

doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2025.11.019

引用格式:陈鼎,陈智阳,徐嘉鸿,等.面向输电线路在线监控系统无线宽带自组网关键技术研究[J].无线电工程,2025,55(11):2304-2315.[CHEN Ding, CHEN Zhiyang, XU Jiahong, et. al. Research on Key Technologies of Wireless Broadband Ad Hoc Networks for Online Monitoring Systems of Transmission Lines[J]. Radio Engineering, 2025, 55(11): 2304-2315.]

## 面向输电线路在线监控系统无线宽带自组网关键技术研究

陈鼎<sup>1</sup>, 陈智阳<sup>2</sup>, 徐嘉鸿<sup>3</sup>, 陈勇<sup>1\*</sup>, 琚诚<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

2. 天津送变电工程有限公司, 天津 300161;

3. 国网天津市电力公司东丽供电分公司, 天津 300161)

**摘要:**针对高压输电线路在线监控与数字化运维对通信技术的需求,以及现有光纤、4G/5G等通信手段在复杂环境适应性、覆盖完整性、成本控制等方面的不足,分析了高压输电线路现有通信手段的特点和需求,提出了一种高可靠宽带超多跳无线自组网通信系统解决方案,攻克了多跳无线传输后的业务服务质量(Quality of Service, QoS)急剧下降的技术难题,构建了宽带超多跳安全无线自组网通信系统,实现了具有QoS保证的远距离宽带业务传输服务。通过OMNeT++仿真平台、9节点室外地面测试与国网天津220 kV滨幸一线实地投运,对所构建超多跳无线自组网通信系统进行仿真与测试。仿真与测试结果显示,系统可实现50跳宽带无线数据传输,端到端流量不低于2 Mb/s,相较于传统技术路线,该系统技术适应性更强、运维成本更低,提升了电网的数字化运维水平,可为新型电力系统通信网络建设提供可靠的解决方案。

**关键词:**电力物联网;无线自组网;动态资源调度;服务质量

中图分类号:TN802

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:1003-3106(2025)11-2304-12

## Research on Key Technologies of Wireless Broadband Ad Hoc Networks for Online Monitoring Systems of Transmission Lines

CHEN Ding<sup>1</sup>, CHEN Zhiyang<sup>2</sup>, XU Jiahong<sup>3</sup>, CHEN Yong<sup>1\*</sup>, JU Cheng<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China;

2. Tianjin Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Tianjin 300161, China;

3. Dongli Power Supply Branch of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300161, China)

**Abstract:** To address the communication technology requirements for online monitoring and digital operation & maintenance of high-voltage transmission lines, as well as the shortcomings of existing communication methods such as optical fiber, 4G/5G in terms of adaptability to complex environments, coverage integrity, and cost control, the characteristics and requirements of current communication methods for high-voltage transmission lines are analyzed. Relying on a National Key Research and Development Plan project, a solution for a highly reliable broadband ultra-multi-hop wireless ad hoc network communication system is studied and proposed, which overcomes the technical issue of a sharp decline in quality of service after multi-hop wireless transmission, and a secure broadband ultra-multi-hop wireless ad hoc network communication system is constructed, realizing long-distance broadband service transmission with Quality of Service(QoS) assurance. The constructed ultra-multi-hop wireless ad hoc network communication system is simulated and tested through the OMNeT++ simulation platform, 9-node outdoor field tests, and on-site operation in the 220 kV Binxing First Line of State Grid Tianjin. The simulation and test results show that the system can achieve 50-hop broadband wireless data transmission with an end-to-end traffic of no less than 2 Mb/s. Compared with traditional technical route, this system features stronger technical adaptability and lower operation and maintenance costs. It enhances the digital operation and maintenance level of power grids and provides a reliable solution for the construction of communication networks in new-type power systems.

**Keywords:** power internet of things; wireless ad hoc network; dynamic allocation of resources; QoS

收稿日期:2025-05-26

基本项目:国家重点研发计划(2020YFB0905900)

Foundation Item: National Key R&D Program of China (2020YFB0905900)

## 0 引言

电力物联网是面向电力行业的工业物联网技术,是实现能源互联网数字化与智能化的核心支撑。通过现代信息与通信技术,如传感、网络互联和平台技术,实现了电力系统设备、网架和人员的互联互通与人机交互,推动电网全面感知、广泛互联、信息融合及智能应用。在能源革命、数字化转型和能源互联网发展的过程中,电力物联网发挥了重要作用。具体而言,电网运行是一个涉及发电、输电、变电、配电和用电等多个环节的复杂系统,必须对各环节进行全面且实时的监控,才能有效提升电网的运行安全性和效率<sup>[1]</sup>。确保电力通信网的可靠性和覆盖的全面性是建设新型电力系统的有力支撑,是智能电力安全高效运行的保障。

目前,光纤宽带技术在智能电网输电网络中得到了广泛应用,主要优势包括强抗干扰能力和高稳定性,因此在智能电网设计中成为首选的电力通信技术。然而,光纤宽带技术存在一些不足,特别是在自然条件恶劣的地区,施工难度较大且抗毁性较差。此外,单纯以 4G/5G 网络的电力系统带外管理方案,存在通信网络覆盖盲点<sup>[2]</sup>,以及基础建设和运营成本偏高的问题。

无线自组网技术凭借去中心化、灵活部署、抗毁能力强、多跳传输等优势,有望显著降低网络部署的成本和复杂性<sup>[3]</sup>。随着 5G 网络的建设,未来无线自组网与 5G 网络融合的异构网络将成为电力物联网的一种趋势<sup>[4]</sup>。因此研究如何通过多跳网络提升无线自组网的覆盖范围,以及如何保证无线多跳传输业务的 QoS 具有非常重要的意义。然而,当前无线自组网技术在实际应用中仍面临一些挑战,尤其是多跳传输导致的误码率累积效应和业务质量的急剧下降,对通信网络的覆盖范围和远距离业务应用都带来了不利影响<sup>[5]</sup>。

## 1 无线自组网研究进展与难点

现有多跳无线自组网研究主要围绕覆盖范围有限、多跳传输 QoS 下降、抗干扰能力不足三大核心难点展开。这 3 个难点的存在导致现有无线自组网系统难以满足输电线路的要求,具体而言,西电东输等工程的输电线路跨度可达数千千米,需支持 50 跳以上级联传输;电力在线监控业务包含实时视频(带宽需求 2 Mb/s 以上)且需满足“零中断”要求;

高压设备产生的强电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)以及复杂的组网环境下的同频干扰对抗干扰技术提出了更高的要求。

近年来,国内陆续出现了许多无线自组网产品,在应急通信、野外科考等领域得到了广泛应用,这些自组网系统普遍存在覆盖范围小、最多跳数指标不超过 20 跳、随着数据传输跳数的增加 QoS 急剧下降的问题。这主要与多跳累积损耗和同步精度下降相关,严重制约了系统的覆盖范围。针对现有问题,文献[6]采用长期演进(Long Term Evolution, LTE)物理层技术,通过动态调制编码(Adaptive Modulation and Coding, AMC)适配信道变化,延长单跳传输距离。这也是目前国内主流厂家普遍采用的方案,支持无线传输业务 QoS 质量保证机制,通信协议安全可靠。文献[7]提出正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)多载波传输方案,通过子载波分集抵抗多径衰落,为超多跳传输奠定基础。

无线自组网系统相较于有线网络系统在信道竞争和冲突的问题上更加棘手<sup>[8-9]</sup>。尤其在多跳传输下,误码率累积、信道竞争加剧不仅导致整体时延的增大与吞吐量的衰落,而且在很大程度上增加了信道冲突的概率,导致系统的稳定性受到极大的挑战。现有研究从协议优化角度切入针对载波监听多点接入/碰撞避免协议(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)的隐藏终端冲突问题,经典的协议使用动态退避窗口调整策略,引入实时感知网络负载优化竞争机制,但是在输电线路场景下由于端到端的长距离,导致响应时间往往会超过正常协议的等待时间,预留机制在此场景下会造成吞吐量的快速下降。文献[10]提出一种超多跳自组网的信道探测与媒体控制协议,通过节点簇的结构显著降低了信道预留的时间,增加了系统的整体吞吐量。

复杂环境的干扰对于系统的稳定性也是重要的影响因素。由于电力系统通信网络业务存在分布不均匀的特点,网络一部分节点的失能会使得网络的脆弱性快速提高<sup>[11]</sup>。同时,干扰的大小也直接影响业务的数据速率与 QoS,由于输电线路的类线性结构,一个节点受到干扰影响而产生重传造成的代价远高于正常无线自组网。针对复杂环境干扰,无线自组网常使用跳频、扩频<sup>[12]</sup>等抗干扰手段,通过时域规避提升稳定性。本文引入认知无线电思想,基

于频谱感知动态选择干净信道,减少带内干扰影响。

针对自组网通信现有技术和设备存在的问题以及电力通信的需求,本文对组网接入技术、跨层资源动态调动机制和综合抗干扰技术三方面展开研究,通过融合仿真验证和机理分析,针对电力系统宽带远距离传输应用场景,完成了一套高可靠超多跳无线自组网通信系统的设计。仿真和实际部署数据验证了系统能够实现 50 跳无线宽带视频业务可靠传输,满足电力物联骨干网络和远距离输变电路在线监测系统专网通信需求。

## 2 宽带超多跳无线自组网关键技术

本文在现有自组网技术的基础上主要从组网接入技术、跨层资源动态调度机制和综合抗干扰技术三方面开展研究工作。

### 2.1 组网接入技术研究

介质访问控制 (Medium Access Control, MAC) 协议是多跳自组网中节点通信的基础。在链路层的研究中,高效的 MAC 协议可以减少冗余数据的传输、降低网络中总的数据传输量,从而降低节点能耗并延长网络的生存期。根据自组网的结构特点,研究针对该结构的 MAC 协议具有重要意义<sup>[13]</sup>。

目前自组网接入设计有基于载波侦听/冲突检测的 CSMA/CA 突发方式<sup>[14]</sup>、基于时分复用的时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 方式。其中 CSMA/CA 的核心机制是网络节点在数据传输前需先检测信道状态,仅当确认信道处于空闲状态时才进行数据发送。若检测到信道繁忙,则启动退避机制并持续监测信道状态。得益于实现的简便性,该技术被广泛应用于无线网格网络 (Wireless Mesh Network, MESH) 自组网领域。然而,隐藏终端和暴露终端问题的存在会导致数据传输过程中出现数据包碰撞<sup>[15]</sup>。此时,节点必须重新执行信道监听

流程,在信道恢复空闲状态时进行数据重传。对于大规模的测量和监测现场,一旦发生突发事件,传感网络会产生大量传输数据包<sup>[16-17]</sup>,这种机制可能引发信道资源持续竞争失败,造成数据无法正常传输,进而导致端到端时延急剧增大甚至趋于无穷大,最终对通信系统的 QoS 产生严重负面影响。TDMA 通信方式将无线通信帧划分为若干时隙,每个时隙之间留有保护时隙,通过控制协议协调网络内各个节点的时隙分配,避免信号冲突的发生<sup>[18]</sup>。但网络节点数量较多时,控制协议开销大;远距离传输时,需增加保护时隙,传输效率下降;另外,还需要额外的同步协议,使得各节点保持时隙同步,增加了系统复杂性。

本文设计的无线帧结构融合 CSMA/CA 和 TDMA 技术特点,将物理帧分为竞争接入子帧、数据子帧和资源申请子帧。

① 竞争接入子帧包含同步信标和  $M$  个竞争接入时隙,参数  $M$  由 2 跳范围内发起业务的平均节点数和网络的规模这 2 个参数决定。

② 数据子帧用于承载上层业务,一帧内共有  $N$  个数据子帧,参数  $N$  不大于整网中 2 跳范围内的最大节点数,每个节点至少分配一个数据子帧,用于广播节点自身状态 (包括资源表)。

③ 资源申请子帧对应了资源竞争结果,资源申请子帧以广播方式传输,可用于申请空闲的数据子帧资源以及抢占低优先级的数据子帧资源。

CSMA/CA 与 TDMA 融合帧结构定义如下。

定义基本时间单元为  $T_s = \frac{1}{(15\ 000 \times 2\ 048)}\text{s}$ ,采样频率  $f_s = 30.72\ \text{Mc/s}$ 。

帧结构如图 1 所示。一个帧 (Frame) 包含 10 个子帧 (Subframe), 一个子帧包含 4 个时隙 (Slot), 每个时隙长度为 0.5 ms, 即帧长为 20 ms。

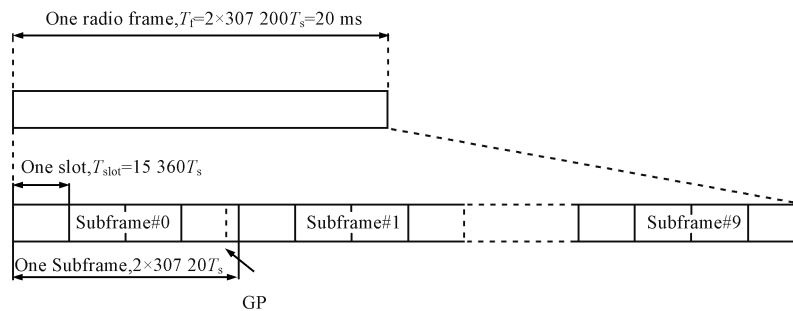


图 1 帧结构

Fig. 1 Frame structure

在竞争接入子帧中,同步信标与  $M$  个竞争时隙构成类似 CSMA/CA 冲突域,参数  $M$  基于 2 跳范围内业务发起节点的平均密度及网络规模动态调整,采用二进制指数退避算法协调高优先级业务的专用时隙占用与低优先级业务的随机竞争。数据子帧采用 TDMA 静态分配机制,确保全网  $N$  个节点各至少独占一个时隙用于状态广播(含资源表信息),剩余时隙则依据业务优先级动态复用。资源申请子帧以

全网广播形式传递动态调度结果,支持节点通过竞争机制申请空闲时隙或抢占低优先级时隙资源,其调度决策结合集中式拓扑收集与分布式干扰协调(如 2 跳邻域时隙隔离),显著提升信道空间复用率。

来自 MAC 层的数据流将被编码调制为 OFDM 信号从而在无线传输链路上提供传输服务<sup>[19]</sup>。下行信道处理过程如图 2 所示。

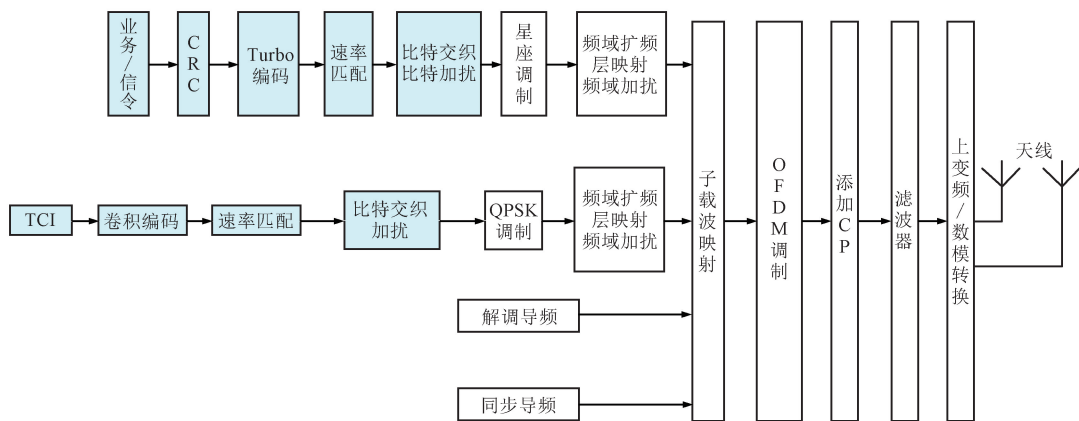


图 2 下行信道处理过程

Fig. 2 Processing process of downlink channel

信道编码方案由添加循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)、信道编码、速率匹配、交织几部分过程组成。

信道编码采用 Turbo 编码算法, Turbo 编码器为并行级联卷积码(Parallel Concatenated Convolutional Codes, PCCC)结构,由 2 个 8 状态成员编码器和 1 个 Turbo 码内交织器组成。

PCCC 中 8 状态成员编码器的传递函数为:

$$G(D) = \left[ 1, \frac{g_1(D)}{g_0(D)} \right], \quad (1)$$

$$g_0(D) = 1 + D_2 + D_3, \quad (2)$$

$$g_1(D) = 1 + D + D_3, \quad (3)$$

式中:  $D$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  为编码器的移位寄存器值。

Turbo 解码基于 PCCC 结构,可采用 BCJR 算法来解码。BCJR 算法通过前向和后向递推计算每个比特的最大后验概率,并用于 Turbo 解码中的软判决。

BJCR 算法如下:

设定输入为接收的符号序列  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]$ , 输出为  $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_N]$ 。

根据接收到的符号序列  $y_i$ , 计算每个比特的初始对数似然比(Log-Likelihood Ratio, LLR):

$$L(b_i) = \ln \left( \frac{P(b_i = 0 | y_i)}{P(b_i = 1 | y_i)} \right). \quad (4)$$

计算前向概率,得到在时间  $t$  内,每个状态  $s$  的概率  $\alpha_t(s)$ :

$$\alpha_t(s) = P(y_1, y_2, \dots, y_t, s_t | b_1, b_2, \dots, b_t). \quad (5)$$

计算后向概率,得到从时间  $t$  到终点的状态概率  $\beta_t(s)$ :

$$\beta_t(s) = P(y_{t+1}, y_{t+2}, \dots, y_N | s_t). \quad (6)$$

结合前向概率和后向概率,计算每个比特  $b_i$  的对数似然比:

$$L(b_i) = \ln \left( \frac{P(b_i = 0 | \mathbf{y})}{P(b_i = 1 | \mathbf{y})} \right). \quad (7)$$

在 Turbo 解码中,迭代解码过程涉及外部解码器和内部解码器。在多个迭代中,外部和内部解码器交替交换信息,不断更新 LLR 的估计。通过这种迭代过程,解码结果逐步收敛,从而提高解码性能。

通过对帧结构的定制化设计,提高了节点业务的空口传输效率,为降低多跳链路端到端的传输时延提供了物理层面的保证。

## 2.2 跨层资源动态资源调度机制

自组网系统是一种资源受限、拓扑动态变化的

移动无线多跳网络。为了在提高资源协商效率的同时兼顾优先级与公平调度的原则,本文采用节点资源预留与业务优先级抢占相结合的跨层动态资源调度策略。

### 2.2.1 资源预留协议

现有自组网的相关研究中,还没有统一针对无线资源分配的技术规范。国际标准化组织互联网工程任务组在有线固定网络方面提出了2种典型的资源分配方法:综合服务类型和区分服务类型。综合服务模型的核心思想是通过资源预留协议(Resource ReSerVation Protocol, RSVP)为应用提供端到端的QoS保证。该模型的参考实现包括数据包分类器、数据包调度器、接纳控制、策略控制以及相关的信令协议。RSVP运行于从源端到目的端的每个网络设备上,能够监视每个业务流,并为其分配基本资源。这种体系能够为每个业务流提供基本的QoS保障,并在网络中实现精细粒度的QoS区分。

资源预留过程示例如图3所示,源节点N1向目的节点N5发送资源预留请求,在这个过程中,源节点MAC层将控制信令组成控制元素,并由中间节点转发,中间节点同时进行资源预留。源节点发起QoS业务资源预留请求。中间节点可以根据自身情况进行降级,修改BW indicator或者Service Mode字段后,继续向下一跳发送资源预留请求信令,后续节点只采用降级后的带宽请求。如果中间节点发现链路不通,则该节点直接向源节点反馈应答QoS报文,通知源节点及经过节点释放预留资源。

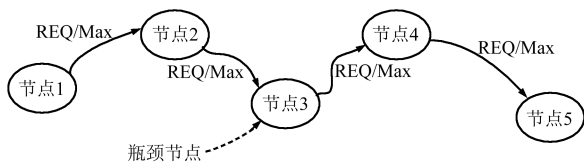


图3 资源预留请求过程场景

Fig. 3 Scenario of resource reservation request process

### 2.2.2 基于业务QoS的资源动态调度

本文的资源动态调度方案采用基于网络同步的分布式资源分配算法,在公共控制信道进行资源协商。为了提高资源利用率,根据业务优先级,采用跨层协同的方式进行资源动态调度。节点间资源协商基本流程如图4所示。

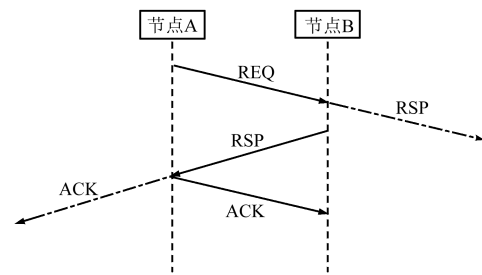


图4 节点间资源协商基本流程

Fig. 4 Basic flowchart for inter-node resource negotiation

① 节点A向节点B发送协商帧(REQ),该协商帧携带了本节点的资源列表,包含频点(信道)、可用时隙、干扰信息、资源数量以及业务QoS等。其中,频点表示可用的频率资源,可用时隙指的是空闲的时隙资源,干扰信息是本节点的本地干扰信息表,资源数量则表示本次协商中涉及的静态时隙分配和动态时隙调度的数量。

② 节点B在收到节点A的REQ请求后,会根据请求内容与本地资源进行对比,包括请求业务与现有业务的优先级对比,选择2节点一致可用的频点、时隙等资源信息。这些资源信息将被封装在RSP帧中,并发送回节点A。若在一段时间内未再收到同一个REQ请求,节点B会将协商后的资源列表更新到本地资源表中,并通知邻居节点。

③ 节点A在收到节点B的响应帧(Response, RSP)后,将协商好的资源信息更新到自己的资源列表中,并通知邻居节点。同时,节点A向节点B发送ACK消息,确认信道资源协商完成。至此,信道资源协商过程结束,节点之间的数据链路建立完成,双方可以开始数据业务的交互。

通过对跨层资源动态资源调度机制的研究,提高了节点入网成功率,缩短了资源调度时延和传输时延,在满足基本业务资源需求的同时,为高优先级业务提供了更好的QoS。

### 2.3 综合抗干扰技术

市场上现有的自组网产品抗干扰能力相对较弱,在实际测试和应用中,存在远距离信号覆盖较差、业务数据速率随着节点数增多而下降、频谱感知及点对点抗干扰能力不能适应机动保障及动中通需求等技术问题。

本文针对性地设计了频谱感知技术、带内干扰扣除、自适应选频等技术。采用跳频通信技术来规避时域干扰;采用带内干扰子载波扣除和自适应选频的方式来对抗频域干扰;采用定向天线防止节点间干扰的耦合。联合频域、时域、空域等多种手段,

使得抗干扰能力最大化。

基于频谱感知的抗干扰技术主要包括：

(1) 获取频谱属性,基于认知无线电频谱感知结果估计当前频谱的“干扰强度”和“干扰类型”2类频谱属性。其中,干扰类型包括单音干扰、多音干扰、部分频带干扰、扫频干扰等。

干扰强度  $I$  的估计如下：

$$I = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} P(f) df, \quad (8)$$

式中： $P(f)$  表示频率  $f$  处的功率谱密度,  $f_{\min}$  和  $f_{\max}$  分别表示频谱的最小和最大频率。

干扰类型识别,通过傅里叶变换分析频谱：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (9)$$

根据  $X(f)$  来判断干扰类型。

(2) 分析频谱能力。基于干扰强度与类型,结合频谱带宽、中心频点、设备传输模式(调制、编码、

抗干扰体制)等参数,分析候选频谱在该传输模式下的可达速率、误码率等性能指标,形成可用频谱库,并标记频谱质量等级。

信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)计算如下：

$$SNR = \frac{P_s}{P_n}, \quad (10)$$

式中： $P_s$  和  $P_n$  分别表示信号和噪声的功率。

(3) 实施抗干扰。根据干扰决策库,选择可用的干净频段或者采用适合的抗干扰手段与参数配置进行针对性的抗干扰。

根据频谱感知的结果,可以选择具有较低干扰强度的频段  $f_b$ ：

$$f_b = \operatorname{argmax}_f (SNR(f)), \quad (11)$$

式中： $SNR(f)$  表示每个频段  $f$  的信噪比。通过选择具有最高  $SNR(f)$  的频段,可以确保最优的信号质量。

基于频谱感知的综合抗干扰机制示意图如图5所示。

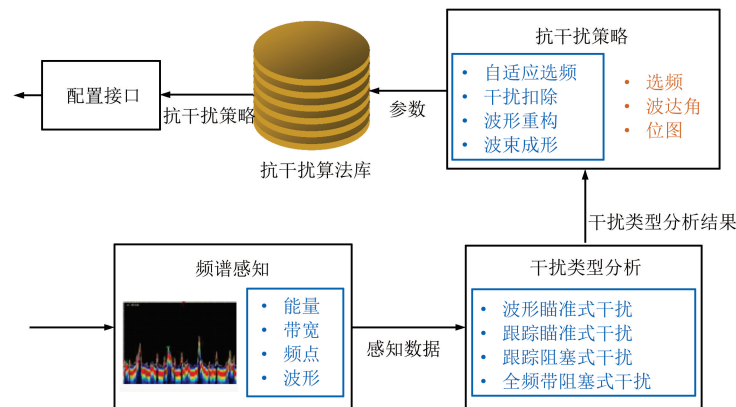


图5 基于频谱感知的综合抗干扰机制示意

Fig. 5 Integrated anti-jamming mechanism based on spectrum sensing

通过对综合抗干扰技术的研究,降低每一跳的传输误码率,提高了空口抗干扰能力,为端到端的可靠传输和业务 QoS 提供了保障。

### 3 宽带超多跳无线自组网通信系统设计

上述自组网关键技术研究从理论上解决了宽带多跳传输业务 QoS 急剧下降的技术问题,进而开展超多跳自组网设备的软、硬件设计研制,实现设计指标为 50 跳端到端流量不小于 2 Mb/s 的宽带超多跳自组网系统。

#### 3.1 硬件设计

组网接入技术的核心是定制化帧结构(2.1 节提出的 CSMA/CA 与 TDMA 融合帧结构)和 OFDM 调制传输,硬件通过以下设计提供支撑。

综合信道单元采用“零中频射频通路+FPGA SoC 基带处理”方案:零中频架构精简射频链路,降低信号传输损耗,适配 OFDM 多载波传输对射频线性度的要求;FPGA SoC 芯片具备高速并行处理能力,可实时完成 Turbo 编码/解码、OFDM 符号调制解调等操作,满足帧结构中竞争接入子帧的快速冲突检测(CSMA/CA 机制)和数据子帧的 TDMA 时隙同步需求(如 20 ms 帧长、0.5 ms 时隙的高精度时钟控制)。时钟与接口电路提供 30.72 Mc/s 采样频率的稳定时基,确保帧结构中同步信标、竞争时隙、数据时隙的严格时序对齐,避免因时钟漂移导致的多跳传输同步精度下降。射频部分采用“数字直采+功放滤波一体化”设计:数字直采方案减少模拟电路引入的噪声,提升带内干扰信号的数字化处理精

度,为“带内干扰子载波扣除”技术提供原始信号支撑;功放滤波单元集成高性能带通滤波器,可滤除5.8 GHz工作频段外的杂散干扰,配合跳频技术实现时域干扰规避。天线采用“宽带高增益低驻波比”方案:高增益特性提升远距离(300~500 m节点间距)信号接收灵敏度,降低多跳传输的路径损耗;低驻波比特性减少信号反射,避免因天线失配导致的干扰信号耦合,适配“定向抗干扰”中对空域干扰隔离的需求。主机采用堆叠设计方案,精简内部芯片和模块,配合数字直采、零中频频电路实现轻量化设计。

(1) 综合信道单元

图6为综合信道单元,其由自组网协议基带处理电路、射频(Radio Frequency, RF)集成收发电路、电源电路、时钟及接口转换电路组成,完成自组网波形基带和射频小信号处理。

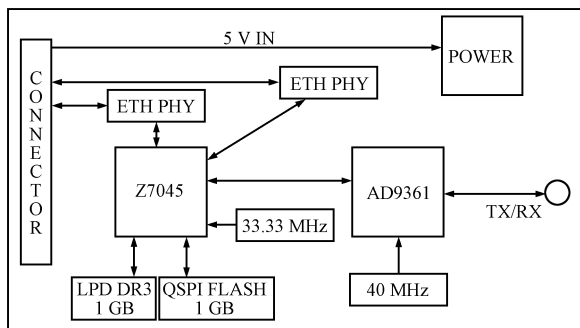


图6 综合信道单元框图

Fig. 6 Block diagram of integrated channel unit

(2) 接口扩展单元

接口扩展单元框图如图7所示,主要完成网口扩展、北斗信号转换、电源转换滤波和稳压处理。

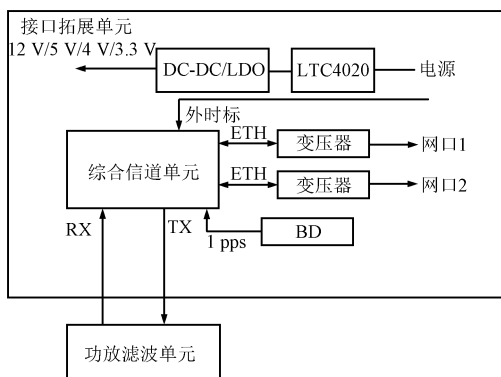


图7 接口扩展单元框图

Fig. 7 Block diagram of interface expansion unit

(3) 功放滤波单元

功放滤波单元主要完成射频信号滤波、功率放大等功能。

3.2 软件设计

软件设计通过协议栈分层优化,将关键技术的逻辑流程转化为可执行的通信规则,重点落地跨层调度与抗干扰策略。

宽带超多跳自组网波形软件总体设计物理层采用时分双工传输模式,通过OFDM正交多载波调制技术,实现宽带、窄带系统的灵活扩展,链路层基于跨层设计在资源分配、QoS策略、抗干扰、物理层时隙设计等方面进行优化设计。波形软件架构如图8所示。

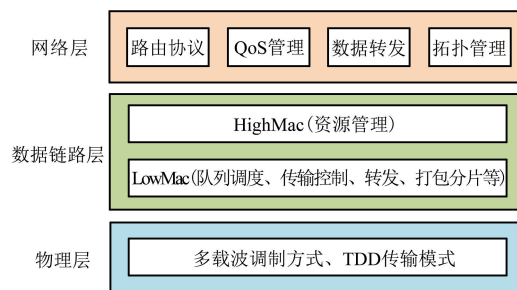


图8 宽带自组织波形架构

Fig. 8 Broadband self-organized waveform structure

3.2.1 物理层设计

① 工作频段:设备样机采用5.8 GHz频段建立无线自组网,工作频率5 725~5 850 MHz。

② 物理参数:设备的默认工作频率5 790~5 810 MHz,信道带宽20 MHz,子载波1 200个,子载波间隔15 kHz。

③ 物理信道:支持2种物理信道,包括物理共享信道(Physical Shared Channel, PSCH)、物理控制信道(Physical Control Channel, PCCH)。

④ 物理信号:支持3种物理信号,包括解调参考信号(Reference Signal, RS)、同步信号(Primary Synchronization Signal, PSS)、能量检测信号(Power Detector, PD)。

3.2.2 链路层设计

自组网数据链路层,通过静态时隙分配降低时延、支持快速接入,动态时隙调度提高数据利用率。

(1) 资源管理

系统采用静、动态混合时隙调度的TDMA协议,根据业务优先级与链路状态自适应调节网络负载变化,提高资源利用率,兼顾节点公平接入与业务

负载优先级。

资源分配主要过程如图 9 所示。

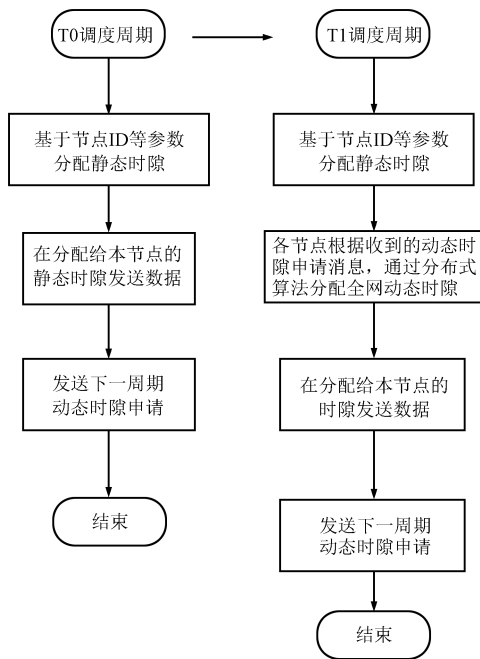


图 9 节点 X 资源资源分配示意

Fig. 9 Node X resource allocation

该资源分配机制直接应用了 2.2 节中跨层资源动态调度的核心逻辑;静态时隙分配确保每个节点至少有一个专属时隙用于状态广播(含资源表信息),对应资源预留协议中的基础资源保障。动态时隙调度则允许节点通过资源申请子帧竞争空闲时隙或抢占低优先级时隙,实现业务优先级抢占策略。

(2) 业务数据优先级调度

链路层是数据和信息的通路。根据跨层设计思想,链路层从上层路由和其他功能模块获得业务数据 SDU 和信令。

业务数据优先级调度示意如图 10 所示,链路层数据按照目的节点号(BSID)和 QoS 两个维度进行存储,数据发送时采用 2 种数据选取规则:按 QoS 优先级调度和按节点号轮询调度。

此调度策略与 2.2.2 节中基于业务 QoS 的资源动态调度相呼应:优先按 QoS 等级调度高优先级业务(如实时监控视频),确保其“零中断”需求。在同优先级业务中按 BSID 轮询调度,保证节点间的公平性。同时,调度过程中会参考节点本地的干扰信息表(来自资源协商帧中的干扰信息),避免在高干扰时段传输关键业务,间接融入了 2.3 节中综合抗干扰技术的干扰规避思路。

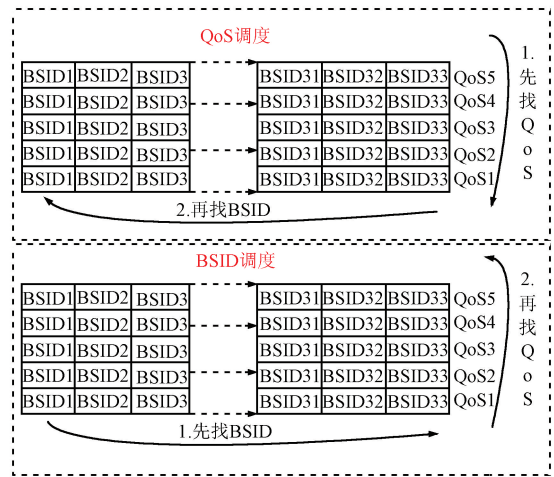


图 10 业务数据优先级调度示意

Fig. 10 Scheduling based on traffic data priority

3.2.3 网络层设计

网络层基于链路层提供的服务,构建移动网络,主要实现网络拓扑控制、路由协议、业务控制与适配、数据转发等功能。

① 网络层节点协议交互流程

主要实现邻居节点的上下线、分脱网、入网、脱网等过程。

② 路由协议

系统采用表驱动式路由协议,每个节点维护一张包含到达其他节点的路由信息的路由表。

③ 数据转发

主要负责处理业务数据,实现业务网口数据处理、数据分类和解析、路由查找、QoS 业务流匹配、流量控制和数据封装。转发模块流程如图 11 所示。

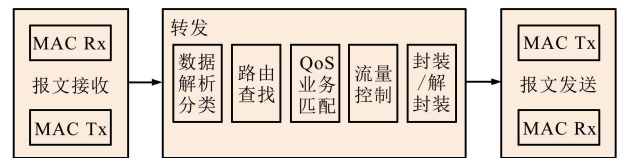


图 11 转发系统的处理流程

Fig. 11 Processing procedure of forwarding system

数据转发过程中,QoS 业务流匹配环节会严格依据业务的优先级标签,为高优先级业务分配更优的转发队列和传输资源,流量控制机制会根据多跳链路的实时吞吐量动态调整发送速率,避免网络拥塞导致的 QoS 下降,这是对多跳传输中 QoS 保障机制的具体实现。

### 4 宽带超多跳无线自组网通信系统验证与测试

仿真验证表明,系统满足不小于 2 Mb/s 的 50 跳无线数据传输指标要求,并具有可扩展性。

#### 4.1 仿真验证

本文采用基于 OMNeT++ 的超多跳自组网仿真平台开展仿真验证,实现了包括网络拓扑模型开发、无线路由协议仿真开发、无线 MAC 层多址接入仿真开发和业务模型仿真开发。通过仿真平台评估和验证宽带超多跳自组网的综合性能。

##### (1) 应用场景

本文的典型应用场景是输变电铁塔间的多跳无线通信,呈线型组网结构,在每个铁塔上安装有视频设备,可以在后方指挥中心随机调取任意一个视频设备的图像,对线路状态进行实时监控。

宽带超多跳组网项目的仿真程序根据实际工作场景进行设计,应用场景参数描述如表 1 所示,网络节点呈线型分布。

表 1 参数

Tab. 1 Parameters

参数	取值
设备高度/m	20~30
设备间距/m	300~500
发射功率/W	0.2
工作频段/GHz	5.8
工作带宽/MHz	20
网络拓扑	线型
业务流量要求/(Mb/s)	2

##### (2) 业务模型

无线网络仿真平台配置业务模型如表 2 所示。

表 2 仿真业务模型

Tab. 2 Traffic simulation model

业务类型	消息大小分布模型		消息发生概率模型	
	范围/B	概率分布	消息频率	概率分布
视频业务	512	均匀分布	1次/0.0015s	泊松分布

##### (3) 协议仿真

一个调度周期内单节点占用的时隙资源少,节点收发机会少,会导致资源利用率低,因此,需要对动态资源调度算法进行优化,通过资源复用

策略来增加一个调度周期内单节点占用的时隙资源数,进而增加单节点收发机会,提升资源利用率。

为避免干扰,同时考虑单节点损坏后系统鲁棒性,本方案选择以 5 个时隙资源为复用周期,当时隙 ID 模 5 等于节点 ID 模 5,则将此时隙分配给该节点,考虑资源复用的 TDMA 方案如图 12 所示。

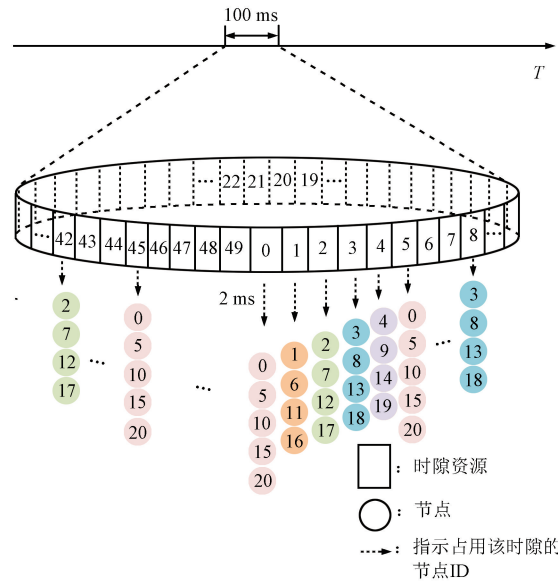


图 12 考虑资源复用的 TDMA 方案

Fig. 12 TDMA scheme with resource reuse considered

资源复用 TDMA 分配方式下节点占用时隙情况如图 13 所示。

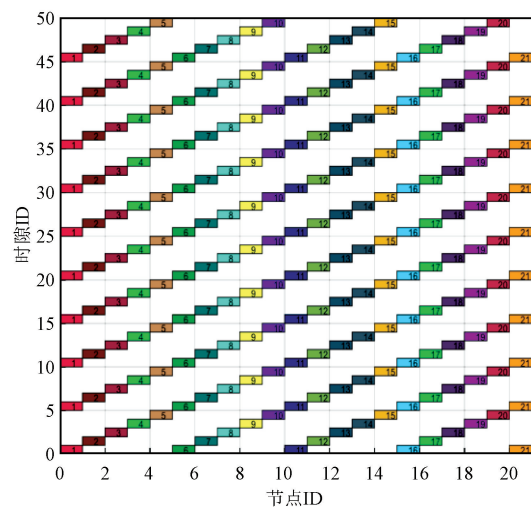


图 13 资源复用 TDMA 分配方式下节点占用时隙情况

Fig. 13 Time slot occupancy of node under TDMA allocation mode with resource reuse

由仿真结果可得,采用资源复用方案,在一个调度周期内,每个节点占用 10 个时隙资源,每个时隙资源被 10~11 个节点复用,显著提高了节点收发机会和资源利用率。值得注意的是,当网络节点个数大于一个调度周期内的时隙个数(50)时,纯静态 TDMA 算法无法在同一个调度周期内为每个节点分配到一个时隙,需要占用下一个调度周期继续分配,导致端到端时延增大,仿真表明采用资源复用方案的 TDMA 算法可以很好地解决这个问题。

(4) 50 跳线型网络性能仿真

搭建 51 节点线型拓扑模型,网络中每个节点间隔 500 m,每个节点通信半径均为 500 m。

无线电传播损耗模型选择不规则地形模型(Irregular Terrain Model, ITM),估计 VHE、UHF 和 SHE 频率在不规则地形上的无线电传播损耗,作为距离和信号在时间和空间上的变化。路径损耗模型为:

$$P_r(d) = P_t + G_t - PL(d) + G_r, \quad (12)$$

式中: $P_t$  和  $P_r$  分别表示发射功率和接收功率, $G_t$  和  $G_r$  分别表示发射天线增益和接收天线增益, $PL$  表示传输损耗。

根据链路预算结果及协议仿真结果,开展性能仿真。分别仿真视频业务报文的端对端时延和源节点队列等待时间。

仿真中源节点为 host[50],目的节点为 host[0],模拟视频回传,业务报文的端对端时延如图 14 和图 15 所示。

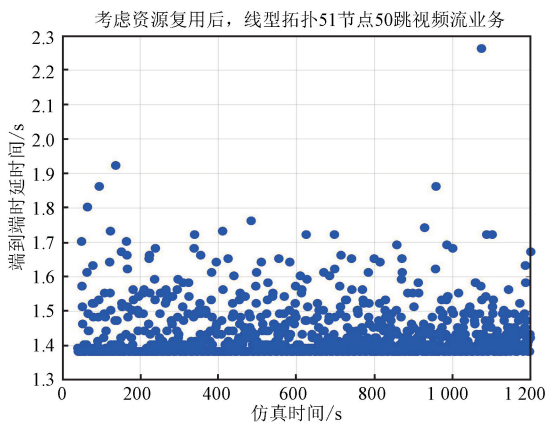


图 14 50 跳线型拓扑端到端时延  
Fig. 14 End-to-end delay of 50-hop linear topology

源节点 host[50] 队列等待时间如图 15 所示。

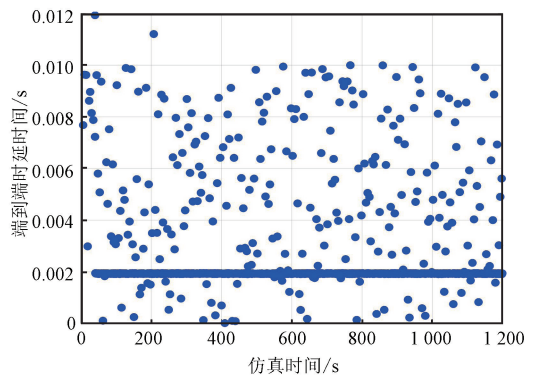


图 15 源节点 host[50] 队列等待时间  
Fig. 15 Source node host[50] queue wait time

吞吐量仿真结果如图 16 所示。

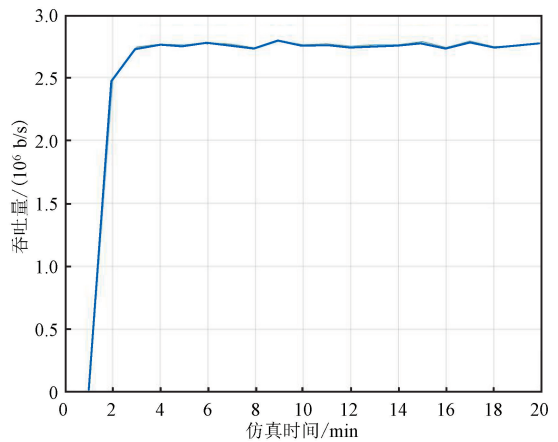


图 16 50 跳网络吞吐量  
Fig. 16 50-hop network throughput

由仿真结果可知,当前参数配置下,51 节点 50 跳网络吞吐量为 2.6 Mb/s,满足研制需求,系统可稳健运行。

仿真验证表明,宽带超多跳自组网通信系统传输性能满足设计指标要求并具有可扩展性。

4.2 地面测试

本文研究的超多跳自组网设备样机如图 17 所示。

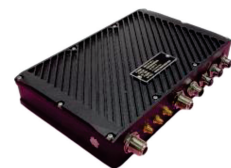


图 17 超多跳自组网设备样机  
Fig. 17 Prototype of the ultra-multi-hop ad hoc network

为验证样机已达到设计目标,本文采用 9 台自组网设备样机进行室外功能性能测试(节点间隔 500 m,天线架高 2 m,视距通信),开展样机的功能和性能验证。

室外节点组网测试现场如图 18 所示。



图 18 室外测试照片  
Fig. 18 Outdoor test photos

9 节点通过调节发射功率将物理连接形成一个 8 跳线型拓扑后进行测试。测试结果如表 3 所示。由于引入资源复用算法,在 5 跳以后每个节点获得的空口资源能够保持一个稳定的值而不是逐级递减,多跳后速率的下降主要受线路损耗和干扰因素的叠加影响,在不考虑因抗干扰引入的子载波扣除的情况下,采用自适应调制编码方式,50 跳资源复用后峰值预计将在 2.5 Mb/s 左右,与仿真结果一致。9 节点线性组网实测传输时延如表 4 所示。

表 3 9 节点线性组网实测流量

Tab. 3 Actual measured traffic of the 9-node linear network  
单位: Mb/s

1 跳	2 跳	3 跳	4 跳	5 跳	6 跳	7 跳	8 跳
19.7	11.2	7.9	5.8	4.5	4.5	4.1	4.2

表 4 9 节点线性组网实测传输时延

Tab. 4 Actual measured transmission delay of the 9-node linear network

单位: ms							
1 跳	2 跳	3 跳	4 跳	5 跳	6 跳	7 跳	8 跳
45	99	133	201	247	272	347	360

小规模测试结果进一步验证了采用宽带超多跳无线自组网关键技术研制的无线自组网系统传输性能指标达到了设计要求,时延稳定,能够满足输变电在线监控业务 QoS 要求。

### 4.3 系统投运

本系统示范工程在国网天津 220 kV 滨幸一线输电线路顺利投运,实现了国内首套 50 跳无线宽带自组网通信系统。系统方案框图如图 19 所示。远程监控采集照片如图 20 所示。

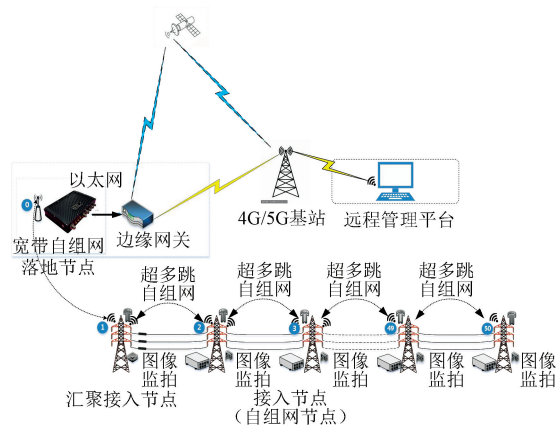


图 19 超多跳自组网在线监控系统框图  
Fig. 19 Online monitoring system of the ultra-multi-hop ad hoc network



图 20 远程监控采集照片

Fig. 20 A photo captured by remote monitoring

实测 50 跳最大速率为 3.3 Mb/s,时延为 1.38 s。这一结果略优于仿真数据,整体与仿真数据吻合。

## 5 结束语

本文针对无线宽带自组网关键技术进行研究,设计了无线多跳自组网系统综合解决方案并完成了设备研制和系统投运,解决了无线多跳传输后业务 QoS 急剧下降的难题。随着电力物联网的不断发展,采用无线自组网技术的电力专网以其部署灵活、抗毁性强、低运维成本等特点,具有良好的经济效益和设备效益。本系统可与 4G/5G 网络结合组成异构网络,在偏远地区可以接入低轨卫星互联网,形成覆盖范围更广、组网更灵活的通信网络,为我国新型电力系统通信网络建设提供了一种解决思路。

### 参考文献

[1] 田茂祿. 电力通信技术在智能电网中的运用研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41(5): 59-61.  
[2] 赵全东, 郝文娟. 基于 SDN 的电力通信网络覆盖优化算法研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(11): 227-232.

- [3] 陈奇,卓树峰. 无线自组网网络型火灾烟雾报警器: CN201120252954. 3[P]. [2025-05-23].
- [4] 史俊潇,吴慧. 基于异构组网的电力应急通信保障研究[J]. 电力信息与通信技术,2020,18(7):46-51.
- [5] 王薇,魏立明. 城市地下综合管廊管线的数据采集及故障诊断[J]. 北方建筑,2019,4(1):21-4.
- [6] 韩猛,艾庆华. 无信号区高性能低功耗通信装置研发[J]. 上海节能,2022(12):1583-1588.
- [7] PAZOUKI E, NAVAIE K. Resource Allocation in Decode-and-forward Relaying Systems Based on OFDM[C]//20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012). Tehran:IEEE,2012:1066-1071.
- [8] 周艳红,宁进,丁志恒,等. 无人机群自组网 MAC 协议综述[J]. 无线电工程,2024,54(8):1917-1927.
- [9] 邵鸿翔,孙有铭,冀保峰,等. 多无人机辅助 NOMA 网络的联合无线资源分配算法[J]. 无线电工程,2024,54(3):565-572.
- [10] 刘倩倩,周斌,琚诚,等. 一种超多跳自组网的信道探测与媒体控制方法:CN114389781B[P]. [2025-05-16].
- [11] 孙静月,崔力民,李珊君. 基于业务的电力通信网络脆弱性分析评价方法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(24):138-145.
- [12] 牡丹,王凯,赵彦雷. 基于频域幅值处理的扩频接收机抗干扰技术[J]. 无线电工程,2021,51(3):205-211.
- [13] DEMIRKOL I, ERSOY C, ALAGOZ F. MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. IEEE Communications Magazine,2006,44(4):115-121.
- [14] BIANCHI G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2000,18(3):535-547.
- [15] CALI F, CONTI M, GREGORIE. Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2000,8(6):785-799.
- [16] KIM S, PAKAZD S, CULLER D, et al. Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks [C]//2007 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Cambridge:IEEE,2007:254-263.
- [17] PAEK J, CHINTALAPUDI K, GOVINDAN R, et al. A Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring: Performance and Experience [C]//The Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors. Sydney:IEEE,2005:1-9.
- [18] 彭革新,谢胜利,陈彩云. 一种基于固定 TDMA 的无冲突动态时隙分配算法[J]. 信息安全与通信保密,2005,27(11):115-120.
- [19] ZHANG X, JIAO W, TAO M. End-to-End Resource Allocation in OFDM Based Linear Multi-Hop Networks[C]//IEEE INFOCOM 2008-The 27th Conference on Computer Communications. Phoenix:IEEE,2008:879-887.

#### 作者简介

陈鼎男,(2001—),硕士研究生。主要研究方向:阵列信号处理、通信信号处理。

陈智阳男,(1989—),工程师。主要研究方向:电力架空输电线路自动化运维检修技术。

徐嘉鸿女,(1990—),硕士,高级工程师。主要研究方向:电力信息技术及行业创新。

(\*通信作者)陈勇男,(1971—),硕士,高级工程师。主要研究方向:自组网无线通信协议和路由。

琚诚男,(1977—),硕士,正高级工程师。主要研究方向:5G/6G 等移动通信路由。