



面向电力业务接入的跨频段融合与宽窄一体无线专网

邵炜平¹, 陆阳², 李建岐², 马平³, 张东磊²

(1. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310000;

2. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209;

3. 国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 对电力无线专网的通信需求进行了分析, 提出了面向电力业务接入的跨频段融合与宽窄一体无线专网核心理念, 可以同时满足电网高速宽带、低时延高可靠、广覆盖大连接等多业务接入需求。具体提出了基于统一核心网融合方式的跨频段无线网络架构、跨频段多信道传输与基于 QCI 优先级的业务数据流调度技术以及跨频段无线网络安全防护方案。研究表明, 跨频段融合无线专网兼具 LTE230、LTE1800 优势, 满足电网宽带、窄带业务接入需求, 相关方案的实施具有必要性和可行性, 为电力无线专网的深化应用提供了支撑。

关键词: 长期演进; 无线专网; 跨频段; 融合; 宽窄一体

中图分类号: TN 918.91

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018145

Cross-band fusion and wide-narrow integrated wireless private network oriented electric service access

SHAO Weiping¹, LU Yang², LI Jianqi², MA Ping³, ZHANG Donglei²

1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China

2. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China

3. State Grid Shaoxing Electric Power Supply Company, Shaoxing 312000, China

Abstract: The communication requirements of electric wireless private network were analyzed, and the core idea of cross-band fusion and wide-narrow integrated wireless private network oriented electric service access was proposed, meeting the needs of multiple service access simultaneously, such as high speed broadband services, low delay and high reliability services, as well as wide coverage and large connection services. Research shows that cross band fusion based wireless private network has the advantages of both LTE230 and LTE1800, and it can meet the needs of broadband and narrowband service access in the power grid. The implementation of the related schemes is necessary and feasible, which provides support for the further application of the electric wireless private network.

Key words: long term evolution, wireless private network, cross band, fusion, broadband and narrowband integrated

收稿日期: 2018-01-26; 修回日期: 2018-04-04

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目 (No.5211SX16000L)

Foundation Item: Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (No.5211SX16000L)



1 引言

终端通信接入网是电力系统骨干通信网的延伸,负责提供配电与用电业务终端同电力骨干通信网的连接^[1]。“十三五”期间,国家高度重视配用电智能化发展,要求终端通信接入网能够快速、灵活、高效地为各种业务提供支撑。智能配用电应用环境复杂、业务承载需求多样、传输可靠性要求高、终端分布区域广、测量监控点多、易受配电网扩容和城建影响。在部分场景下,光纤通信受施工难度大、建设周期长、难以全覆盖等因素制约。无线通信具有无须通信通道建设、网络部署快、系统扩展能力强等巨大的技术优势,同时,电网公司通过建设电力无线专网可以为业务传输提供可靠性、安全性保障,并可节省租用运营商无线公网的费用。电力无线专网已成为智能配用电终端通信接入网的重要组成部分。

目前,国内主流电力无线专网均采用长期演进(long term evolution, LTE)技术体制,基于230 MHz (LTE230)和1 800 MHz (LTE1800)两种频段开展电力无线通信系统建设^[2-4]。以国家电网公司为例,已先后在浙江、江苏、重庆、天津、福建等地开展了LTE230、LTE1800无线专网的试点应用,取得了初步成效。从应用效果来看^[5,6],LTE230基于223~235 MHz电力行业授权频段,具有覆盖远、组网成本低等优势,然而由于电力行业仅获准使用该频段中非连续的1 MHz带宽(共40个信道,单信道25 kHz),网络容量暂时不足,尚难完全满足无线专网的多业务承载需求。LTE1800完全基于公网LTE技术,能够提供高带宽业务保障,具备从核心网、基站到终端的完善的产业链,然而电网公司需要单独申请1 785~1 805 MHz频段,单基站覆盖半径小,网络建设成本较LTE230偏高。总体来看,两种技术体系各有优缺点,分别适合不同的电力业务场景。

随着智能电网建设的不断推进,电力无线专

网的通信需求也在快速发展。无线专网作为电网公司自有资产,如何实现一张网络同时承载电网宽带、窄带差异化业务,实现“一网多能”,成为亟待解决的问题。从目前应用情况来看,基于LTE230或LTE1800单频组网方式的无线专网尚难同时满足传输带宽、可靠性和网络覆盖范围要求,并且产品之间相互独立,接入网传输层面未能实现互联互通,使得无线网络支撑智能配用电业务的实用性受到限制。参考文献[7]对电力LTE异频组网系统应用进行了初步探讨,但在网络架构、业务承载与调度、网络安全防护等方面仍有待进一步明确。因此,提出充分利用LTE230和LTE1800的优势互补性,在继续发挥230 MHz无线频谱资源优势的同时,采用先进技术优化传输效率,深入挖掘1 800 MHz频段性能,建设跨频段融合与宽窄一体无线专网,实现基于统一核心网的融合以及跨频段多信道传输,满足电力高速宽带、低时延高可靠、广覆盖大连接业务安全接入需求,为电力无线专网的深化应用提供支撑。

2 电力无线专网通信需求

面向智能配用电终端通信接入网应用环境,并结合成本测算,无线专网适合于业务终端分布密度较为集中、安全性要求高的场景。按照供电区域进行划分^[8],在光纤建设困难的A+、A类供电区域以及B、C类供电区域开展无线专网建设具有较好的技术经济性。电力无线专网可以承载的业务类型主要分为电网控制类、信息采集类、移动应用类3种,具体描述如下。

- 部分业务通信传输容量大,实时性要求较高,如视频监控、智能营业厅业务等。单业务终端传输速率需求可达4 Mbit/s,如果考虑业务的并发性,对带宽需求还将提高。
- 部分业务通信传输容量不大,但对实时性、可靠性要求非常高,如配电自动化、精准

负荷控制、分布式电源监控、主动配电网差动保护等。以精准负荷控制业务为例,要求端到端通信时延在毫秒级,且要求控制的安全可靠^[9];配电自动化要求实现“遥控”的可靠性,以支撑电网供电可靠性不低于 99.999%的发展目标等。

- 部分业务对实时性、传输速率要求不高,但通信数量非常庞大、信息安全需求较高,如用电信息采集、电动汽车充电桩、电网状态监测等。单业务终端传输速率需求在 kbit/s 量级,然而无线基站单扇区覆盖范围内的节点数量可达上千个。
- 部分业务对移动性、互动化通信能力要求较高,如电力资产全寿命周期管理、移动作业、移动巡检、移动营销、企业管理相关业务等。无线网络因其组网灵活性,在该类型业务承载上将扮演重要角色。

展望未来,随着智能电网和能源互联网发展,业务通信需求将进一步提升,迫切要求电力通信网能够适应以特高压电网为骨干、各级电网协调发展的新型电网模式,实现各类负荷的精准控制;引入可视化、实时化、精益化的新型作业方式,实现各级电网重要廊道的监视、巡检;开展基于“互联网+”的新型业务模式,实现用户与电网的双向互动、用电精细化管理。如图 1 所示,未来电力业务的发展,物联网业务及宽带业务并存,具有广覆盖、大连接、低时延、高可靠、高安全等特征,对电力无线专网的差异化业务支撑能力提出了更新、更高的要求。

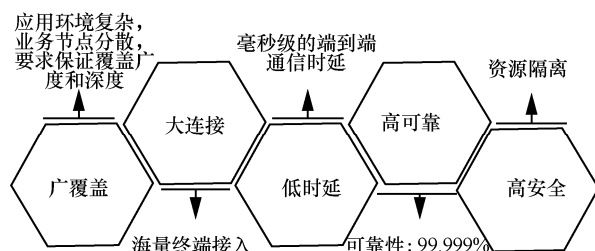


图 1 电力无线专网通信需求

3 跨频段融合与宽窄一体核心理念

LTE 是第三代合作伙伴计划 (the 3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 提出的“准 4G”技术,目标是实现 3GPP 无线接入技术向着更高数据速率、低时延和分组优化的无线接入技术的方向演进,包括分时长期演进 (time division long term evolution, TD-LTE) 与频分双工长期演进 (long term evolution frequency division duplex, LTE FDD) 两种方式^[10-12]。目前,在 LTE 技术原理基础上发展的用于电力无线专网的无线通信系统主要采用 TD-LTE 方式,以更好地满足电力行业上下行非对称业务传输需求,具体包括 LTE230 和 LTE1800。对现有 LTE230、LTE1800 系统的相关技术参数进行比较,见表 1。

通过对比可以看出, LTE230 覆盖性能优异,但电力授权频谱资源暂时不足,对部分热点地区的宽带业务承载能力有限; LTE1800 系统满足宽带接入需求,但网络在覆盖范围、穿墙性、与业务的适配性方面存在劣势。如何在 230 MHz 基础上,结合 1 800 MHz 频段组建跨频段融合电力无线网络,在广域覆盖的同时兼顾局域热点地区的高带宽需求以及通信盲区的延伸覆盖要求,成为亟待解决的问题。结合电力无线通信需求及未来发展趋势,提出了跨频段融合与宽窄一体无线专网核心理念,具体表现如下。

所谓“宽”,有两层含义:一是系统可用的工作频段宽;二是系统能够支撑宽带业务。其中,系统可用的工作频段既包括了电力授权的 230 MHz 窄带频段,也包括了 1 800 MHz 宽带频段,系统能够支撑对传输速率、时延要求高的业务。目前,终端通信接入网朝着智能化的方向发展,视频监控、精准负荷控制均是其中重要的业务类型。

所谓“窄”,也有两层含义:一是兼容原有窄带 LTE230 终端及业务;二是系统能够支撑低速、广深覆盖等电力物联业务。为了充分利用已



表 1 LTE230 与 LTE1800 相关技术参数的比较

序号	技术指标	LTE230	LTE1800	总结
1	载波频段	223~235 MHz	1 785~1 805 MHz	LTE230: 电力专用频点, 不用再次申请 LTE1800: 需要向政府部门申请频谱资源
2	工作带宽	1 MHz	5~20 MHz	LTE230: 带宽小, 频率离散分布 LTE1800: 带宽大, 频率连续分布
3	单基站峰值速率	1 MHz 带宽下, 上行峰值速率 1.5 Mbit/s; 下行峰值速率 0.711 Mbit/s	5 MHz 带宽下, 上行峰值速率 5 Mbit/s; 下行峰值速率 21 Mbit/s	LTE230: 支持窄带低速率业务 LTE1800: 支持宽带高速率业务
4	单基站覆盖半径	站高 45 m 情况下, 城市 3~5 km, 远郊 8~10 km	站高 45 m 情况下, 城市 2~4 km, 远郊 7~9 km	LTE230: 覆盖半径相对较大 LTE1800: 覆盖半径相对较小
5	时延	毫秒级	毫秒级	/
6	安全性	基于 LTE 标准加密机制, 双向身份认证, 采用三层安全加密体系, 实现了鉴权、空口加密、非接入层信令加密和端到端加密	基于 LTE 标准加密机制, 双向身份认证, 采用三层安全加密体系, 实现了鉴权、空口加密、非接入层信令加密和端到端加密	两者安全策略相同
7	产业链	普天	华为、中兴、鼎桥、普天等	LTE230: 产业链暂时支撑较少 LTE1800: 上下游产业链成熟
8	应用场景	支持窄带业务, 有选择的支持多媒体传输业务	支持语音、视频和数据多媒体集群业务	LTE230: 数据业务为主 LTE1800: 视频、语音、数据、多媒体集群业务

建设的电力无线专网, 不造成资源浪费, 跨频段融合与宽窄一体无线专网必须具有前向兼容能力, 兼容原有窄带 LTE230 终端及业务。此外, 目前国内外掀起了低功耗广域物联网技术研究、芯片研发、模组研制的热潮, 旨在实现万物互联。电力行业具有大量的数据采集、监测等具有“小数据”特征的业务, 要实现真正的电网智能化, 电力无线专网必须引入先进的物联网广深覆盖、低功耗相关技术, 支撑电力低速业务节点的泛在互联。

在此基础上, 形成跨 230 MHz 和 1 800 MHz 融合的、宽窄一体的电力无线专网, 网络同时包含宽带通信终端和窄带通信终端, 能够同时支持视频监控等高速宽带、精准负荷控制等低时延高可靠、采集监测等低速、广深覆盖等多样化业务终端接入, 并实现和电网公司不同业务平台的对接。系统基于跨频段融合基站设备、核心网设备, 采用跨频段多信道传输与业务数据流调度技术来同时承载电网差异化业务需求, 从而实现电力无

线专网的“一网多能”, 为推动电力无线专网的深化应用指明了方向。跨频段融合与宽窄一体无线专网示意图如图 2 所示。

4 跨频段融合与宽窄一体无线专网方案

4.1 网络架构

LTE230 和 LTE1800 跨频段融合实现多频组网, 可以采用紧融合和松融合两种方式。紧融合方式是指 LTE230 和 LTE1800 采用统一核心网、统一基站, 通过在基站中采用不同的板卡, 以使两者完全融合, 仅在空口上分为 LTE230 和 LTE1800 独立天线接入, 这种方式又称为统一核心网的融合方式。松融合方式是指 LTE230 和 LTE1800 采用独立核心网、独立基站, 仅在上层协议实现融合, 这种方式也可称为独立核心网的融合方式。

在统一核心网融合方式中, LTE230 和 LTE1800 采用统一网络层和媒体接入控制(media

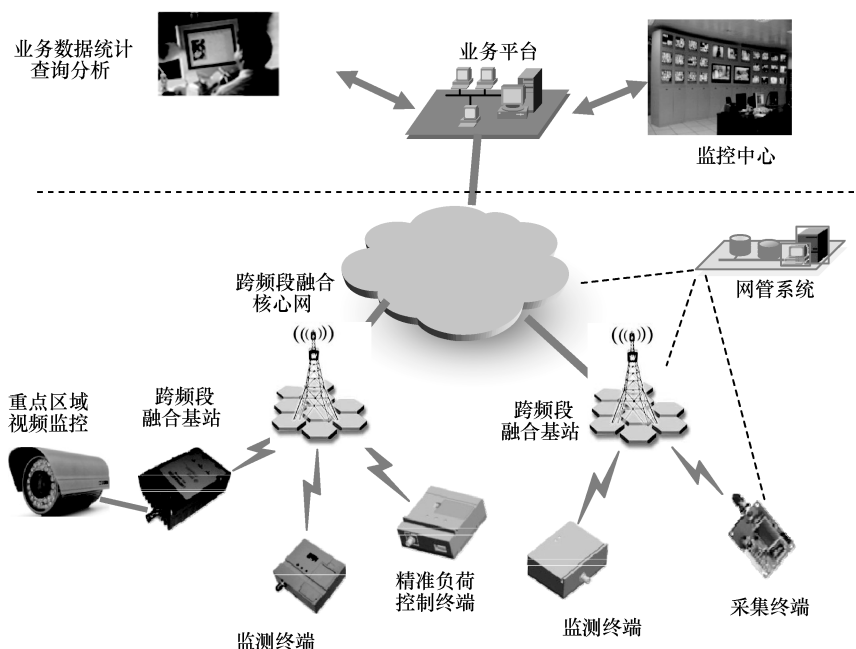


图 2 跨频段融合与宽窄一体无线专网示意图

access control, MAC) 层的融合, 不需要协议转换。在图 3 (a) 的网络架构中, 将 LTE230 和 LTE1800 无线通道在 MAC 层及以上统一, 但基站设计需要考虑 LTE230 和 LTE1800 无线频率、带宽等不同, 采用独立的参数以及调制方式实现物理层 (physical layer, PHY)。因此, 基站需采用 LTE230 和 LTE1800 不同板卡的设计技术来满足二者的差异化要求。该方式下, LTE230 终端和

LTE1800 终端之间通信非常简便, 不需要协议转换过程。

在独立核心网融合方式中, LTE230 和 LTE1800 采用独立核心网和基站。在图 3 (b) 的网络架构中, 将 LTE230 和 LTE1800 无线通道在网络层及以上的协议层实现融合。该方式下, LTE230 终端和 LTE1800 终端之间通信需要进行协议的转换。

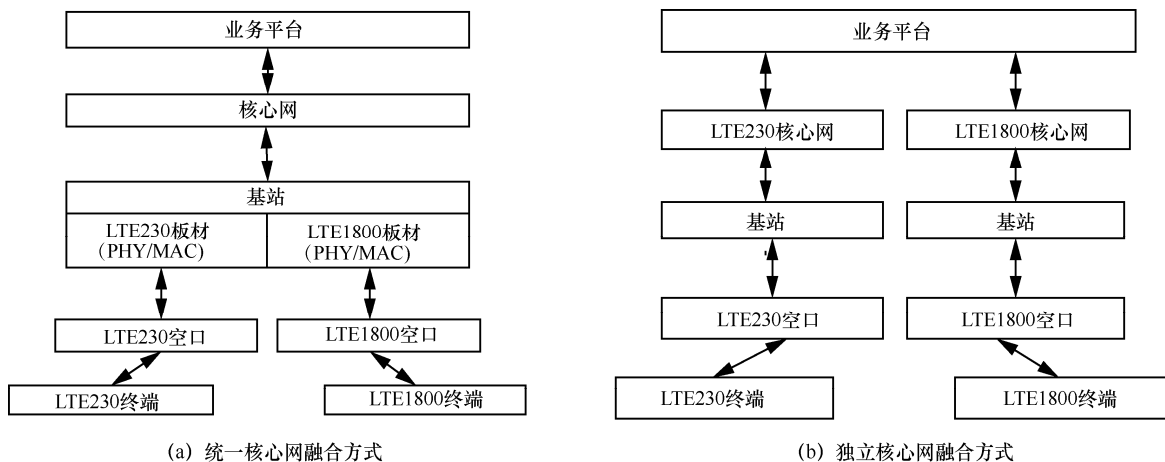


图 3 跨频段融合无线网络架构



从提高业务承载效率、降低无线专网建设成本的角度出发,采用统一核心网融合方式更具备优势。因此,在设备层面,须实现跨频段融合、宽窄一体核心网,可同时接入 LTE230 基站和 LTE230 终端、LTE1800 基站和 LTE1800 终端;实现跨频段融合无线网管系统,在同一套网管上完成对 LTE230、LTE1800 多个频段无线专网的设备管理;实现 LTE230、LTE1800 跨频段融合无线基站,通过不同板卡或软件升级方式,实现对 230 MHz 和 1 800 MHz 无线射频模块的接入。跨频段融合基站基于分布式架构,包括基带单元 (base band unit, BBU) 和射频单元 (radio remote unit, RRU),两者之间相互分离,传输的是基带信号,可以使用光纤来传输,传输距离一般在 5 km 以上。在上述统一核心网融合方式下, LTE230 以实现广域、深度覆盖为目标, LTE1800 可以在 LTE230 的覆盖范围内部署,也可以在 LTE230 的覆盖范围外部署,并重点通过 LTE1800 覆盖业务集中、数据量大的热点区域 (如变电站内视频监控),从而满足差异化业务接入需求。由于部分场景下,在变电站内建设基站导致一些距离变电站较远的业务节点接入存在困难,因此可以通过在变电站部署 BBU,利用光纤将信号延伸到无线网络覆盖盲区附近再部署 RRU,从而解决网络的弱覆盖问题。对于地下室、管井等通常无线网络的弱覆盖区域,可以采用无线终端的自组织多跳级联组网方式,实现末端业务节点的灵活接入。

4.2 业务承载与调度

跨频段融合与宽窄一体无线专网的初衷是实现一张网络的多业务承载,因此需要按照电网公司相关规定,采取多种措施将生产控制大区与管理信息大区业务传输通道进行物理隔离^[13]。提出跨频段融合与宽窄一体无线专网通过空口不同的频率、时隙资源,基站双跨频段基带板、传输板/端口,双跨频段核心网/板卡和物理隔离的同步数字序列 (synchronous digital hierarchy, SDH) /多

业务传送平台 (multi-service transport platform, MSTP) 通道为不同的业务提供专线通道,实现端到端的跨频段多信道传输,并通过接入点名称 (access point name, APN) /虚拟专用网 (virtual private network, VPN) 实现管理信息大区业务之间的逻辑隔离。

如图 4 所示,作为一个例子,采集业务终端、移动业务终端、配电业务终端、精控业务终端分别通过不同的无线终端以及 RRU 接入,其中, RRU₂₃₀ 代表 LTE230 的射频单元, RRU₁₈₀₀ 代表 LTE1800 的射频单元,并通过可以灵活配比的、不同的空口接入频率或时隙,实现生产控制大区与管理信息大区业务的物理隔离。基站采用双跨频段基带板、传输板/端口,并尽可能利用变电站等电网公司自有物业进行建设。核心网实现在市公司通信机房的地市部署,不同的核心网设备/板卡分别承载生产控制大区和管理信息大区业务。其中,针对服务质量 (quality of service, QoS) 要求高的精准负荷控制业务,为其分配专用的时域、频域资源,实现专线通道传输,其他业务则采用共享网络接入方式,由系统提供 QoS 优先级保障。提出 LTE230、LTE1800 射频单元均可接入电网控制类终端 (如配电自动化“三遥”、精准负荷控制),实现更快速、更安全的控制;用电信息采集、电网状态监测等信息采集类终端重点由 LTE230 来接入,满足未来信息采集量更多、频次更高的要求;移动作业、移动营销等移动应用类终端重点由 LTE1800 来接入,满足电网公司各专业、随时随地支撑现场业务 (特别是视频监控类高带宽业务) 的要求。

跨频段多信道传输离不开高效业务调度技术的支撑。提出基于业务 QoS 参数 (QoS class identifier, QCI) 优先级实现业务数据流调度,通过为不同业务配置 QCI 优先级,针对 QCI 优先级提供网络传输资源保障。首先,根据不同电力数据业务对时延、传输速率、可靠性的不同需求,

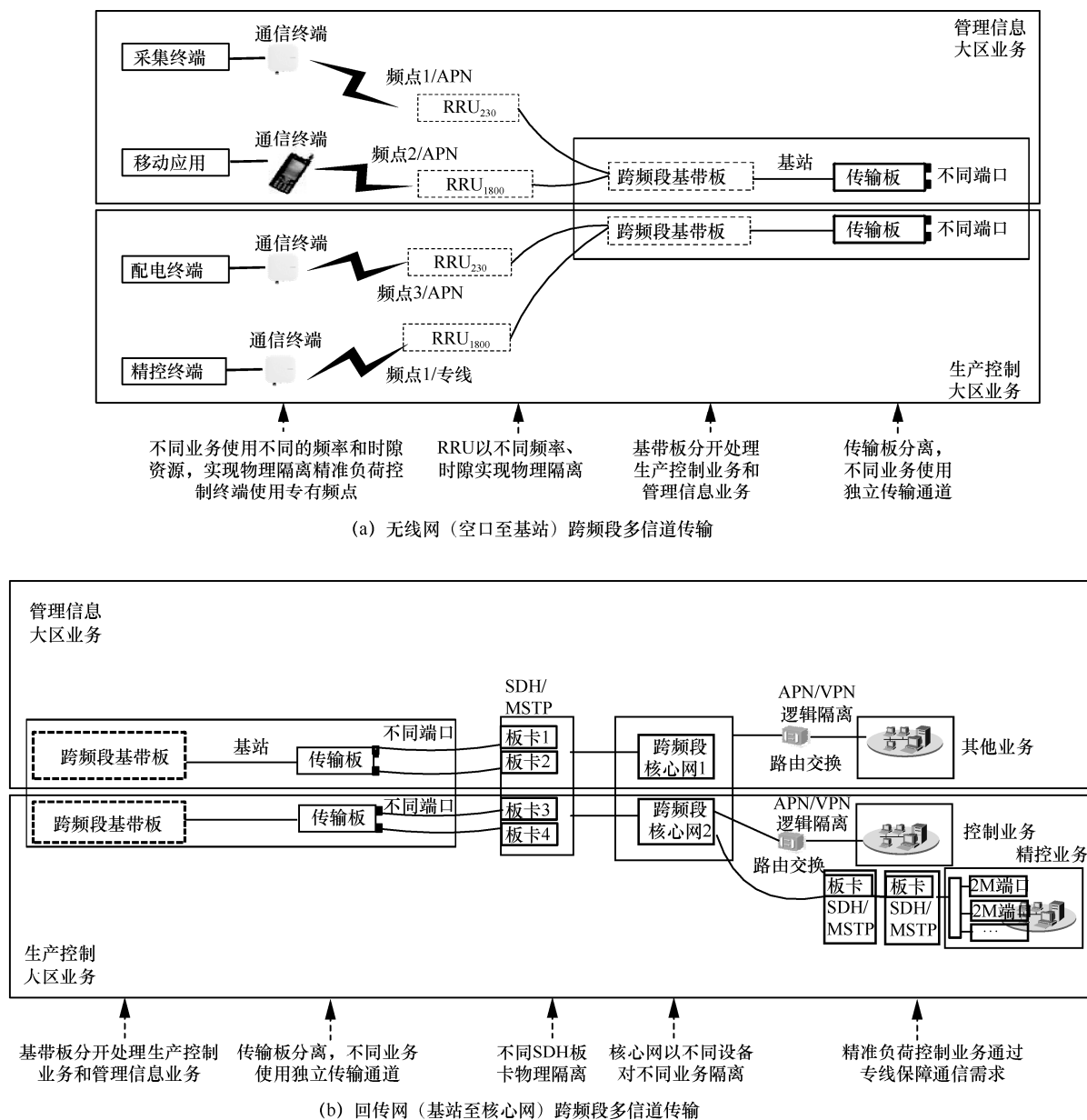


图4 跨频段多信道传输实现多业务承载

对网络所承载的电力数据业务进行优先级划分。基站调度时，根据业务 QCI 优先级来分配时隙、频率资源，优先保证控制类低时延高可靠业务接入。当检测到拥塞时，丢弃位于严重拥塞阈值后的低优先级业务，一方面优先保证了高优先级业务的 QoS 需求，另一方面缓解了拥塞节点的拥塞程度。在为被丢弃的低优先级业务重新建立传输通道时，综合考虑备选路径的时延与可用带宽，

不仅可以保证业务的 QoS，且优化了网络资源，均衡了整个无线网络的负载。

4.3 网络安全防护

面向智能配用电终端通信接入网的跨频段无线专网可同时承载生产控制大区、管理信息大区业务，导致网络跨接在物理隔离的两张信息内网之间，可能引起两张网络的物理隔离被打破，造成潜在的安全风险，因此，网络安全防护是不可



或缺的一环。其中，配电环节的业务处于生产控制大区，直接服务于生产调度，对安全防护等级要求较高。按照相关标准，为了保证控制的安全可靠性，具备遥控功能的业务应优先采用专网通信方式，保证一次设备的安全运行，如采用无线专网实现信息接入应符合相关安全防护规定，并有严格的安全防护策略。与此同时，随着分时电价、阶梯电价、远程费控等用电营销业务需求出现，用电环节对通信安全性的要求进一步提高，电价和用电信息的传送必须要有安全、稳定、可靠的通信通道。在采用电力通信专用通道传输此类信息时，网络信息安全要在原有用电信息采集系统的基础上达到更高的层次。综上所述，根据电力通信网安全防护总体要求，电力通信接入网安全接入方案应根据不同安全分区特点，对生产控制大区和管理信息大区分别设计防护措施，并重点在主站侧、终端侧和边界处予以部署^[13]，其总体框架如图5所示。

结合上述分析，并借鉴4G无线公网的安全防护机制以及LTE无线专网可采用的安全防护策略，提出面向跨频段融合与宽窄一体无线专网的安全防护方案，主要包括：

- 空口以不同的时隙、频率实现不同业务的物理隔离；
- 跨频段融合基站以不同的基带板卡实现不同业务的物理隔离；
- 跨频段融合基站与核心网间采用SDH/MSTP单独通道或网际安全协议（internet protocol security, IPSec）加密传输，优先考虑使用SDH/MSTP单独通道，不同业务的SDH板卡实现物理隔离；
- 跨频段融合核心网以不同设备/板卡对不同业务进行隔离；
- 通信终端与安全接入分区接入设备之间采用VPN进行逻辑业务通道隔离，加强安全加密措施；
- 业务终端MAC地址绑定，防止合法终端被窃取后，被不法人员用于攻击网络；
- 通信终端可采用国际移动用户识别码（international mobile subscriber identity, IMSI）绑定措施，采用eSIM形态，消除终端被盗用、复制的可能性；
- 对终端与基站之间数据进行加密传输、完

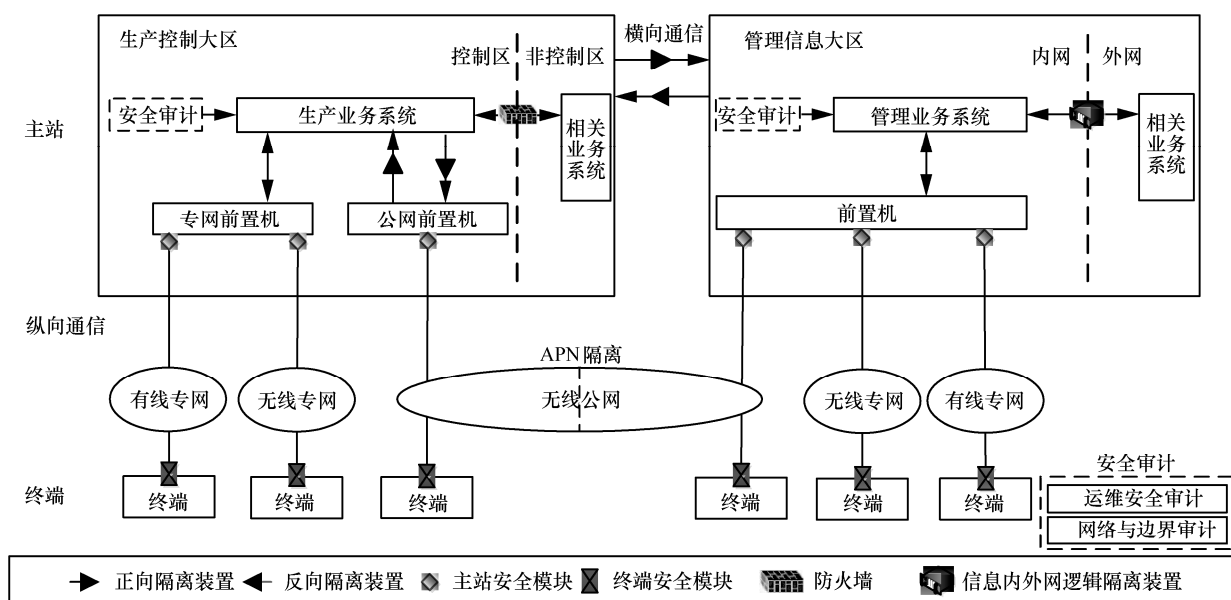


图5 电力通信接入网安全接入方案总体框架

整性保护,防止空口数据被截获,实现信息隐蔽;

- 对终端与核心网之间采用非接入层(non-access stratum, NAS)加密、双向认证鉴权、完整性保护,防止伪基站窃取、篡改终端数据,伪终端入侵网络以及高层控制信令被截获和篡改;
- 通过以上措施,对跨频段融合与宽窄一体无线专网承载电力业务接入,特别是配电自动化“三遥”、精准负荷控制等电网控制类业务提供有效的安全防护。

5 结束语

LTE 无线专网是智能配用电终端通信接入网的重要组成部分,然而现阶段基于 230 MHz、1 800 MHz 单频组网方式建设的 LTE 无线专网尚难同时满足传输带宽、可靠性和网络覆盖范围要求。结合电力无线专网通信需求分析,指出未来电网业务将呈现高速宽带、低时延高可靠、广覆盖大连接等差异化属性。以业务发展趋势为牵引,提出了面向电力业务接入的跨频段融合与宽窄一体无线专网核心理念,形成了跨 230 MHz 和 1 800 MHz、从核心网层面深度融合的无线网络架构。提出了 230 MHz 和 1 800 MHz 具备业务覆盖侧重、生产控制大区业务与管理信息大区业务传输通道端到端物理隔离的跨频段多信道传输方案,基于 QCI 优先级的业务数据流调度技术以及符合电力通信接入网安全接入总体要求的跨频段无线网络安全防护方案,为电力无线专网的深化应用与不断演进提供了支撑。

参考文献:

- [1] 国家电网公司信息通信部. 终端通信接入网统筹建设总体设计[R]. 2017.
Department of Information and Communication, State Grid Corporation of China. Overall design of the construction of terminal communication access network[R]. 2017.
- [2] 欧清海, 谢杰洪, 曾令康, 等. TD-LTE 技术在配用电通信中的应用[J]. 现代电子技术, 2012, 35(23): 27-31.
- [3] 周建勇, 田志峰, 李艳, 等. 广覆盖 LTE230 系统在电力配用电应用中的研究与实践[J]. 电信科学, 2014, 30(3): 168-172.
ZHOU J Y, TIAN Z F, LI Y, et al. Research and practice of LTE 230 system with wide coverage characteristics in the power distribution and utilization application[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(3): 168-172.
- [4] 徐杰, 侯功华, 何尚骏, 等. 基于 TD-LTE 1 800 MHz 的电力无线专网覆盖性能优化研究[J]. 信息通信, 2018, 16(1): 127-128.
XU J, HOU G H, HE S J, et al. Research on coverage performance optimization of power wireless private network based on TD-LTE 1800 MHz[J]. Information & Communications, 2018, 16(1): 127-128.
- [5] 蔡根, 张健明, 杨大成. TD-LTE 电力专网 230 MHz 与 1.8 GHz 的研究[J]. 软件, 2015, 36(12): 83-88.
CAI G, ZHANG J M, YANG D C. Research on TD-LTE 230 MHz and 1.8 GHz telecommunications network for electric power[J]. Computer Engineering & Software, 2015, 36(12): 83-88.
- [6] 闫淑辉, 冯世英. 现有无线宽带通信技术在电力行业应用对比分析[J]. 计算机科学与探索, 2016, 10(S1): 670-675.
YAN S H, FENG S Y. Comparison and analysis of existing wireless broadband communication technology in power industry[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2016, 10(S1): 670-675.
- [7] 姚继明, 黄凤, 田文锋. 电力 LTE 异频组网系统应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(3): 181-184.
YAO J M, HUANG F, TIAN W F. Research on application of anti-frequency networking of LTE for power system[J]. Computer Technology and Development, 2017, 27(3): 181-184.
- [8] 国家电网公司. 配电网技术导则: Q/GDW 10666[S]. 2016.
State Grid Corporation of China. Technical guidelines for distribution network: Q/GDW 10666[S]. 2016.
- [9] 国家电网公司信息通信部. 关于印发精准负荷控制通信系统建设指导意见(试行)的通知[S]. 2017.
Department of Information and Communication, State Grid Corporation of China. Notifications for the guidance of the construction of the precision load control communication system (trial)[S]. 2017.
- [10] 李文宇, 宋丽娜, 何秀森. LTE 产业发展分析和展望[J]. 电信科学, 2014, 30(3): 6-11.
LI W Y, SONG L N, HE X M. Development analysis and perspective on LTE current status[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(3): 6-11.
- [11] 王伦锁. TD-LTE 与 LTE FDD 融合组网策略[J]. 电信科学, 2016, 32(1): 188-192.
WANG L S. TD-LTE and LTE FDD fusion networking strategy[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(1): 188-192.
- [12] 庞晓丹, 李薇薇, 孙茜, 等. LTE 无线网络虚拟化中切片调度策略[J]. 电信科学, 2017, 33(2): 66-72.
PANG X D, LI W W, SUN Q, et al. Slice scheduling strategy in LTE wireless network virtualization[J]. Telecommunications



Science, 2017, 33(2): 66-72.

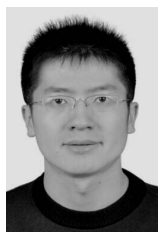
[13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 电力监控系统安全防护规定[S]. 2014.

People's Republic of China National Development and Reform Commission. Safety regulation of power monitoring and control system[S]. 2014.

[作者简介]



邵炜平（1976-），男，国网浙江省电力有限公司高级工程师、通信处副处长，主要从事基于电网业务需求的通信应用技术研究工作。



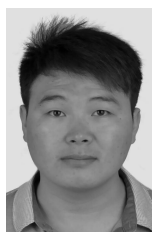
陆阳（1984-），男，博士，全球能源互联网研究院有限公司高级工程师，主要从事无线通信、电力线载波通信及其在智能电网中的应用研究工作。



李建岐（1969-），男，全球能源互联网研究院有限公司高级工程师（教授级）、信息通信研究所副总工程师，主要从事电力通信技术研究及开发工作。



马平（1962-），男，国网绍兴供电公司高级工程师，主要从事电力系统通信网络规划和运行管理工作。



张东磊（1986-），男，全球能源互联网研究院有限公司工程师，主要从事电力通信技术应用研究工作。