双月刊)投稿须知

## 一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术,以展现通信技术最新发展动态,并促进产学研合作,发掘和培养优秀人才,为振兴民族通信产业做贡献。

## 二、稿件基本要求

### 1. 投稿约定

- (1)作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台:tech.zte.com.cn/submission,并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2)编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿,并根据审稿意见,公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右。

### 2. 内容和格式要求

- (1)稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2)稿件需采用WORD文档格式。
- (3)稿件篇幅一般不超过6 000字(包括文、图),内容包括:中、英文题名,作者姓名及汉语拼音,作者中、英文单位,中文摘要、关键词(3~8个),英文摘要、关键词,正文,参考文献,作者简介。
- (4)中文题名一般不超过20个汉字,中、英文题名含义应一致。
- (5)摘要尽量写成报道性摘要,包括研究的目的、方法、结果/结论,以150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性。中英文摘要应一致。
- (6)文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚,上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7)图、表力求少而精(以8幅为上限),应随文出现,切忌与文字重复。图、表应保持自明性,图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表,表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8)参考文献以20条左右为宜,不允许公开发表的资料不应列入。所有文献必须在正文中引用,文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为:
  - 期刊[序号]作者. 题名[J]. 刊名, 出版年, 卷号(期号): 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 书籍[序号]作者. 书名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 论文集析出文献[序号]作者. 题名[C]//论文集编者. 论文集名(会议名). 出版地: 出版者, 出版年(开会年): 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 学位论文[序号]作者. 题名[D]. 学位授予单位所在城市名: 学位授予单位, 授予年份. 数字对象唯一标识符
  - 专利[序号]专利所有者. 专利题名: 专利号[P]. 出版日期. 数字对象唯一标识符
  - 国际、国家标准[序号] 标准名称: 标准编号[S]. 出版地: 出版者, 出版年. 数字对象唯一标识符
- (9)作者超过3人时,可以感谢形式在文中提及。作者简介包括:姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10)提供正面、免冠、彩色标准照片一张,最好采用JPG格式(文件大小超过100 kB)。
- (11)应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。
- (12)提供联系方式,如:通讯地址、电话(含手机)、Email等。

### 3. 其他事项

- (1)请勿一稿两投。凡在2个月(自来稿之日算起)以内未接到录用通知者,可致电编辑部询问。
- (2)为了促进信息传播,加强学术交流,在论文发表后,本刊享有文章的转摘权(包括英文版、电子版、网络版)。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘,请在投稿时说明。

编辑部地址:安徽省合肥市金寨路329号凯旋大厦1201室, 邮政编码:230061

联系电话:0551-65533356, 联系邮箱:magazine@zte.com.cn

本刊只接受在线投稿, 欢迎访问本刊投稿平台:tech.zte.com.cn/submission



办刊宗旨:

以人为本,荟萃通信技术领域精英  
迎接挑战,把握世界通信技术动态  
立即行动,求解通信发展疑难课题  
励精图治,促进民族信息产业崛起

---

双月刊 1995 年创刊 总第 142 期  
2018 年 10 月 第 24 卷 第 5 期

主管:安徽省科学技术厅  
主办:安徽省科学技术情报研究所  
中兴通讯技术杂志社  
出版:中兴通讯技术杂志社

总编:王翔  
常务副总编:黄新明  
责任编辑:徐烨  
编辑:卢丹、朱莉  
排版制作:余刚  
发行:王萍萍  
编务:王坤

---

《中兴通讯技术》编辑部  
地址:合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室  
邮编:230061  
网址:tech.zte.com.cn  
投稿平台:tech.zte.com.cn/submission  
电子信箱:magazine@zte.com.cn  
电话:(0551)65533356  
传真:(0551)65850139

编辑、发行:《中兴通讯技术》编辑部  
发行范围:公开发行  
印刷:合肥添彩包装有限公司  
出版日期:2018 年 10 月 25 日  
中国标准连续出版物号:  $\frac{\text{ISSN } 1009-6868}{\text{CN } 34-1228/\text{TN}}$   
定价:每册 20.00 元