

面向节能减排的 跨制式融合感知通信系统



Energy Conservation and Emission Reduction Oriented Perception and Communication Fused Wi-Fi and Cellular Integrated Communication System

周均翼/ZHOU Junyi, 周琳/ZHOU Lin,
张舜卿/ZHANG Shunqing

(上海大学, 中国 上海 200444)
(Shanghai University, Shanghai 200444, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202306004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20231214.1420.002.html>

网络出版日期: 2023-12-14

收稿日期: 2023-10-15

摘要: 提出了一套面向节能减排的跨制式融合感知通信系统, 该系统包括通信融合、感知融合以及边缘协同管控平台3部分。经过相关实验的验证, 该系统能够对各类节能算法进行快速的脚本化原型测试, 有望对未来面向节能减排的跨制式网络设计提供可靠验证与指导。

关键词: 绿色网络; 跨制式网络; 原型验证平台; 协同管控

Abstract: A perception and communication fused Wi-Fi and cellular integrated communication system is proposed, including fused communication, fused perception, and edge collaborative control platform. With the proposed fusion perception communication system, rapid script-based prototyping tests can be conducted on various energy-saving algorithms, providing reliable validation and effective guidance for future energy-conserving cross-disciplinary network designs.

Keywords: green network; Wi-Fi and cellular integrated communication system; prototype verification platform; collaborative management and control

引用格式: 周均翼, 周琳, 张舜卿. 面向节能减排的跨制式融合感知通信系统 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(6): 16-22. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306004

Citation: ZHOU J Y, ZHOU L, ZHANG S Q. Energy conservation and emission reduction oriented perception and communication fused Wi-Fi and cellular integrated communication system [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(6): 16-22. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306004

最近10年, 中国的碳排放总量年均增长2.3%, 超过世界平均水平^[1]。截至2019年, 信息与通信技术产业已经构成了全球5%的碳足迹。而到2020年, 该产业75%的碳排放均涉及无线通信行业, 全网碳排放量在持续增长^[2]。以上海的实际布网情况为例, 固网以及4G/5G的实际接入数大概是网络实际接入数的2倍。多制式的独立组网调度将导致巨大的资源浪费和重复覆盖, 从而使全网碳排放比理想情况增加20%左右^[3]。为了实现“双碳”目标, 可以将固网和移动网络进行统一管控, 实现跨制式资源的灵活调度与机会式休眠, 从根本上解决资源浪费问题。然而, 目前跨制式网络的

协同管控存在无法通过对协议栈的简单适配来达到跨制式资源的统一管控、无法实现对用户业务的全场景感知等问题。现有感知技术如上行到达时间差定位法(UTDOA)^[4]、到达角度定位法(AOA)^[5]等都极度依赖接入点的主动参与, 在站点休眠时无法进行。由于感知信息由相应的接入节点掌握, 因此无法进行跨制式的感知信息共享。现有的5G蜂窝网络、4G蜂窝网络以及Wi-Fi网络的灵活调度存在以下挑战:

1) 资源管理: 不同网络之间的资源分配和管理是一个复杂的问题。蜂窝网络和Wi-Fi网络具有不同的特性, 例如: 传输速率、覆盖范围和信号干扰等。调度算法需要考虑这些因素, 并在多个网络之间有效地分配资源, 以确保网络性能和用户体验。

2) 时延和吞吐量: 4G、5G和Wi-Fi网络的时延和吞吐量要求不同。5G网络通常具有较低的时延和较高的吞吐量,

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2902304、2022YFB2902005、2022YFB2902022); 国家自然科学基金项目(62071284、61904101); 广东省重点领域研发计划(2020B0101130012); 上海市科学技术委员会创新计划(21ZR1422400)

适用于实时应用和大规模数据传输。4G 和 Wi-Fi 网络可能在某些方面性能较低，需权衡时延和吞吐量的需求进行调度。

3) 扩展性和互操作性：灵活调度算法需要适应不断增长的网络规模和日益复杂的网络架构。对于多个移动设备和基站之间的调度决策，需要具备良好的扩展性和互操作性，以便实现跨不同网络的无缝切换和协同工作。

针对上述挑战，本文中我们提出了一个面向节能减排的感知融合智能通信系统。该系统首先实现对蜂窝网络以及 Wi-Fi 网络的软件灵活调度，构建了基于互联网协议 (IP) 层分流的双连接系统。然后，借助毫米波雷达模块以及无线指纹拓扑，构建了主动感知与被动感知协同的全场景解决方案。最后，利用时序数据库和并发通信接口，构建了协同控制平台。这一系统能够实现跨制式的协同传输、通过被动和主动感知的融合，实现全场景的跨制式感知，减少通信资源浪费的问题。

1 相关技术介绍

1.1 通信网络

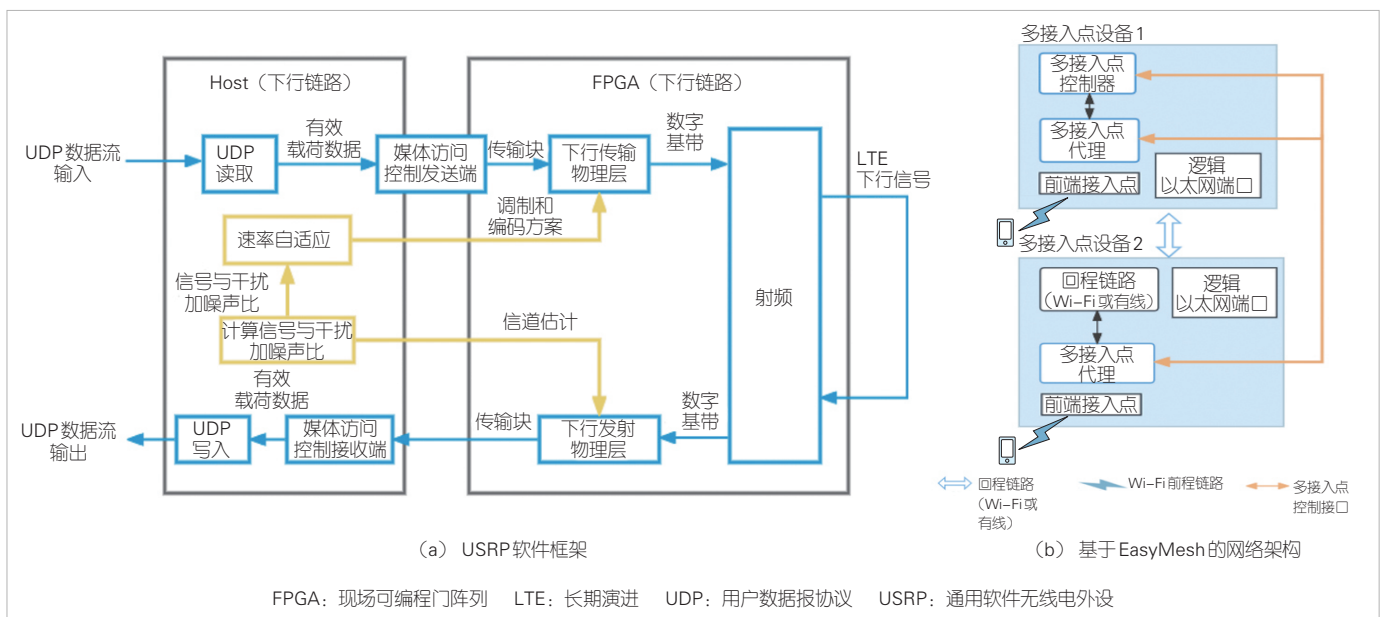
通信网络分为固定通信网络、移动通信网络等。固定通信网络的主要布网方式为光纤+Wi-Fi网络，为室内场景进行大带宽的稳定网络覆盖；而移动通信网络不受光纤布网的限制，为室内室外等多种场景下的用户提供多种服务。然而，固网和移动网不同的部署特点会带来网络重复覆盖和资源浪费，从而导致全网碳排放增加。

蜂窝网络是一种移动通信硬件架构，主要由移动站、网络子系统、基站子系统组成。为实现对蜂窝网络的调控，本文基于通用软件无线电外设 (USRP) 定义了蜂窝网络。USRP 则是一种开源的、低成本的无线电硬件平台，软件框架⁶⁾如图 1 (a) 所示。HOST 部分主要涉及收发配置，在上位机中实现。而物理层主要在现场可编程门阵列 (FPGA) 中实现。

对于固定通信网络，本文通过 OpenWrt 系统实现软件定义的自组织 Wi-Fi 网络。自组织 Wi-Fi 网络是一种无中心、多跳的网络，能够应用在没有基站覆盖的偏远地区。OpenWrt 是一个用于嵌入式设备的 Linux 系统。本文提出的通信系统在 OpenWrt 系统的基础上安装了 Wi-Fi 组网协议 (EasyMesh)⁷⁾，如图 1 (b) 所示。EasyMesh 网络包含 2 个逻辑实体：1 个多接入点控制器 (MAPC) 和 1 个或多个多接入点代理 (MAPA)。MAPC 从 MAPA 接收前端接入点、客户端和回程链路的测量和能力数据，并在 MAPA 上执行接入点控制相关的命令和操作。MAPA 执行从 MAPC 收到的命令，并与多接入点设备上的前端接入点和后向回传终端 (Back-haul STA) 的 Wi-Fi 子系统对接，以获得测量和能力数据，应用配置变化和执行接入点控制功能。

1.2 跨制式双连接传输系统

跨制式指不同的网络制式间的切换与交互。双连接是第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) Release-12⁸⁾ 版本引入的重要技术。通过双连接技术，长期演进 (LTE) 宏站和小站可以利用现有的非理想回传 X2 接口来实现载波聚合，从而为用户



▲图1 USRP 软件框架与 EasyMesh 网络架构⁶⁻⁷⁾

提供更高的速率，并可以利用宏/微组网提高频谱效率，负载均衡^[9]。支持双连接的终端可以同时连接两个基站，增加单用户的吞吐量。

跨制式双连接传输机制的系统由1个边缘服务器进行协同管控；数据传输部分的接入点由1个USRP、1个自组织Wi-Fi固网路由器组成，终端为跨制式终端。通信流程如下：用户向边缘服务器请求相应的数据业务，边缘服务器做出应答，并通过跨制传输机制建立传输。具体实现方式为：将传输层的数据包切割并排序，分发给与用户连接的接入点；接入点按照各自的协议栈进行传输；用户收到来自各个制式的数据包后，将数据包根据原来的顺序进行重新排序，并恢复成原来的数据流；同时用户利用上行链路进行相应协议栈缓存积压状态上报。

2 跨制式融合感知通信系统架构设计

本文所提出的面向节能减排的跨制式融合感知通信系统由通信融合、感知融合网络、边缘管控平台3部分组成。通信融合和感知融合网络部分可以实现对用户的分层感知以及对跨制式节点的节能参数的软件化编排。边缘管控平台实现统筹协调调度，支持各类场景下的节能设计。该通信系统架构设计及实物图如图2所示。

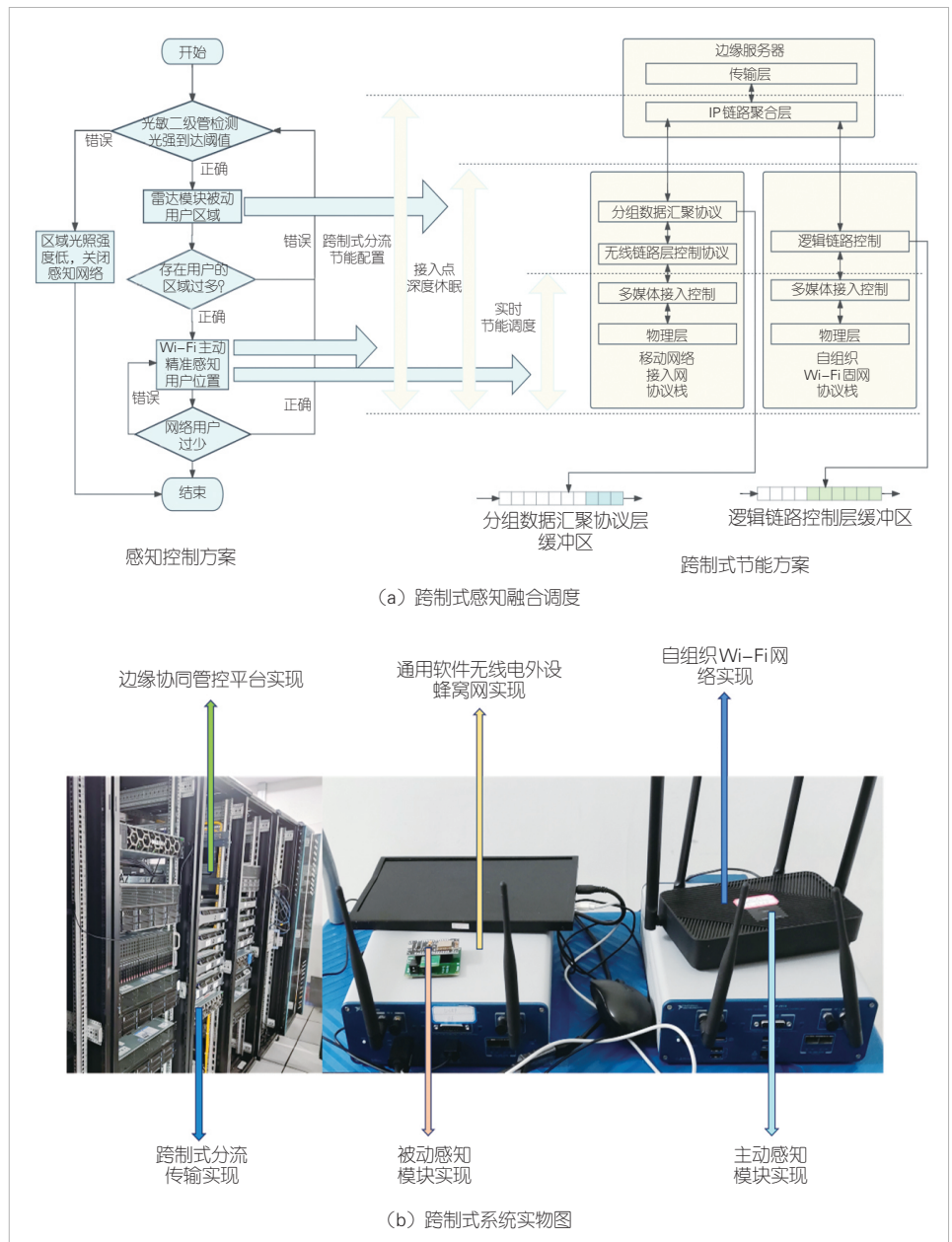
根据上述介绍，用户利用上行链路进行相应协议栈缓存积压状态上报，根据积压上报情况，对数据进行分流，以达到节能减排的效果。然而，跨制式系统的缓存积压不光来自用户需求与接入点通信能力的 mismatch，还来自数据包乱序等，因此我们提出了相应的系统模型来建模上述问题的场景，并提出相应的算法。

2.1 通信融合

为实现对跨制式资源的统一管控，该通信系统首先通过USRP实

现对4G/5G系统的软件调度，再通过OpenWrt开源系统实现软件定义的自组织Wi-Fi网络，最后通过跨制式IP层分流，实现跨制式的协同传输。

通过对USRP软件的下行HOST部分、下行FPGA部分进行修改，该通信系统支持节能关键参数的软件调度。为了认识基站的能耗构成以便后续的节能应用，我们引入了功耗模型^[10]，并结合实际系统关键参数，进行软件开发，以实现无线能耗统计模块的设计。基于USRP定义的蜂窝网络能够提供丰富的性能统计和参数调用，如调制编码策略(MCS)、资源块(RB)分配策略等。同时，部分参数为可控参数，



▲图2 通信系统架构设计及实物图

利用Labview图像化编程语言并使用传输控制协议(TCP)的通信方式,可以近实时地从边缘智能服务器获取系统调度参数并将其作用在USR P系统中,从而实现灵活的边缘智能管控。

此外,该通信系统在OpenWrt系统的基础上安装了Wi-Fi组网协议(EasyMesh)^[7],该组网协议实现了网关接入/休眠拓扑更新、路由智能寻优等功能。

为了使能节能减排的应用,我们为固网通信系统提供了多层休眠支持,包括基于智能物联网开关的接入点休眠和天线关断休眠。由于自组织固网的路由器接入点不能提供基带单元等的深度关断,因此考虑在低负载情况下,直接对自组织固网的接入点进行整站关断,以实现网络节能减排。该通信系统的智能物联网开关基于ESP8266芯片^[11]开发板硬件,通过Arduino平台进行二次开发。这样可以通过自组织网络主路由器网关连接边缘服务器,从而获取开关控制指令并进行上电、断电的操作。然后在初次上电时,连接ESP8266并将其作为路由器,然后发射Wi-Fi信号,在进入其系统的网络后台后,再设置与其通信的主路由器。经过以上配置,智能物联网开关实现通过路由器和边缘服务器上运行的TCP Server程序通信。该系统每5 s向边缘智能服务器发起一次TCP通信请求,然后接收开闭信号,以减少智能开关的通信能耗。

在OpenWrt系统中,通过对相关文件进行配置,可以控制天线的开关。

为了优化网络资源和网络负载管理,我们构建了基于IP层分流的双连接系统。该系统通过对不同制式的智能感知,实时调整不同制式的流量分配比例,使用户在一定网络功耗下获得尽可能高的服务质量。同时,不同制式的功率也在系统的监控和调节范围内,因此可以使能跨制式节能分流调度。首先,边缘服务器通过USR P和Wi-Fi传输的缓存状态差 ΔQ ,获取USR P和Wi-Fi当前工作功率 ΔP ;然后根据 ΔQ 和 ΔP 进行USR P和Wi-Fi的分流比例决策和工作功率决策;再根据决策结果调整二者的功率并在IP链路聚合层将流量分配给USR P和Wi-Fi。

针对具有等停机制的TCP传输协议,分流算法采用的是Fuzzy-PID算法^[12]。经验证,在上层协议具有等停机制时,最小化缓存差等价于最大化吞吐量。因此,该算法通过建立基于模糊逻辑的PID动态调整机制,来最大化跨制式传输的缓存差。此外,该算法还对用于分流决策的PID参数进行动态调整,能够在未知非线性、处理延迟和干扰的情况下达到预期的性能。

2.2 感知融合

为了实现全场景的智能感知系统,解决传统感知系统依赖于对应的接入点参与,无法应对站点休眠以及跨制式协同场景的问题,我们构建了主动感知与被动感知协同的全场景解决方案。被动感知系统在站点处于休眠等场景下,即时感知可能业务的接入;主动感知则是在中高负载时,感知用户的精准位置,从而支持更加精细的节能调度。

被动感知网络采用毫米波雷达模块,相较于市面上常见的车载雷达模块或者人体感应雷达模块,具有低功耗、易部署、高可信度的优势,感知范围为0~20 m。经实验验证,该被动感知系统能够在多种场景下实现高可信的粗粒度人员感知。

主动感知系统采用了基于图卷积网络(GCN)的室内感知定位算法^[13]。该主动感知方案分为两步:首先感知定位系统,然后感知全场景数据,并将数据经过自组织Wi-Fi网络上传至服务器,服务器运行该GCN算法,最终得出人员的精确位置。

上述两个感知系统协同运作,被动感知应对通信系统休眠等低负载业务场景,而主动感知主要处理业务密集的高负载场景,为跨制式通信系统提供全场景的业务数据支撑。

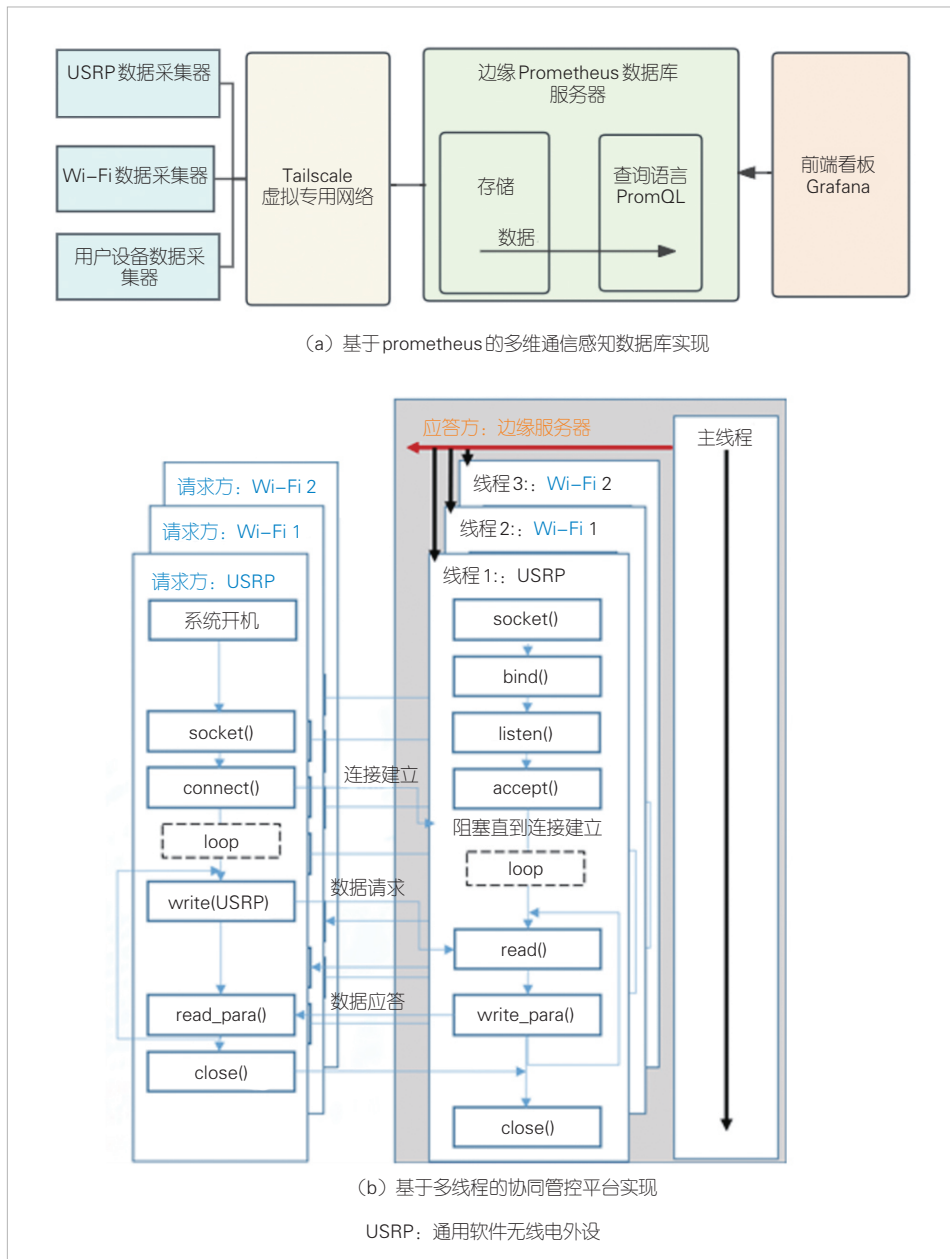
2.3 边缘管控平台实现

为了支持各类场景下的节能设计,我们首先基于Prometheus建立了多维通信感知数据库,并在此基础上设计了基于边缘服务器的协同管控平台。如图3(a)所示,该多维通信数据库主要包括以下几个部分:数据采集器Exporter、用于安全上报数据的通道Tailscale虚拟专用网络(VPN)、边缘Prometheus数据库服务器,以及前端看板Grafana。

数据采集器Exporter通过文件读取、页面抓取等方式获得USR P、OpenWrt等各个操作平台上的数据并进行存储。Tailscale VPN建立了一套虚拟的专用网络将所有的接入点以及终端的数据进行采集和上报。Grafana则对USR P、Wi-Fi、终端上采集到的性能与能耗数据等进行实时显示,方便网络运维人员进行实时监控以及问题排查。

协同控制平台通过可靠的通信方式实现多个跨制式接入点的并发控制,支持全栈式跨制式网络参数编排,以及各类节能算法的脚本化快速验证。

该系统通过使用基于websocket的多线程并发通信流程,实现并发的接入点网络参数获取,如图3(b)所示。边缘服务器的网络参数控制器主线程主要用来在阻塞循环中监听接入点的连接请求,在建立连接后,将该连接交给一个并发子线程进行数据请求的接收和参数的应答。依靠上述机制,



▲图3 边缘平台实现

边缘服务器可以在多个接入点请求参数时并发地根据需求应答网络参数，实现多接入点的协同管控。

此外，该系统提供了两个不同接口来设计协同控制平台，分别是节能参数调度接口和参数接口。该系统针对整个网络的各个协议栈提供了节能参数调度接口，实现了跨制式全栈式的网络参数编排；该系统提供的IP层的跨制式分流比例的参数接口，在网络部署时可以通过引入自动化分流策略脚本，根据有边缘多维通信感知数据库中信息动态调整分流比例，实现跨制式业务在各接入点间的按需分配。系统通过上述的跨制式节点间并发参数传递机制，将USRP节点的

射频关断以及自组织Wi-Fi路由器的物联网智能开关关断指令发送给响应的TCP通信链路，在读取被动感知参数以后，可以部署自动化脚本并通过简单的逻辑实现接入点深度关断，从而实现接入点的深度休眠。向接入点提供MAC层、物理层的节能调度参数，如天线关断、MCS、射频发送功率等，结合跨制式分流机制，实现接入点的实时节能调度。这一精细化的无线参数调度能够在满足用户体验的同时，达到节能的效果。

3 系统测试与分析

3.1 接入点深度休眠

为验证本文所提的接入点深度休眠带来的节能效果，我们搭建了表1所示的实验场景，将所提方案与普通节能调度策略进行了对比。

为了保证对比实验的客观性，我们在1h内让所有人员离开测试场景12min（20%的时间），然后再对比所提方案与普通节能调度策略的节能效果。我们发现在普通节能策略下，Wi-Fi接入点仍存在约为5.3W的静态功耗；而所提的接入点深度休眠策略通过物联网开关将接入点整站关断，能耗降为0，直到有人进入场所，数据恢复发送。

我们统计1h内系统的总能耗：所提方案消耗了17.13J

▼表1 能耗数据

参数	接入点深度休眠		
	Wi-Fi网络	Wi-Fi网络	蜂窝网络
接入点个数	1	2	1
天线个数	2	2	1
静态能耗/mW	5 300	5 300	11 000
发射功率/dBm	0~30	0~30	-10~30
带宽/MHz	20	20	18

的能量，普通节能调度方案消耗了 19.91 J 的能量。比起普通节能调度方案，本文所提方案降低能耗 13.96%。

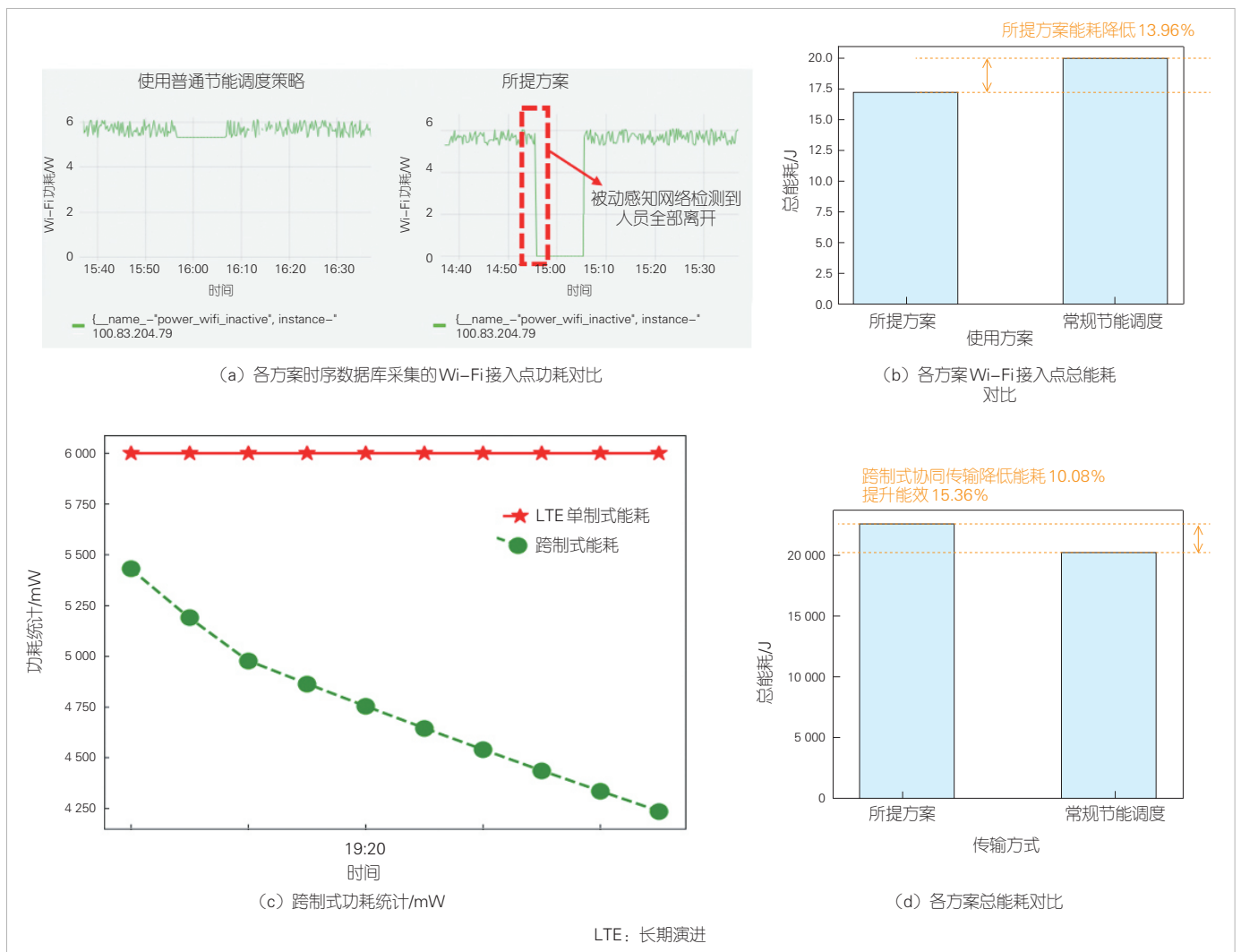
3.2 跨制式节能调度节能效果

为了验证所提的跨制式节能调度方案带来的节能效果，我们搭建表 1 所示的实验场景，将所提方案与单制式传输进行了对比实验。

为了保证对比实验的客观性，我们设置相同的用户吞吐量要求：两种传输方式的用户吞吐量为 26 Mbit/s。我们发现，在跨制式传输场景下，用户在某一制式信道发生变化后，跨制式分流机制迅速响应，并向另一制式分配更多流量，保证业务传输要求得到满足。此时能耗也产生了相应的波动。在自组织 Wi-Fi 网络自动切换到更好的接入点时，系统选择了更加节能的分流比，让信道条件和能效更高的制式

传输更多信息。此时，系统的能耗明显下降。

如图 4 所示，图 4 (a) 对比了所提方案与普通节能调度策略的节能效果。可以看到在普通节能策略下，用户离开后，服务 Wi-Fi 接入点仍存在约为 5.3 W 的静态能耗。所提的接入点深度休眠策略通过物联网开关将接入点整站关断，能耗降为 0。直到有人进入场所，数据恢复发送。图 4 (b) 通过统计 1 h 内系统的总能耗，发现我们所提的接入点深度休眠方案消耗了 17.13 J 的能量，普通节能调度方案消耗了 19.91 J 的能量。比起普通节能调度方案，所提方案降低能耗 13.96%。图 4 (c) 比较了在一特定时间段，跨制式系统与单制式系统的能耗，跨制式能耗相较于单制式能耗有明显下降。图 4 (d) 统计了 10 min 内系统的总能耗，我们发现所提方案消耗了 20 271.29 J 的能量，单制式传输方案消耗了 22 544.74 J 的能量。比起常规的节能调度方案，所提方案降



▲图 4 各方案能耗对比

低能耗 10.08%，能效提高了 15.36%。总的来说，本文所提出的接入点休眠与跨制式系统的总体能耗相较于传统的单制式系统有明显下降。

4 结束语

随着全网能耗的日益增长，大量部署的现有跨制式节点却没有得到充分利用，这势必会带来资源的浪费。针对这一矛盾，本文首先提出了面向节能减排的跨制式融合感知通信系统。然后，借助软件定义无线电 USRP 平台以及开源操作系统 OpenWrt，实现了对蜂窝网络以及 Wi-Fi 网络的软件灵活调度，同时借助毫米波雷达模块以及无线指纹拓扑，实现被动感知和主动感知方式的共存。最后，利用时序数据库和并发通信接口，实现资源的集中管控。通过系统实测数据，我们发现所提的休眠策略与跨制式调度策略分别能够带来约 14% 和 10% 的总能耗降低。所提跨制式系统能够对各类节能算法进行快速的脚本化原型测试，有望对未来面向节能减排的跨制式网络设计提供可靠验证和有效指导。

参考文献

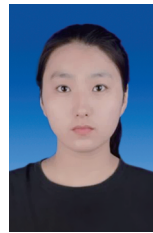
- [1] 张亚飞. 信息与通信技术在碳达峰、碳中和战略中的应用 [J]. 电子世界, 2021 (22): 146-147
- [2] GreenIT.fr Frédéric Bordage. The environmental footprint of the digital world [EB/OL]. [2023-10-12]. <https://thecalm.ca/wp-content/uploads/2020/02/The-Environmental-Footprint-of-the-Digital-World-Study.pdf>
- [3] 上海市通信管理局. 上海通信行业发展概况(2021年)[EB/OL]. (2022-02-17) [2023-10-12]. https://shca.mii.gov.cn/zwgk/xyfz/xytj/art/2023/art_828e4150f785419b9e78b970ae45e2dc.html
- [4] MCDERMOTT K, VAGHEFI R M, BUEHRER R M. Cooperative UTDOA positioning in LTE cellular systems [C]//Proceedings of 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2015: 1-6. DOI: 10.1109/glocomw.2015.7414171
- [5] XHAFA A, DEL PERAL-ROSADO J A, LÓPEZ-SALCEDO J A, et al. Evaluation of 5G positioning performance based on UTDOA, AoA and base-station selective exclusion [J]. Sensors, 2021, 22(1): 101. DOI: 10.3390/s22010101
- [6] EMERSON. LabVIEW communications system design suite release notes [EB/OL]. (2023-06-14) [2023-10-12]. https://www.ni.com/zh-cn/support/documentation/release-notes/product_labview-communications-system-design-suite.html
- [7] Wi-Fi Alliance. Wi-Fi EasyMesh [EB/OL]. (2023-06-14) [2023-10-12]. <https://www.wi-fi.org/zh-hans/discover-wi-fi/wi-fi-easymesh>
- [8] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN) V13.4.0: TS 36.300

- [9] ROSA C, PEDERSEN K, WANG H, et al. Dual connectivity for LTE small cell evolution: functionality and performance aspects [J]. IEEE communications magazine, 2016, 54(6): 137-143. DOI: 10.1109/mcom.2016.7498101
- [10] XU Z K, YANG C Y, LI G Y, et al. Energy-efficient configuration of spatial and frequency resources in MIMO-OFDMA systems [J]. IEEE transactions on communications, 2013, 61(2): 564-575. DOI: 10.1109/tcomm.2012.100512.110760
- [11] ESPRESSIF. ESP8266EX 技术规格书 [EB/OL]. (2023-06-14) [2023-10-12]. https://www.espressif.com.cn/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_cn.pdf
- [12] YU J, ZHANG S Q, SUN J Y, et al. High-performance transmission mechanism design of multi-stream carrier aggregation for 5G non-standalone network [EB/OL]. (2021-04-05) [2023-10-12]. <http://www.cic-chinacomunications.cn/EN/10.23919/JCC.fa.2021-0405.202308>
- [13] SUN Y Z, XIE Q G, PAN G J, et al. A novel GCN based indoor localization system with multiple access points [C]//Proceedings of 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). IEEE, 2021: 9-14. DOI: 10.1109/iwcmc51323.2021.9498616

作者简介



周均翼，上海大学通信与信息工程学院在读硕士研究生；主要研究方向为多模态融合感知定位等。



周琳，上海大学通信与信息工程学院在读本科生；主要研究方向为宽带移动通信技术。



张舜卿，上海大学通信与信息工程学院教授；主要研究方向包括节能 5G/5G+ 通信网络、混合计算平台以及联合射频和基带设计；入选“青年千人计划”，并于 2017 年获得 IEEE 通信学会通信进展论文奖；发表论文 60 余篇，获得授权专利 50 余项。