

## 面向控制类业务的电力无线专网演进分析

韦磊<sup>1</sup>, 缪巍巍<sup>1</sup>, 汪大洋<sup>1</sup>, 丁忠林<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 2. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 随着能源物联网和电力物联网的深入推进, 无线通信技术在电力行业中的应用越来越受到重视。结合未来新型电力系统控制类业务的通信需求, 分析了电力无线专网承载控制类业务的演进方向。分别探讨了基于自有频段和基于非授权频段的电力无线专网关键技术。前者以高质量业务通信、高效率频谱利用为演进目的, 需要引入低时延转发、干扰抑制、频谱共享机制等技术; 后者则聚焦于边缘控制网, 融合新兴物联网技术进行演进, 包括但不限于终端直通、窄带蜂窝物联网等技术。最后, 分析新兴技术适配电力无线专网控制类业务的关键开放性命题, 并探讨了潜在研究对策。

**关键词:** 电力无线专网; 电力自有频段; 电力非授权频段; 控制类业务; 物联网

**中图分类号:** TN919

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00458

## Evolution analysis of power wireless private networks for control services

WEI Lei<sup>1</sup>, MIU Weiwei<sup>1</sup>, WANG Dayang<sup>1</sup>, DING Zhonglin<sup>2</sup>

1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China

2. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211106, China

**Abstract:** With the in-depth advancement of energy IoT and power IoT, the application of wireless communication technology in the power industry has received more and more attention. Combined with the future new power system control service communication demand, the evolution direction of power wireless private network bearing control service was analyzed. The key technologies of power wireless private network based on its own frequency band and based on unauthorized frequency band were discussed respectively. High-quality service communication and high-efficiency spectrum utilization were taken by the former as the purpose of evolution, and technologies such as low-latency forwarding, interference suppression, and spectrum sharing mechanism needed to be introduced. The edge control network was focused on by the latter, and the emerging IoT technologies for the evolution were integrated, including but not limited to, the terminal pass-through, and narrowband cellular IoT technologies. Finally, the key open propositions of emerging technologies adapted to power wireless private network control services were analyzed, and potential research countermeasures were explored.

**Key words:** power wireless private network, power own frequency, power unlicensed frequency, control services, Internet of things

收稿日期: 2024-11-13; 修回日期: 2025-04-14

通信作者: 汪大洋, dy20001@hotmail.com

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (No. 5700-202318255A-1-1-ZN)

**Foundation Item:** State Grid Corporation of China Science and Technology Project (No. 5700-202318255A-1-1-ZN)

## 0 引言

电力系统是国家发展中极为重要的能源结构之一<sup>[1]</sup>。随着能源物联网战略的推进,电力系统的智能化、自动化程度不断提高,电网的发、输、变、配和用各个环节都需要全面升级以实现能源资源高效配置、各级电网协调发展、用电用户灵活接入<sup>[2]</sup>。因此,承载电力业务的通信网络,对实现电力系统的智能化、自动化和能源互联网战略目标起着关键作用<sup>[3]</sup>,其中,控制类业务对通信过程中的关键性指标要求更高,是能源物联网、电力物联网领域研究的重点。

控制类业务主要包括远程设备控制、自动化调度、保护与继电控制以及实时状态监测等。对于这些业务而言,通信网络的性能直接关系到电网的稳定性与安全性。对于电力系统中的关键控制类业务,如电网的自动化调度和保护控制,使用自有频段是确保系统安全和可靠的必要条件。自有频段不仅可以提供更高的通信质量保障,还可以避免频谱资源的干扰,确保及时准确地传输控制信号。例如,在电网的故障隔离或保护控制中,任何微小的通信时延或数据丢失都可能导致严重的电力事故,此时依赖于自有频段的专用通信链路能够确保这些关键操作无误地执行。非授权频段适合一些对时延和可靠性要求相对较低的应用。例如,虚拟电厂和分布式能源系统中的一些控制与监测任务,通常涉及多个分散的小型发电设备。对于这些设备的远程监控和数据采集,非授权频段可以提供一定的频谱资源,尤其是在设备间距较短、频谱使用较为宽松的情况下,可以有效避免授权频段的频谱资源紧张问题。

当前电网控制类业务主要采用的通信方式有光纤、电力线载波、电力无线公网和电力无线专网等<sup>[4]</sup>。光纤通信的敷设需要投入大量工程和费用,而且在某些情况下会受自然灾害的影响导致通信中断。电力线载波则易受到电力设备的干扰,信号传输不稳定。电力无线公网的信号覆盖范围有限,信号传输速度慢,而且会受网络拥堵和安全问题的影响。电力无线专网是一种面向电力行业的业务网络,旨在满足智能电网、分布式能源、电动汽车等领域的通信需求,它通常使用自有频段,以避免受到其他无线通信的干扰,并且网络架构和服务通常

是定制化的,以满足电力行业的特殊需求,电力无线专网也可以使用非授权频段,如与其他行业共用频段,以提高频谱使用率,增加网络覆盖率。蜂窝网是面向大众用户的公共通信网络,采用广泛的频段和标准化技术,适用于大范围的移动通信。二者的联系在于,电力无线专网可以复用现有蜂窝网基础设施,例如,可以使用5G切片技术用于承载电力无线专网。一般而言,电力无线专网需要满足以下特性。

(1) 安全性高:采用独立的通信网络,相较于公共网络,能够在一定程度上降低黑客攻击、网络病毒感染等外部威胁的风险,提供更高的安全性。

(2) 可靠性强:可以在电力系统中建立独立的通信网络,不受其他网络设备的干扰,从而保证通信的可靠性。

(3) 传输效率高:采用一些先进的通信技术和协议,如高速数据传输技术,支持多用户同时传输数据,从而提高数据传输的效率。

(4) 范围广:可以覆盖较大的范围,以满足电力系统内不同设备之间的通信需求。

(5) 成本低:相比于光纤等传统通信方式,建设成本较低,维护和运营成本也相对较低。

目前,电力无线专网主要采用第三代合作伙伴计划(3GPP, 3rd Generation Partnership Project)主流频谱,如230 MHz、1.8 GHz等频段,并基于离散窄带多频点聚合、动态频谱感知、软件无线电等关键技术进行开发。它可以承载配电自动化、精准负荷控制、站/所环境监测、电能质量监测、园区宽带集群等业务,并支持智能电网的各种应用,例如智能电表、需求响应、自动化控制等。随着5G技术的成熟,电力无线专网也开始融合5G技术,以提供更高带宽、更低时延和更多连接,进一步满足电力行业对通信的需求。例如,国内首个自建5G电力无线专网,使用5.8 GHz NR-U免授权频段技术,实现了变电站内强电磁环境兼容和多业务安全接入。

然而,随着新型电力场景和业务需求的不断变化和发展,电力无线专网也需要不断地进行演进,以更好地适应如分布式能源<sup>[5]</sup>、虚拟电厂<sup>[6]</sup>、多能互补<sup>[7]</sup>等网络化、协同化程度更高的场景。因此,结合未来新型电力系统控制类业务通信指标需求,研究未来电力无线专网的演进方向是有必要的。

## 1 电力无线专网演进需求分析

近年来,随着虚拟电厂等新场景的推进,新型电力系统中的协同控制需求进一步增强,控制类业务站点数量随之提升。在此基础上,单站点采集信息点位及频次的提升,使得低时延、大带宽、高可靠等需求加强。电力无线专网需求维度如图1所示,未来电力无线专网承载新型电力系统控制业务,其需求主要聚焦在如何确保电力无线专网的低时延、大带宽、高可靠、低功耗、强安全等方面,并保证经济性。例如,配网差动保护业务要求10 ms的低时延、10  $\mu$ s的时钟精准同步等。未来电力无线专网应实现配电自动化系统控制能力,对末端海量负荷进行精准、快速的控制,保障对智能电表及逆行用电信息的实时采集、处理和监控能力,以及实现对现场视频和图像信息的实时监控和在线管理能力<sup>[8]</sup>。

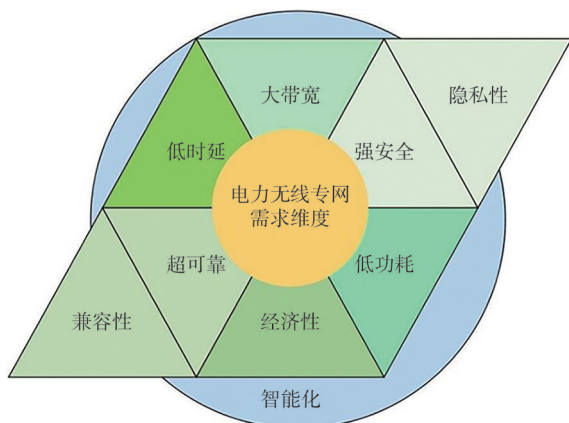


图1 电力无线专网需求维度

从能源物联网的发展战略来说,大规模分布式能源接入、能源交易是未来的演进趋势<sup>[9]</sup>。电力无线专网将承载海量终端感知、控制与信息交互功能<sup>[10]</sup>。为了满足百万级配电网的控制需求,电力无线专网必须具备高可靠性,并且能实现广域覆盖,以适应各种恶劣环境条件。因此,保证电力无线专网的高可靠性是确保电网安全稳定运行的重要因素之一,它将为能源物联网建设提供安全可靠、灵活自主可控、及时响应、定制化的通信支持,推动能源物联网和电力物联网的发展进步。

除了满足电力物联网中用户电力传输、信息交换的可靠性和计算需求,降低边缘网络和无线设备的能耗也是亟待解决的问题<sup>[11]</sup>。随着数据量激增和日常控制智能化,边缘网络的能耗问题日益凸显。

边缘设备通常需要长时间运行,因此,电力无线专网有降低边缘侧能耗的需求,以此来延长边缘设备使用寿命、降低供电难度、提高网络资源利用率等。

电力无线专网的安全需求不容忽视。在边缘网络和设备的计算和控制类业务下沉过程中,安全问题尤为突出。例如,若考虑使用非授权频段承载控制类业务,如何提高边缘网络和设备控制类业务下沉过程的强安全问题是亟须研究的课题<sup>[12]</sup>。因此,在未来建设过程中,应注重安全技术的研究改进和适配应用,加强对网络攻击、非法接入等安全威胁的预防和应对能力,确保电力物联网系统的安全可靠运行。

如图1所示,电力无线专网的需求演进趋势还包括智能化、兼容性、隐私性等方面。

(1) 智能化:随着物联网技术的不断发展,无线通信技术将更加智能化,电力无线专网应能够承载设备之间的智能互联、信息传输和数据处理,为电力行业提供更加智能化、高效化的解决方案。

(3) 兼容性:无线通信技术将向着更加兼容的方向发展,电力无线专网应能够支持多种通信协议和多种设备的互联互通,为电力行业提供更加便捷的接入、组网、跨域传输等解决方案。

(4) 隐私性:大规模异构终端接入导致网络开放性,电力无线专网需要更加注重用户隐私数据保护,使得电力系统在保障互联互通的同时,进一步提升用户体验。

## 2 基于电力自有频段的演进方向探讨

本节讨论基于电力自有频段的电力无线专网的演进方向。电力行业已分配一些特定的自有频段,不同国家和地区的电力自有频段分配情况会有所不同,以下是我国的电力自有频段<sup>[13]</sup>。

(1) 230 MHz 频段:该频段具有良好的绕射能力和覆盖性能,适合电力系统中各类终端设备的通信连接,能够满足电力系统对数据传输的可靠性和稳定性要求。例如,可用于用电信息采集、配变检测、故障指示等业务,为智能电网的建设提供了有力的通信支持。

(2) 1.4 GHz 频段:该频段通信带宽相对较宽,能够支持较高的数据传输速率,可用于对带宽要求较高的电力业务,如高清视频监控、智能巡检等业务场景,能够实现电力设备的实时监测和远程控制。

(3) 1.8 GHz 频段:与1.4 GHz 频段类似,该

频段能够提供较宽的带宽资源，随着控制类业务需求的不断增长，未来数年该频段将呈现出更好的经济性。

(4) 26 GHz 频段：该频段为毫米波频段，频率较高，可提供更高的传输速率和较低的通信时延，能够满足电力系统对实时性和数据量要求较高的业务需求。由于该频段的信号传播距离相对较短，覆盖范围相对较小，通常需要建设更多的基站来实现全面覆盖。

对于有限的电力自有频段，如何降低关键业务数据传输时延、保障通信可靠性、降低自有频段的频谱利用率成本，是电力无线专网演进过程中需要探索的。可以聚焦以下 3 个议题。

(1) 传输时延方面：考虑引入截短超低时延转发技术，该技术能够在复杂的通信环境中，以极高的效率开辟出一条极速数据传输通道，确保关键业务信息在最短的时间内进行传输。在如紧急故障处理、实时控制指令下达等对时间敏感的业务场景中，截短超低时延转发技术可实现毫秒级的响应速度。

(2) 可靠性方面：考虑引入先进的抗干扰技术，例如，在复杂多变的电磁环境中，利用跳频通信技术能够有效地识别并抵御各种外部干扰源，确保电力通信信号的稳定传输。

(3) 频谱利用率方面：频谱共享机制将发挥更大作用，通过动态调整和共享自有频段的频谱资源，避免资源的闲置和浪费。有效的频谱资源池管理技术能够提高频谱使用效率，降低建设和运营成本，同时还为电力多元业务的开展提供空间。

以下对相关技术适配电力无线专网分别进行分析。

## 2.1 超低时延转发技术

针对电力无线专网的自有频段，超低时延转发技术通过精细的频谱调度和资源管理，能够有效利用有限的频谱资源，提高系统的传输效率，并确保关键业务的实时性。超低时延转发<sup>[14-16]</sup>主要通过快速反馈等技术，来满足毫秒级控制业务的低时延需求。精心设计的截短时频资源块用于承载业务数据及其反馈信息。由于控制类业务需要在短时间内传输可信数据，采用截短时频资源块的方式可以提高数据传输速率和效率，满足控制业务的无线承载需求。快速反馈技术可以显著减少业务数据接收状态反馈时延，进一步满足毫秒级控制类业务的需求。

超低时延转发技术并不局限于电力自有频段，未来可以在电力自有频段和非授权频段融合过程中同时考虑对此项技术的优化。

可见，截短时频资源块是实现快速反馈低时延技术的关键技术之一，需要针对控制类业务的特点，研究面向电力无线专网的截短时频资源块设计方法，以提高数据传输的效率和实时性。该方法定义了可在同一个电力用户设备上配置的不同带宽，将其称为带宽部分，在面向电力无线专网的截短时频资源块设计中，带宽部分的资源分配方式一般采用资源指示量 (RIV, resource indication value)。

此外，未来大规模联动处置业务通常涉及多个智能终端之间的协同工作和数据交互。针对这种情形，需要分析和确定所需的上行和下行控制数据量以及连接规模，从而优化资源块的设计，这包括对控制信道资源分配、反馈方式和协议设计等方面的研究。

## 2.2 干扰抑制技术

为了提高系统的可靠性，电力无线专网可以采用跳频干扰抑制技术，并通过灵活的调度方式对异系统干扰进行规避<sup>[17-18]</sup>。在自有频段场景下，研究最佳跳频图的设计方案<sup>[19]</sup>，通过合理选择跳频序列和跳频间隔，实现对非控制业务的抑制和保护。研究中需要考虑电力无线专网的拓扑结构、信道特性和干扰环境等因素，以确定跳频图的设计方案。此外，还可以探索分析跳频技术对边缘网络非控制业务的影响，评估跳频技术对数据传输速率、时延、功耗等性能指标的影响，并找到合适的平衡点。

跳频处理后信号的抗干扰能力如图 2 所示，分析了在使用跳频抗干扰技术前后信号的可还原性，其中图 2(d)为经过抗干扰处理后得到的信号短时傅里叶变换结果。可以发现，经过跳频抗干扰处理后，信号短时傅里叶变换时频图与图 2(a)中跳频图案几乎一致，达到了抗干扰的目标。对于射频带宽受限的低成本窄带终端，未来还应支持分组跳频技术，使终端在使用载波聚合时，成员载波成组进行跳频，保证跳频后成员载波之间的间距不超过终端射频带宽<sup>[20]</sup>，使低成本终端也可采用跳频和载波聚合相结合的方式传输业务数据，满足传输可靠性的要求。

干扰抑制技术在电力无线专网中的应用仍面临一些独特的挑战。电力系统通常涉及大量的设备和传感器，这些设备可能产生电磁干扰或受到外部干

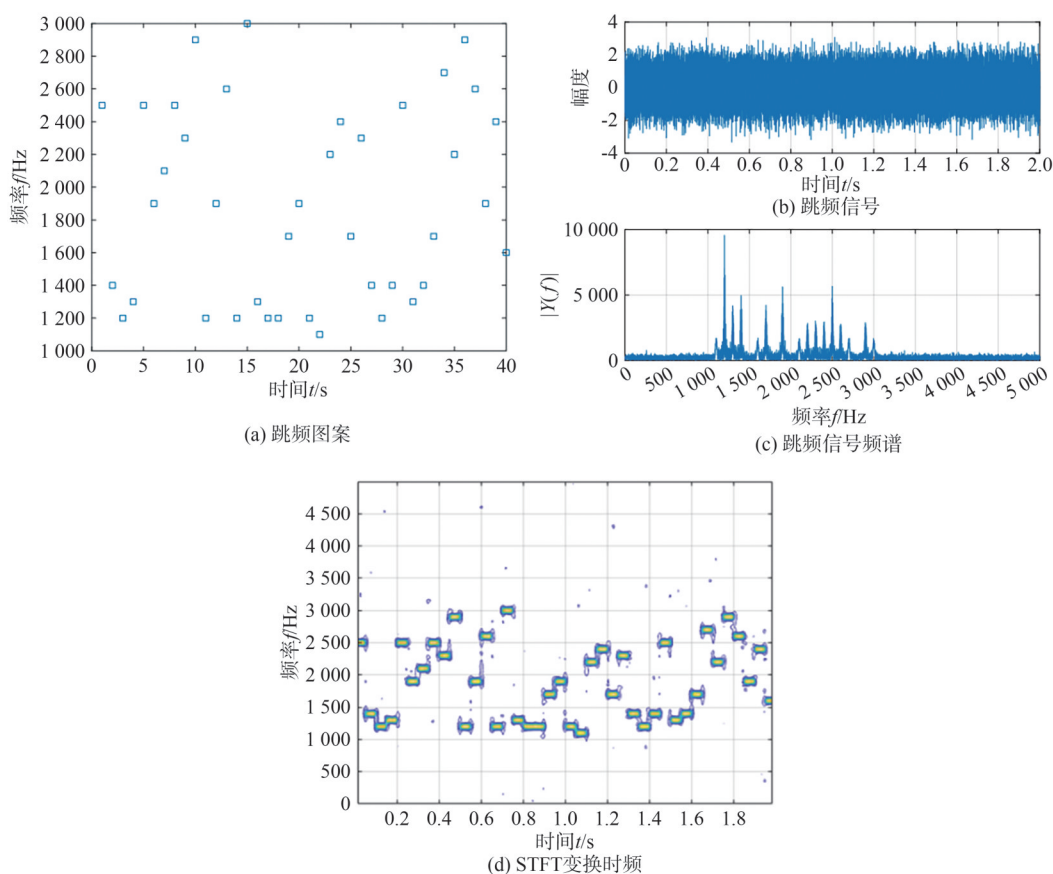


图2 跳频处理后信号的抗干扰能力

扰，尤其是在复杂的电力环境中，例如变电站和配电网。电力无线专网需要在高干扰的环境下确保高可靠性和低时延的通信。同时，电力无线专网的覆盖范围要求较高，需要在广域网环境中实现对干扰的精确管理和动态适应，这对干扰抑制技术提出了更高的要求。

### 2.3 频谱共享技术

频谱共享技术的应用在电力无线专网中也面临着挑战，主要体现在对频谱资源的高效管理和保护上。电力系统对通信质量的要求极高，任何频谱资源的冲突或过度共享都可能导致数据丢失或通信中断，进而影响电力系统的稳定运行。在传统蜂窝网络中，频谱共享通常是基于商业化目标进行优化的，但在电力无线专网中，必须保证网络的优先级和可靠性，避免频谱资源的竞争影响关键通信任务。未来可研究电力自有频段的频谱共享机制，用以协调不同的通信需求和资源之间的关系。通过智能监测、动态分配、公平调整等一系列技术手段，为电力通信提供更加高效、灵活和可靠的频谱资源利用策略。

首先，通过智能监测系统，实时感知电力自有频段的使用情况，包括信号强度、带宽占用率等参数。当检测到某些频段处于空闲状态时，共享机制迅速启动分配策略。对于临时出现的高优先级通信任务，可以将空闲频段动态地分配给它们，确保关键信息的及时传输。

同时，采用先进的频谱复用技术，允许不同类型的电力通信业务在互不干扰的前提下，共享同一频段的不同部分。例如，对于实时性要求较高的电力监控数据和相对不太紧急的设备管理信息，可以在频谱上进行合理划分，实现并行传输。

为了确保频谱共享的公平性和稳定性，还需要引入动态调整机制。例如，可以通过建立频谱资源池的动态映射，根据不同业务的重要性、紧急程度以及历史使用情况，不断优化频段分配方案。如果某个业务长期占用过多频段资源，共享机制会适时进行调整，以保证其他业务也能获得足够的频谱支持。频谱资源池与不同类型业务映射如图3所示。

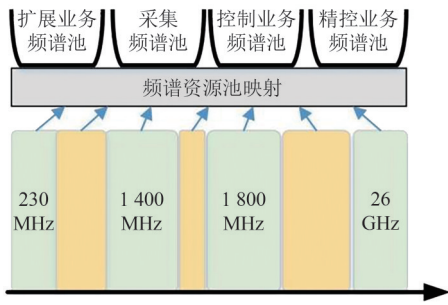


图3 频谱资源池与不同类型业务映射

### 3 非授权频段

基于非授权频段的电力无线专网演进，可着重面向下沉业务的边缘控制网，该部分的演进趋势可以总结为与新兴技术的融合，即聚焦于电力专网与边缘控制网新兴物联网技术的融合发展，探索智能感知、设备互联、协同控制、智能决策等智慧化电力应用场景。对于时延敏感性数据，实时性与数据传输效率的要求高于功耗管理，因此可以通过高效的通信协议和快速响应机制确保系统的稳定运行。然而，针对时延不敏感性数据，低功耗技术显得尤为重要，特别是在一些长时间运行的无源物联网设备中，通过无源通信技术的应用能够大大降低系统功耗并延长设备的使用寿命。无论是通过高效的功耗管理，还是通过新兴物联网技术的创新，未来电力无线专网的发展都将在低功耗和高安全的双重保障下，推动智能电网及其相关应用的全面升级。本文重点从低功耗、强安全的演进需求出发，探讨相关技术用于非授权频段电力无线专网的价值、挑战、未来方向等。

以下通过对轻量化（RedCap, reduced capability）、终端直通（D2D, device-to-device）和5G窄带物联网（NB-IoT, narrow band Internet of things）技术的分析，探讨电力无线专网边缘控制网实现低功耗、强安全性能的路径。

#### 3.1 RedCap 技术用于电力无线专网

基于通用物联网无线通信技术，如蓝牙、Zig-Bee、LoRa、Wi-Fi等，可以考虑将RedCap技术最大限度适配到基于非授权频段的电力无线专网中，降低系统功耗<sup>[21]</sup>。在5G Release17标准中，RedCap定义了终端的能力要求，通过降低最大带宽和接收分支数、将双工改为半双工、降低调制阶数等方式，以降低终端的复杂度、成本和尺寸，实现对RedCap终端的早期识别和支持。

RedCap在电力终端设备的成本评估见表1。与4G Cat.4相比，该方案使RedCap终端的带宽消耗、传输时延和数据丢失率分别降低30%、20%和10%左右，表明RedCap技术在降低带宽消耗和提高电力无线专网效率方面具有显著优势。

表1 RedCap在电力终端设备的成本评估

制式	最大支持带宽/MHz	RedCap 带宽配置/MHz	电力终端成本降低
FR1 FDD	100	20	32%
FR1 TDD	100	20	33%
FR2	400	100	16%

#### 3.2 D2D 技术用于电力无线专网

控制类业务需要实时的数据传输和反馈，D2D通信技术是点对点通信，省去了通过第三方中继转发的步骤，采用D2D通信技术可以提高数据传输的效率和实时性，进一步保证了控制类业务涉及重要数据传输和反馈的安全性。电力无线专网智能D2D通信网络架构如图4所示。

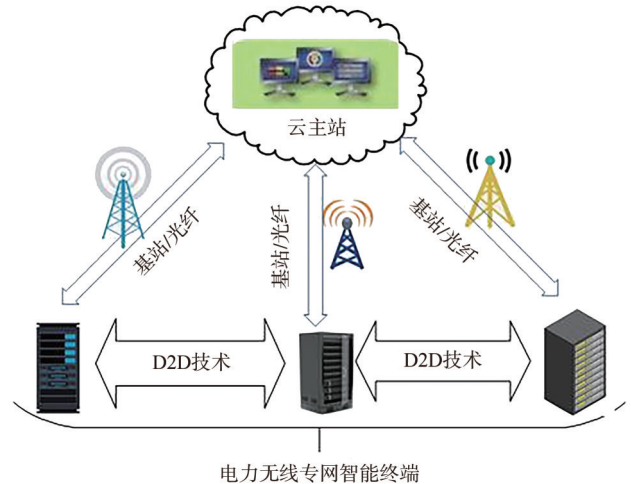


图4 电力无线专网智能D2D通信网络架构

进一步地，可以研究D2D通信在电力无线专网边缘场景下的新形式<sup>[22-23]</sup>。考虑未来虚拟电厂和多能互补系统的特点和需求，研究如何优化D2D通信的传输方式、资源分配和协议设计，以适应边缘场景下的较低时延和高可靠性要求。还需要考虑新场景下边缘侧所面临的新的入侵形式、非法接入等安全问题，进一步提升D2D技术的安全性。

#### 3.3 NB-IoT 技术用于电力无线专网

未来，充分利用有限的电力自有频段至关重要。可研究电力自有频段的频谱共享机制，用以协调不同的通信需求和资源之间的关系。通过智能监

测、动态分配、公平调整等一系列技术手段，能够为电力通信提供更加高效、灵活和可靠的频谱资源利用策略。

NB-IoT是由3GPP定义的窄带IoT技术<sup>[24-26]</sup>，它依托于蜂窝通信技术，能够承载海量的连接电力终端，其深度覆盖能力很强，功耗较低，便于移动，指向传感类、计量类和监控类电力IoT场景<sup>[27]</sup>。NB-IoT电力终端数据交互的基本应用架构模型如图5所示。

NB-IoT的一个主要特征是超强覆盖，其采用了重复发送的编码方式，NB-IoT重复传输的理论最大增益，该方式降低了低信噪比环境下的误码率，从而拓展了网络覆盖范围，这对于电力无线专网的边缘区域覆盖非常有益。另外，采用低子频带带宽，NB-IoT通过对物理信道格式、调制规范的重新定义，将子频带带宽降低至15 kHz，从而使其在相同的信号功率下谱频带密度更高，换言之，降低了对信号强度的要求，能够在网络覆盖不到的边缘区域正常通信，满足了电力无线专网低功耗需求，能够提供长期可靠的控制类业务无线承载<sup>[28]</sup>。NB-IoT还采用了多天线技术、自适应技术和多载波聚合传输等技术<sup>[29-32]</sup>，进一步满足控制类业务的无线承载需求。

对于时延敏感性数据，NB-IoT凭借其较低时延、广泛覆盖和较高的网络容量，能够满足实时性和可靠性的需求；而对于时延不敏感性数据，无源物联网技术通过极低功耗的特性，更适合那些需要长期稳定运行的设备和场景。在未来，随着电力无线专网的不断发展，NB-IoT和无源物联网将根据具体的应用需求和数据特性互补并共存。

## 4 未来开放性命题

### 4.1 低时延方面

#### 1) 无调度传输技术的应用

免调度接入能免去整个接入流程，是实现超低

时延接入的一个重要方向。此方面的开放命题包括：分析电力无线专网端到端各部分时延的相对强弱和优化空间；研究面向电力控制类业务的半静态周期性资源预留技术；研究面向电力控制类业务的动态周期性资源预测与预留技术。

#### 2) 控制信道效率提升技术

此方面的开放议题包括：研究面向电力无线专网的1 bit混合自动重传请求（HARQ, hybrid automatic repeat request）下行反馈技术，分析该迭代方案对于反馈可靠性的影响，评估能在多大程度上节省下行控制信道资源；研究基于多用户码分复用的HARQ上行反馈技术，以及其他复用技术（时分、波分、空分）用于HARQ上行反馈的可行性。

## 4.2 大带宽方面

#### 1) 更高阶调制方式

控制类业务骨干网可考虑提高下行传输的调制阶数，上行方面应研究在功率受限条件下调制阶数的设置。其他开放议题还包括：研究高阶调制对电力部署信道环境的适配问题，划分出若干个典型场景，给出不同典型场景下推荐的调制阶数；研究新型调制方式的可行性；研究智能反射面技术对于改善电力部署信道条件的作用，给出智能反射面增强条件下的推荐调制阶数。

#### 2) 大规模多天线技术

针对电力无线专网目前着重建设的1.8 GHz频段的特点，可以研究32T-XR技术，进一步提升系统容量、覆盖范围，降低时延。即在32个发射天线的基础上，根据具体应用场景确定合适的接收天线数量。通过对不同电力典型应用场景的分析和评估，定量计算不同典型场景下推荐的接收天线数量。

## 4.3 高可靠方面

在有限的电力频谱资源条件下，评估影响复制

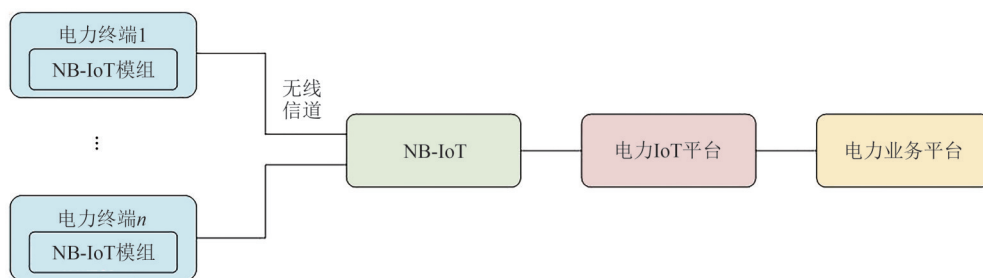


图5 NB-IoT电力终端数据交互的基本应用架构模型

功能的各种因素,在满足 uRLLC 性能要求的同时获得系统最大吞吐量是未来研究的工作之一。其他开放命题包括:确定在电力无线专网中开启数据复制传输的触发条件;研究适配电力无线专网的主链路控制实体与辅链路控制实体交互逻辑和重复报文丢弃机制。

#### 4.4 低功耗方面

大规模多天线技术的一个问题是天线口径能耗比非常低。与传统天线相比,龙勃透镜天线的口径能耗比明显优于现有主流方案,由于它是无源的,在运营维护上有很大优势。未来可进一步探索龙勃透镜天线适配电力无线专网自有频段,尤其是在 26 GHz 毫米波频段的特性。

#### 4.5 强安全方面

##### 1) 安全接入控制技术

当使用现有公共网络基础设施承载电力无线专网时,需要在现有设施基础上另外增加安全接入控制组件,例如,在虚拟电厂场景下,家用负荷和发电设备接入电厂时,虽然可以使用公共网络,但需要对安全接入区加以设计。此时,平台需要对资源池中的大量用户和实体进行身份认证和访问控制,同时,这些认证与控制策略应在保证安全性的同时尽可能做到轻量化。

##### 2) 人工噪声技术

可在多天线传输中加入人工噪声,使噪声传播方向指向窃听者,同时使有用信息指向合法用户,保证合法用户接收到的干扰低于信息解码门限,而让窃听者接收到的噪声功率远远大于信息功率。对于多天线的设计和人工加噪的处理,可通过优化技术解决。由于多天线链路可以建模为一个矩阵,考虑使用矩阵优化理论进行处理,求解出最优的天线设计和噪声向量处理。此方面的开放命题还包括:探索人工噪声技术与物联网无线传输协议的适配性,提升电力无线专网在边缘侧的安全性。

## 5 结束语

本文针对未来电力物联网大规模控制类业务和海量物联设备接入需求,探讨了电力无线专网的演进路径。针对自有频段,其演进目的主要是承载高质量、高效率的控制类业务,对无线通信的可靠性、稳定性和实时性要求越来越高。通过对电力自有频段的优化和升级,可以更好地满足电力系统在

智能电网建设、分布式能源接入等方面的需求。针对非授权频段的电力无线专网演进,本文指出了其演进方向是融合新兴 IoT 技术,包括但不限于 D2D 技术、RedCap 技术、NB-IoT 技术等。随着物联网技术的飞速发展,将其引入边缘控制网中,可以实现边缘设备的互联互通、数据高效采集和分析。授权频段与非授权频段的融合演进,将为电力无线专网建设提供更广阔的空间,与新兴 IoT 技术的融合能够进一步提升系统的智能化水平,实现远程监控、故障诊断、预测性维护等功能。未来,随着技术的不断进步,电力无线专网将继续在低时延、大带宽、高可靠、低功耗、强安全等维度进行演进,为能源物联网建设和能源结构优化做出更大贡献。

#### 参考文献:

- [1] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] XU D, ZHU H B. Energy efficient resource allocation for wireless powered short packet communication networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(8): 1880-1884.
- [3] LI Z L. Research on the evolution and service test of 230 MHz electric power wireless private network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [4] PANTAZIS N A, NIKOLIDAKIS S A, VERGADOS D D. Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(2): 551-591.
- [5] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. *电网技术*, 2009, 33(8): 1-7.  
CHEN S Y, SONG S F, LI L X, et al. Survey on smart grid technology[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(8): 1-7.
- [6] GOUDA N, ALY H H. Distributed energy sources management using shuffled frog-leaping algorithm for optimizing the environmental and economic indices of smart microgrid[C]//*Proceedings of the 2024 ASU International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems (ICETSIS)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1507-1511.
- [7] YE H, HUANG H H, HE Y, et al. Optimal scheduling method of virtual power plant based on model predictive control[C]//*Proceedings of the 2023 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering (EPEE)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1439-1443.
- [8] HU W, DONG Y, ZHANG L, et al. Research on complementarity of multi-energy power systems: a review[J]. *iEnergy*, 2023, 2(4): 275-283.
- [9] 朱从亮. 基于 5G 电力物联网的低压智能台区管理平台[D]. 浙江: 浙江大学, 2022.

- ZHU C L. Low-voltage intelligent station management platform based on 5G power IoT[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2022.
- [10] NGUYEN S, SALCIC Z, ZHANG X Y, et al. A low-cost two-tier fog computing testbed for streaming IoT-based applications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(8): 6928-6939.
- [11] LYU W K, WANG Q, YANG P F, et al. Microservice deployment in edge computing based on deep Q learning[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2022, 33(11): 2968-2978.
- [12] ALQERM I, PAN J L. DeepEdge: a new QoE-based resource allocation framework using deep reinforcement learning for future heterogeneous edge-IoT applications[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2021, 18(4): 3942-3954.
- [13] WANG Y Y, CHIH-LIN I, SUN J S, et al. End to end AI architecture for next generation network[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(1): 86-92.
- [14] 张小建, 费稼轩, 姜海涛, 等. 电力5G混合组网的安全风险分析[J]. *电信科学*, 2022, 38(1): 132-139.
- ZHANG X J, FEI J X, JIANG H T, et al. Security risk analysis of power 5G hybrid networking[J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(1): 132-139.
- [15] HOSSSEN M A, VU T X, NGUYEN V D, et al. Joint resource allocation and link adaptation for ultra-reliable and low-latency services[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 757-762.
- [16] LIANG W J, XU S N, LIANG Y T, et al. Researches advanced in reliable low latency transmission based on multi-links[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 67-70.
- [17] HABU S, SAKAGUCHI K, TRAN G K. MmWave multi-beam V2X with fountain code for joint ultra-broadband, reliable, and low latency communication[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.
- [18] 潘跟. 基于电磁频谱特征的智能干扰与抗干扰通信技术及系统实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- PAN G. Intelligent interference and anti-interference communication technology and system realisation based on electromagnetic spectrum characteristics[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [19] GAO Y L, XIAO Y, WU M M, et al. Game theory-based anti-jamming strategies for frequency hopping wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(8): 5314-5326.
- [20] 赵丙镇. 配用电业务用中频带电力线宽带通信技术及其安全性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2023.
- ZHAO B Z. Research on medium frequency band power line broadband communication technology and its security for power distribution service[D]. Wuhan: Wuhan University, 2023.
- [21] JIANG R, LIU J, WAN K, et al. Research on interference identification technology based on frequency hopping communication[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE 23rd International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 166-170.
- [22] 罗智敏, 刘建. 5G RedCap 移动通信技术解析[J]. *数字通信世界*, 2023(10): 10-13.
- LUO Z M, LIU J. Analysis of 5G RedCap mobile communication technology[J]. *Digital Communication World*, 2023(10): 10-13.
- [23] ZHENG K J, WANG Y J, ZHUANG D W, et al. D2D resource allocation optimization algorithm based on deep reinforcement learning[C]//*Proceedings of the 2024 4th International Conference on Electronic Materials and Information Engineering (EMIE)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 108-111.
- [24] HOU Y T, GONG H Q, WANG X Y, et al. Energy saving of base station system for power private wireless network based on D2D communication[C]//*Proceedings of the 2023 6th International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 597-602.
- [25] 3GPP. Physical channels and modulation: TS 38.211 v16.1.0[S]. 2022.
- [26] 3GPP. User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 1: Range 1 Standalone: TS 38.101-1 v16.5.0[S]. 2022.
- [27] 3GPP. User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 2: Range 2 Standalone: TS 38.101-2 v17.6.0[S]. 2022.
- [28] 陈如广. 基于NB-IoT的智慧农业生产监测系统[J]. *智慧农业导刊*, 2023, 3(8): 14-16, 23.
- CHEN R G. Intelligent agricultural production monitoring system based on NB-IoT[J]. *Journal of Smart Agriculture*, 2023, 3(8): 14-16, 23.
- [29] GUO X R, ZHANG Z J, GUO Q R, et al. Analysis of power business carried by 230 MHz narrowband wireless private network[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE 7th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1936-1940.
- [30] LU X C, YANG T, GENG Y L, et al. NB-IoT deployment scheme with power and carrier allocation in LTE&NR macro base stations[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.
- [31] MARKOVIĆ I R, VUKOBRATOVIĆ D. Five years of 3GPP NB-IoT technology: what are the main use cases? [C]//*Proceedings of the 2024 23rd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-5.
- [32] DU X J, LAI M. Research on NB-IoT device access security solutions[C]//*Proceedings of the 2023 3rd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer (EIECT)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 419-424.

[作者简介]



韦磊(1982-), 男, 博士, 国网江苏省电力有限公司信息通信分公司副总经理、正高级工程师, 主要研究方向为电力信息通信技术。



汪大洋(1987-), 男, 国网江苏省电力有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力无线专网、全光网络通信。



缪巍巍(1968-), 男, 国网江苏省电力有限公司正高级工程师, 主要研究方向为电力通信技术研究、电力物联网技术、信息化系统。



丁忠林(1983-), 男, 国网电力科学研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力无线通信装置。