

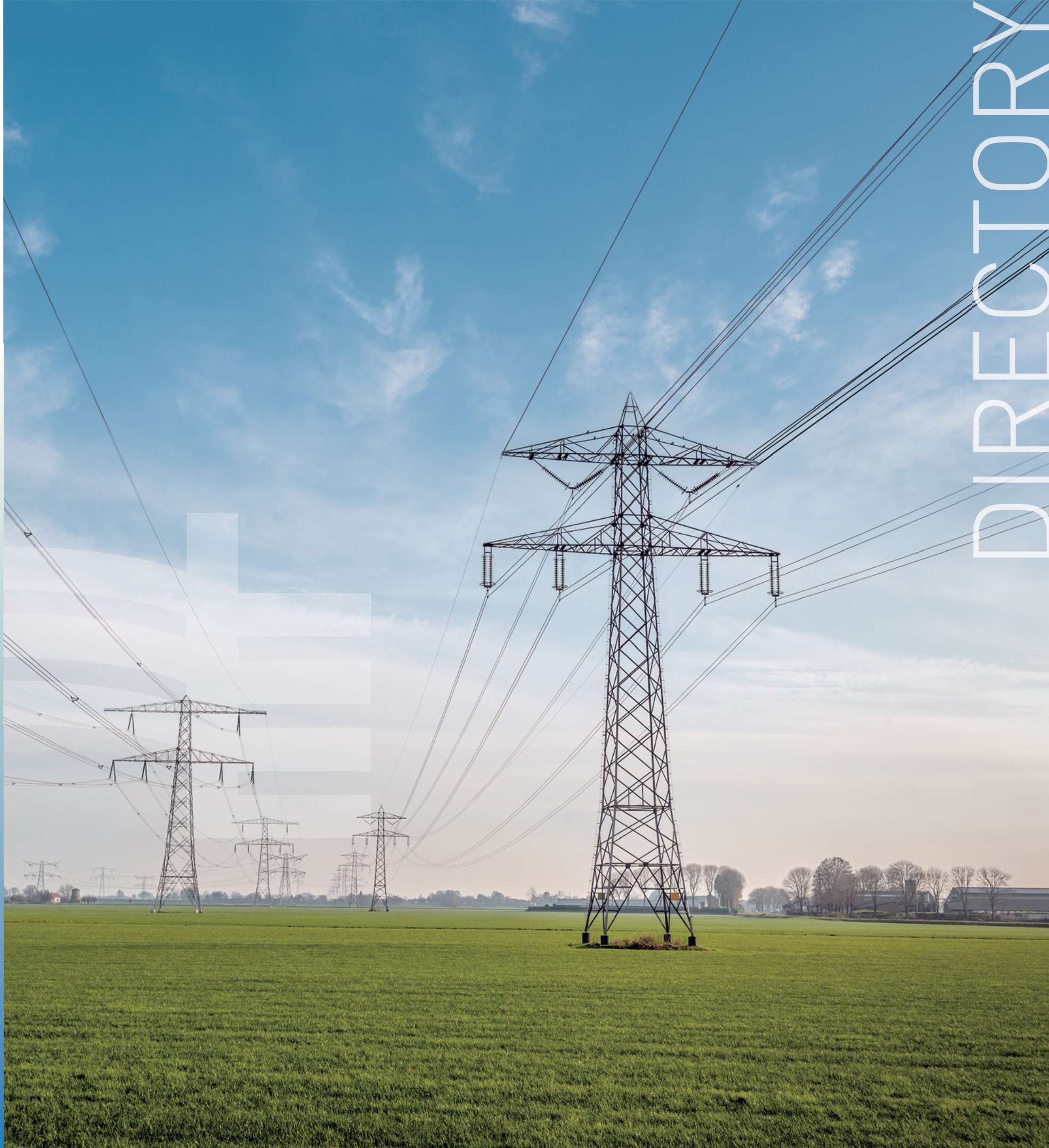
新一代 低压电力线宽带载波通信 助力新型电力系统 技术白皮书



版权声明

本报告版权属于中国南方电网有限责任公司，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本包括文字或者观点的，应注明“来源：中国南方电网有限责任公司”。违反上述声明者，本公司将追究其相关法律责任。

— 2025年8月首发 —



目录

引言	02
01 / 新型电力系统发展趋势及挑战	03
02 / 新一代载波典型业务场景及通信需求	04
2.1 典型业务场景	04
2.2 通信需求分析	09
03 / 新一代载波概念及价值	12
3.1 新一代载波概念	12
3.2 新一代载波的价值	13
04 / 新一代载波解决方案	15
4.1 新一代设备	15
4.2 新一代网络	32
4.3 新一代应用	40
05 / 总结与展望	44

引言

低压台区通信网络是电网与用户连接的“最后一公里”，是电网提升数字感知能力、数字决策能力和数字共享能力的关键。电力线载波通信技术在低压侧“最后一公里”网络覆盖、业务接入、电力信息感知等方面具有独到优势，是低压配电网数字化、智能化发展的关键。随着新型电力系统建设概念的提出，低压台区“源网荷储”多类型、强互动业务高速发展，对低压台区通信性能提出更高要求，推动低压电力线载波通信向高速率、低时延、高可靠、多业务承载方向发展。

未来，新一代低压电力线宽带载波通信（以下简称“新一代载波”）的发展将更加注重高性能、多功能化和标准化。一方面，借鉴 5G 通信技术，通过改进调制技术和优化信号处理算法，采用正交频分多址（Orthogonal Frequency Division Multiple Access，OFDMA）等技术实现频谱资源动态分配，解决低压电网信道时变性和频率选择性衰减问题，采用 Bit-Loading、多输入多输出（Multiple Input Multiple Output，MIMO）显著提升信道容量满足低压载波融合多业务场景下的大数据量传输需求；另一方面，开发基于 IP 协议的新一代低压电力线载波通信设备将成为可能，进一步拓展其应用场景。此外，在推进新一代载波技术产业化发展方面，还需要加速制定统一频段技术标准，推动产业化发展和跨厂商设备互联，推进载波通信的统一网管，结合大数据分析和智能管理系统，实现对通信网络的实时监控和优化调整，提升系统运行效率。

总之，面向新型电力系统的业务发展需求，配电网低压台区的技术发展需要实现在 400V 电压等级面向多业务多场景的统一高速通信网。结合 5G+ 通信技术的演进趋势，通信、感知、计算、控制一体化是必然的发展方向，并对低压台区的业务的云边协同控制、空间和电气拓扑识别、多维感知、就地决策具有重大的价值，需要提前布局。为推动实现“有电就有网，支撑 400V 以下全业务，覆盖千行百业，连通千家万户”，亟需研发新一代通感算控一体化高速通信技术，采用电力业务与底层通信解耦的寻址路由方案，基于应用场景进行灵活分组与本地快速路由寻址，实现多业务之间实时数据交互与协同控制，最终达到低压台区一张网，秒级感知，秒级调控，分钟级采集，助力新型电力系统发展。

本白皮书首先阐述新型电力系统发展趋势及挑战，分析新一代载波典型业务场景及通信需求，明确新一代载波的概念及价值，提出新一代载波解决方案，从新一代设备、新一代网络、新一代应用三个维度对新一代载波进行阐述，为推进新一代载波研究及应用提供方向，最后提出新一代载波发展建设目标和展望。本白皮书将为后续开展新一代载波标准申报与研制提供参考依据，为新一代载波企业标准、行业标准、国家标准乃至国际标准的制定提供依据。

本白皮书主要参编单位（以下排名不分先后）：中国南方电网有限责任公司、南方电网科学研究院有限责任公司、南方电网数字电网集团有限公司、南方电网电力科技股份有限公司、广州南网科研技术有限责任公司、广东电力通信科技有限公司、华为技术有限公司、海思技术有限公司、青岛东软载波科技股份有限公司、珠海中慧微电子有限公司、深圳市力合微电子股份有限公司、江苏芯云电子科技有限公司、深圳智微电子科技有限公司、中兴通讯股份有限公司。

本白皮书主要参编人员（以下排名不分先后）：黄昱、杨劲锋、陈宝仁、金鑫、黄博阳、冯俊豪、刘磊、李坤和、朱海龙、谢俊毅、杜浩东、杨晨、卢建刚、施展、张思建、崔超、李波、杨志花、王晓辉、胡泽鑫、姜光兴、程晨、黄梅莹、张胜波。

1. 新型电力系统发展趋势及挑战

新型电力系统的显著特征是新能源在电源结构中占据主导地位。2024 年《加快构建新型电力系统行动方案（2024-2027 年）》（发改能源〔2024〕1128 号）明确要求创新新型有源配电网调度模式，重点在分布式新能源、用户侧储能、电动汽车充电设施等新型主体发展较快的地区，探索应用“主配微网”协同的新型有源配电网调度模式，强化分布式资源管控能力，提升配电网层面就地平衡能力和对主网的主动支撑能力。新能源具有随机性、波动性、间歇性特点，系统调节资源需求大，且新能源大规模并网后系统呈现高度电力电子化特征，与传统电力系统相比，新型电力系统在持续可靠供电、电网安全稳定和生产经营等方面将面临重大挑战：

一是电网承载与消纳能力不足、反向重过载问题突出，部分台区在午间光伏出力高峰时段出现反向过载，需紧急切负荷或限功率运行。

二是调峰资源结构性短缺、煤电灵活性改造进度滞后，2025 年南方区域煤电调峰能力仅 45%，难以匹配光伏日内波动（峰谷差达 70%）。

三是技术集成与兼容性难题、设备接口标准碎片化，逆变器、储能装置与智能终端通信协议兼容性不足，导致数据互通失败率超 15%。

四是低压侧计量、调度控制系统复杂度与可靠性矛盾突出，分布式光伏“四可”（可观、可测、可控、可调）及未来可溯源、可聚合、可交易等新业态都要求在技术层面实现“感知－本地通信－网关－远程通信－控制主站”全链条协同，多节点故障率叠加（如通信延迟 > 500ms）可能引发连锁停电风险。

五是分布式光伏经济性与投资回报压力，低压台区数字化升级单台区成本约 12 万元，南方电网需改造的台区超 50 万个，总投资压力达 600 亿元。

六是电力现货交易业务的加大加深，对于各计量点电能量、负荷等数据需要至少到“分钟级”，方能满足虚拟电厂、负荷聚合商等对 15 分钟级的实时交易盈利模型的要求。

南方电网区域分布式光伏近年来装机快速攀升，自 2022 年起连续三年实现“翻番”增长，截止目前南方电网区域分布式光伏装机容量已超过 5600 万千瓦。大部分分布式光伏未实现分钟级数据采集，电力电量预测准确率低，可参与调控的装机占比不足 5%。可观、可测能力的不足，难以精准开展电网承载力评估，同时也难以实时监视和预测分布式光伏对系统平衡及配网安全的影响；可调、可控能力的缺乏，导致系统在其他调节手段用尽后，电力电量平衡及安全稳定运行裕度不足。分布式光伏“四可”能力不足已成为制约新型电力系统运行管理水平提升的关键问题。

总之，新型电力系统在低压侧的转型需突破技术、经济与政策的多重约束，需要通过统一设备标准、优化协同控制、创新市场机制，提升分布式光伏消纳能力与电网韧性，为“双碳”目标提供底层支撑。电力系统需加速推进以计量系统为基础的低压侧智能化应用经验推广，推动低压侧从被动承接到主动调控的范式变革，其重点之一是推进新一代载波变革和产品升级换代，全面提升低压侧通信水平。

2. 新一代载波典型业务场景及通信需求

在新型电力系统背景下，随着低压台区向数字化、智能化方向发展，用电管理及客户服务、配电网感知及实时监控、充电桩有序充电、分布式光伏监控、负荷侧用能管理等业务不断涌现，相关业务均需要采用低压侧通信目标网统一承载，对新一代载波的通信性能和业务承载能力提出了新的需求。

2.1 典型业务场景

2.1.1 用电管理及客户服务

2.1.1.1 业务描述

用电管理及客户服务以用电数据为核心，以客户需求为导向，其主要业务包括：用电信息采集，即以智能电表为核心数据来源，采集用户电压、电流、有功功率、无功功率等关键数据，实现以电力用户为核心的电费结算、用电异常预警等功能，并依托通信网络远程执行费控操作；计量网络管理，即以智能电表通信模组为核心数据来源，采集通信网络拓扑、信道状态、设备在线状态等信息，实现对通信网络进行监测和维护；计量设备管理，即以台区终端、智能电表、通信模组、智能互感器等设备为对象，采集其运行状态、资产信息、软硬件版本信息，以实现计量设备的档案管理、软件管理、故障预警等功能，其业务需求如表 2-1 所示。

表 2-1 用电管理与客户服务业务需求

序号	支撑功能	业务类型	数据频度	实时性要求	采集成功率	安全性	交互对象
1	低压用户用电信息采集	周期性采集	1 分钟	10 秒	99%	高	电表
2	配电台区监测（重过载监测、电压异常监测、三相不平衡监测、停电综合研判、用户停电监测等）	周期性采集	1 分钟	60 秒	99%	高	电表
3	台区运维管理	周期性采集	1 小时	/	/	低	电表
4	低电压用户分布情况，台区识别、相位识别	周期性采集	24 小时	/	/	低	电表、通信模组
5	低压拓扑采集	周期性采集	24 小时	/	/	低	电表
6	用户远程费控动作	实时控制类	秒级	秒级	99.99%	高	电表
7	低压台区用户停电事件上报	主动上报类	秒级	秒级	99.9%	高	电表
8	网络及节点信息上报	主动上报类	按需	/	/	高	通信模组
9	通信模块软件远程升级	数据下发类	按需	/	/	高	通信模组
10	低压台区电表广播校时	数据下发类	按需	秒级	99.9%	低	电表

2.1.1.2 网络规模

同一台区不超过 500 只电表。

2.1.1.3 通信速率

面向未来业务需求，周期类采集频率将从 15 分钟提升至 1 分钟，实时控制类要求秒级完成。结合设备数量进行测算，业务报文的应用层速率总和至少需要增加到 108.14kbps，其业务需求如表 2-2 所示。

表 2-2 用电管理与客户服务通信速率评估

序号	业务内容	网络规模（节点数）	698 下行通信速率（ kbps ）	698 上行通信速率（ kbps ）	645 下行通信速率（ kbps ）	645 上行通信速率（ kbps ）
1	低压用电信息采集	500	37.2	48.4	44.8	53.2
2	用户远程费控动作	500	3.28	2.24	6.72	3.2
3	低压台区用户停电事件、节点信息上报	500	0.01	0.01	0.01	0.01
4	远程升级、广播校时	500	0.01	0.01	0.01	0.01
合计		500	40.5	50.66	51.54	56.6

2.1.2 配电网感知及实时监控

2.1.2.1 业务描述

配电网感知及实时监控类业务目标为实时掌握配电系统的实时运行状态、及时发现故障并开展现场维护。相关功能以分支开关、智能电表、传感器等电网公司部署的设备为数据来源，采集参数包括电气参数、设备运行状态、环境状态等。相关业务主要包括配变负荷管理、低压用电管理、低压拓扑识别、分支监测、分支控制、负荷实时监测等，其业务需求如表 2-3 所示。

表 2-3 配电网感知及实时监控业务需求

序号	支撑功能	业务类型	数据频度	实时性	可靠性	安全性	交互对象
1	配电台区监测	周期性采集	1 分钟	分钟级	99%	高	电表
2	低压停电感知、分支负载监测	周期性采集	1 分钟	分钟级	99%	高	分支开关
3	低压智能开关位置	周期性采集	24 小时	否	99%	低	分支开关
4	低压拓扑识别	周期性采集	24 小时	否	99%	低	分支开关、电表
5	低压拓扑采集	周期性采集	24 小时	否	99%	低	电表
6	配变负荷管理	周期性采集	15 分钟	否	99%	低	电表
7	低压用电管理	周期性采集	15 分钟	否	99%	低	电表
8	配变运行供电能力分析	周期性采集	15 分钟	否	99%	低	电表
9	户均配变容量计算	周期性采集	24 小时	否	99%	低	电表
10	低压用户电能表位置	周期性采集	24 小时	否	99%	低	电表
11	分支开关控制和定值设置	实时控制类	秒级	秒级	99.9%	高	分支开关

2.1.2.2 网络规模

通常情况下，同一台区不超过 500 只电表、35 只低压分支开关。

2.1.2.3 通信速率

面向未来业务需求，配电监测类业务对低压分支开关的监测（分钟级）和控制实时性要求较高（秒级响应），结合设备数量进行测算，业务报文的应用层速率总和至少需要增加到 62.37kbps，其业务需求如表 2-4 所示。

表 2-4 配电网感知及实时监控通信速率评估

序号	业务内容	数据内容	698 下行通信速率（kbps）	698 上行通信速率（kbps）	645 下行通信速率（kbps）	645 上行通信速率（kbps）
1	低压分支运行状态采集	电压、电流、电网频率、有功功率、无功功率、功率因数、线缆温度、开关状态、正反向有功总、正反向无功总等	0.32	0.74	0.89	1.23
2	低压拓扑识别	特征电流点名，特征电流信息等	0.61	1.1	0.48	0.82
3	低压分支开关控制	读取表号，身份认证，执行控制操作等	26.00	33.60	13.16	8.12
合计			26.93	35.44	14.53	10.17
			62.37		24.7	

2.1.3 充电桩有序充电

2.1.3.1 业务描述

充电桩有序充电是指通过智能调度系统动态调整充电时间和功率，实现优化电网负荷、辅助削峰填谷。相关功能以低压台区内部署的充电桩为数据采集对象，采集数据包括充电桩的电气数据、电能计量数据及运行状态数据，其业务需求如表 2-5 所示。

表 2-5 充电桩有序充电业务需求

序号	支撑功能	业务类型	数据频度	实时性要求	采集成功率	安全性	交互对象
1	充电桩状态采集	周期性采集	15 分钟	15 分钟	99%	高	充电桩
2	充电桩运行状态监测	周期性采集	1 分钟	60 秒	99%	高	充电桩
3	电动汽车充电状态采集	周期性采集	5 分钟	5 分钟	99%	高	充电桩
4	充电设施负荷特性分析	周期性采集	15 分钟	否	99%	低	充电桩
5	充电桩负荷管理	周期性采集	24 小时	否	99%	低	充电桩
6	充电桩负荷调节	实时控制类	按需	秒级	99.9%	高	充电桩

2.1.3.2 网络规模

500 户居民用户规模台区，按 30% 用户配置充电桩估算，共约 150 个充电桩监测节点。

2.1.3.3 通信速率

面向充电桩有序充电场景，采集频率要求较高（分钟级），其控制指令下发频度较低。结合设备数量进行测算，业务报文的应用层速率总和至少需要增加到 40.37kbps，其业务需求如表 2-6 所示。

表 2-6 充电桩有序充电通信速率评估

序号	业务类型	数据项	数据长度 / 字节（下行 + 下行）	应用层速率需求 / kbps
1	充电状态监控	充电用能状态数据，合并 1 帧，按照采集类业务方式实现：正反、向有功电能总电能；电压电流 / 有功功率 / 无功功率 / 电网频率 / 功率因数	180	3.6
2	工况监控	常规诊断类，合并 1 帧，按照采集类业务方式：工作状态（待机、充电中）、熔断器状态、温度状态	102	0.41
3	充电桩实时数据	电压、电流、正向有功电能示值、反向有功电能示值、充电额定定值、已充电量、正向有功功率、反向有功功率	303	36.36
合计				40.37

2.1.4 分布式光伏监控

2.1.4.1 业务描述

分布式光伏监控是指电网公司对低压台区内的分布式光伏节点进行监测和调控，以实现分布式光伏发电波动的平抑和消纳。相关功能以用户关口表及光伏逆变器为数据来源，采集数据包括电气信息、设备运行参数、设备告警信息等，其业务需求如表 2-7 所示。

表 2-7 分布式光伏监控业务需求

序号	支撑功能	业务类型	数据频度	实时性要求	采集成功率（实时）	安全性	交互范围
1	分布式光伏实时数据监测、故障事件上报	周期性采集	1 分钟	分钟级	99%	高	关口表
2	分布式光伏运行状态监测	周期性采集	1 分钟	分钟级	99%	高	逆变器、关口表
3	分布式光伏负荷管理	周期性采集	24 小时	否	99%	高	逆变器
4	分布式新能源出力监控与分析	周期性采集	15 分钟	15 分钟级	99%	高	逆变器
5	分布式光伏出力控制	实时控制类	按需	秒级	99.9%	高	逆变器

2.1.4.2 网络规模

500 户居民用户规模台区配置分布式光伏设备约 40 台。

2.1.4.3 通信速率

结合设备数量进行测算，业务报文的应用层速率总和至少需要增加到 5.52kbps，其业务需求如表 2-8 所示。

表 2-8 分布式光伏监控通信速率评估

序号	业务内容	数据内容	698 下行通信速率（kbps）	698 上行通信速率（kbps）	645 下行通信速率（kbps）	645 上行通信速率（kbps）
1	光伏运行状态采集	电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数等	0.23	0.64	0.27	0.60
2	光伏并网断路器电气量	电压、电流、频率、有功功率、无功功率、视在功率、功率因数、剩余电流等	0.28	0.48	0.68	0.76
3	光伏并网断路器状态	分合闸状态、告警信息等	0.16	0.19	0.17	0.19
4	光伏计量表采集	电压、电流、有功功率、无功功率、正反向有功电能示值、四象限无功电能示值等	0.24	0.52	0.84	1.08
5	光伏信息单元电气量	电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数等	0.22	0.36	0.43	0.51
合计			1.13	2.19	2.38	3.14
			3.32		5.52	

2.1.5 负荷侧用能管理

2.1.5.1 业务描述

负荷侧用能管理业务是指通过实时监测、智能预测及柔性调控技术，对用户侧电力负荷进行动态优化调度，实现削峰填谷、能效提升及电网安全经济运行的综合能源服务。相关功能以用户侧储能、空调等典型需求响应设备为数据来源，采集数据包括电气信息、设备运行参数等，其业务需求见表 2-9。

表 2-9 负荷侧用能管理业务需求

序号	支撑功能	业务类型	数据频度	实时性要求	采集成功率（实时）	安全性	交互范围
1	台区户用负荷精细化管理、实时调控	周期性采集	15 分钟	15 分钟	99%	高	空调、储能
2	新型储能运行状态监测	周期性采集	1 分钟	15 分钟	99%	高	储能
3	用户空调运行状态采集	周期性采集	1 分钟	15 分钟	99%	高	空调
4	用户储能运行状态采集	周期性采集	15 分钟	15 分钟	99%	高	储能
5	储能负荷管理	实时控制类	24 小时	否	/	低	储能
6	自动需求响应调节	实时控制类	/	秒级	/	高	需求响应设备

2.1.5.2 网络规模

500 户居民用户规模台区，配置约 10 台储能设备和 10 台大功率空调设备。

2.1.5.3 通信速率

结合设备数量进行测算，业务报文的应用层速率总和至少需要增加到 0.2kbps，其业务需求如表 2-10 所示。

表 2-10 负荷侧用能管理通信速率评估

业务类型	数据项	通信时间	站点数（个）	698 报文应用层速率（kbps）		645 报文应用层速率（kbps）	
				下行	上行	下行	上行
数据采集	正向有功总、反向有功总	60 秒	20	0.09	0.10	0.09	0.11
合计				0.19		0.20	

2.2 通信需求分析

根据典型业务场景，新一代低压电力线载波通信需要在网络规模、通信速率、多业务承载三大方面进行提升。

2.2.1 网络规模升级

目前，南方电网已建成以载波通信为核心技术的低压台区通信网络，实现了智能电表和低压集抄的全面“两覆盖”。然而，现有通信网络主要用于计量营销领域、采集对象主要为智能电表，在“营配调融合”及新型电力系统转型背景下，已无法满足配电自动化、分布式光伏监控、用户侧需求响应等业务需求。因此，新一代载波网络接入设备将从智能电表扩展到低压台区泛在数字化设备。网络规模方面，南方电网 99% 以上的低压台区智能电表数量小于 500 台，未来不会有显著提升，估算其他接入设备最大数量如表 2-11 所示。

表 2-11 新旧载波通信网络规模对比

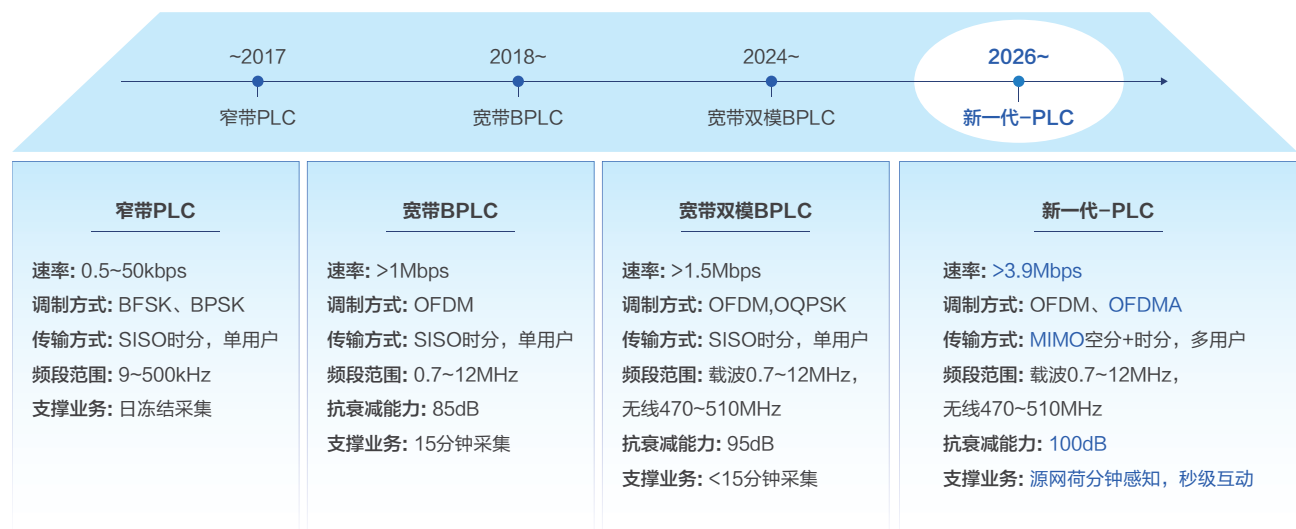
序号	设备	当前载波通信接入最大数量	新一代载波接入最大数量
1	电能表	500	500
2	通信模块	/	500
3	低压分支开关	/	35
4	分布式光伏	/	40
5	充电桩	/	150
6	空调、储能	/	20
合计		500	1245

2.2.2 通信速率提升

根据最新业务测算，下一代载波通信技术需满足物理层速率 3.9Mbps 的核心指标，其中营销类业务需求为 1.9Mbps，配电类需求为 1.2Mbps，新兴业务类需求为 0.8Mbps，详见表 2-12。

业务类别	业务内容	网络规模 / 个	应用层合计速率 / kbps	单网络物理层合计速率 / kbps	多网络物理层合计速率 / kbps
用电管理及客户服务 - 营销类	低压用户用电信息采集	500	98.00	700.00	1750.00
	用户远程费控动作	500	9.92	70.86	177.15
	低压台区用户停电事件、节点信息上报	500	0.02	0.14	0.35
	远程升级、广播校时	500	0.02	0.14	0.35
配电网感知及实时监控 - 配电监测类	台区识别、相位识别、资产管理等	500	3.01	21.51	53.78
	低压分支监测和控制	35	62.37	445.50	1113.75
源网荷储双向互动 - 新兴业务类	充电桩有序充电	150	40.030	288.36	720.90
	分布式光伏“四可”	40	5.520	39.43	98.58
	用户负荷用能管理	20	0.20	1.43	3.58
总计		-	219.09	1567.37	3918.46

随着业务功能不断增加，南方电网低压电力通信技术已历经三次重大迭代：从早期窄带载波（通信速率仅 50kbps）到宽带载波（速率提升至 1Mbps），再演进至当前主流的宽带双模通信技术（最高速率达 1.5Mbps），新一代载波的通信速率需要提升至 3.9Mbps 以上。载波通信的技术演进路线详见图 2-1。



2.2.3 多业务承载

- 10 -



3. 新一代载波概念及价值

3.1 新一代载波概念

基于上述典型业务场景需求，与当前载波通信相比，新一代载波不但需要在通信速率、接入能力、覆盖范围方面有大幅提升，其技术愿景也从提供通信“连接”演变为提供多业务部门通感算一体化“服务”；其设备定位从“通信载体”演变为低压台区广泛分布的“智能基座”；其网络功能从智能电表“低压集抄”演变为电力算力网络覆盖低压台区“最后一公里”的重要补充。

为此，新一代载波将围绕三个方向创新，即：新一代设备的基础通信能力创新、新一代网络的覆盖能力创新、新一代应用的通感算一体化服务创新。

3.1.1 新一代设备

新一代宽带载波设备不仅需显著提升现有电表的采集速率、采集延时和可靠性，还须实现大量非计量节点（包括电源侧、线路侧、多元可调负荷侧及传感节点）接入，满足超大规模终端组网、网络分级架构与差异化业务等级 QoS 保障需求；同时还要支撑光伏并网、储能设备接入、充电桩等大功率可调负荷有序调控等新业务的通信需求，在通信速率、通信可靠性和通信时延等方面较上一代宽带载波设备均有更高的要求，即物理层通信速率由 1.5Mbps 提升到 3.9Mbps，抗衰减能力由 95dB 提升到 100dB，普通业务数据采集成功率达到 99%、重点业务采集成功率达到 99.99%。

关键技术方面，通过充分挖掘低压台区有限的可用频段和每个载波可承载的最大比特数（bit-loading），提升通信速率；通过 MIMO 技术，通过空间分集和空分复用实现抗干扰能力和通信速率的提升；通过 OFDMA 技术对多个用户有频域进行有效调度，减少信道抢占次数，提升信道利用率；通过物理层帧格式的优化，实现对高速通信模式的极限性能挖掘。

此外，新一代设备还需在基础算力层面实现突破性升级，支撑人工智能（Artificial Intelligence，AI）技术从输变电向配用电领域的全域渗透，通信设备集成通信、感知、计算与 AI 能力于一体，融入“云－管－边－端”分级算力架构体系，实现多层级协同优化，支撑网络自主运维、拓扑辨识、需求侧响应、分布式新能源调控、双向潮流监测等业务需求。

3.1.2 新一代网络

新一代宽带载波网络具有“网随电通，算网融合”特性，一方面，要实现低压台区及用户侧设备的泛在接入（包括配电室内设备、线路分支设备、光伏并网设备、充电桩设备、表后用户侧设备等），将通信网络随着电力线向末梢延伸；另一方面，要强化通信和计算的深度融合，利用 AI 技术提升网络自配置、自修复、自优化的运维能力，为多业务部门提供零等待、零接触、零故障的网络服务，算力随网络流动，满足多业务部门、不同类型业务在台区各个角落的数据处理需求。

基于新一代载波技术和业务需求，新一代网络将采用“主干网（高速 MIMO）+ 区域网”分层架构，使高速通路和业务信息流向匹配，提高通信速率和吞吐量；通过 IP 组网机制实现灵活节点接入与动态路由寻址；结合差异化 QoS

策略保障多业务调度优先级，推动电力线载波通信向低压台区全业务场景深度渗透，同时实现通信带宽、可靠性及运维效率的大幅提升。

3.1.3 新一代应用

新型电力系统转型过程中，低压侧可互动资源与日俱增，应用需求快速迭代。为满足多部门定制化业务需求，新一代载波设备深度融合南方电网“电鸿”物联操作系统，构建“统一基座 + 模块化应用”开放生态，实现跨部门功能协同。新一代应用的典型场景如图 3-1 所示。

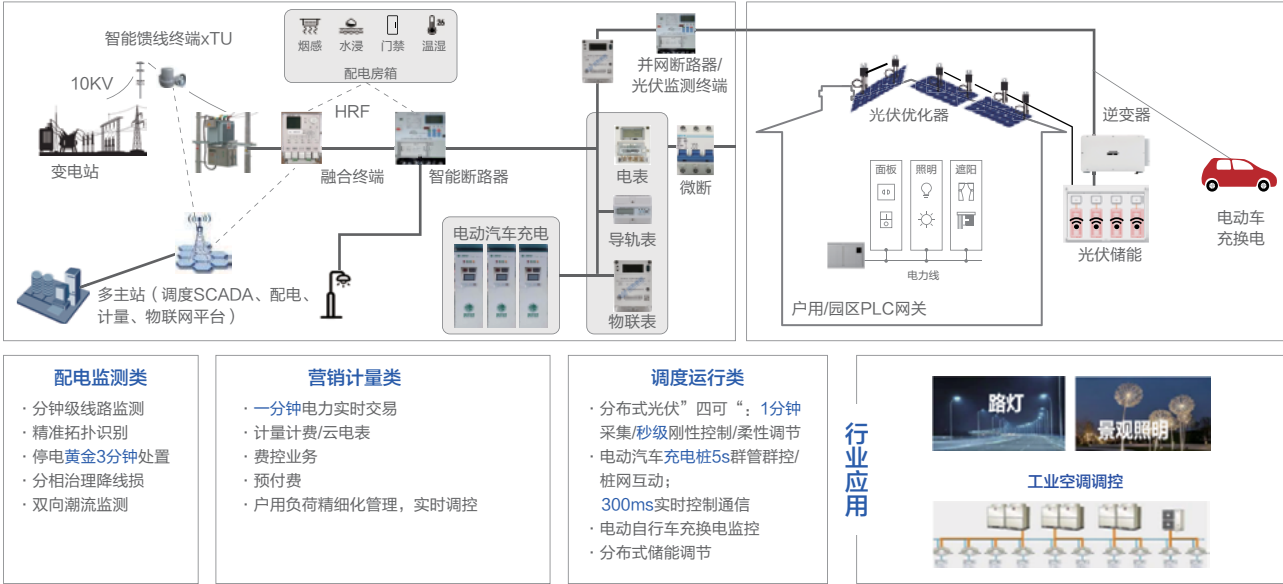


图 3-1 新一代应用的典型场景示意图

市场营销类：支持全量分钟采集，满足线损精细化管理，现货市场实时交易对负荷数据实时性，异常用电等要求。

配电监测类：满足秒级线路供电信息监测、精准拓扑识别、停电故障快速处置，双向潮流动态监测，台区反向供电异常告警，以及分相、分段线损治理及阻抗模型计算，供电可靠性告警。

新兴业务类：提供分布式光伏秒级感知与柔性调节、电动汽车充电桩群管群控、分布式储能自动调控能力，推动台区本地能源消纳与区域自治运行。

3.2 新一代载波的价值

新一代载波通过在通信速率、抗干扰能力的提升和网络技术的优化，大幅度提升通信性能和组网能力，将更好地支撑低压台区分钟级采集、关键控制业务秒级响应、变－线－户拓扑识别、电表“上电即上线”、分布式光伏“四可”等新业务的开展。进而支撑突破电力可靠供应、电网安全运行、电能经济供应的挑战，助力南方电网以“两化协同”促“两型建设”战略的推进。

通过多维度的技术革新与应用深化，新一代载波正在成为构建新型电力系统和能源互联网的关键基础设施，其核心价值为：

（一）大幅提升低压载波通信性能：

- 1、更高速率传输：宽带载波通信速率可达 3.9Mbps，支持实时并发 50 ~ 100 条抄表指令，单表应答时间仅需 50 ~ 80 毫秒，而窄带载波需 10 ~ 15 秒，由此可见新一代载波的应用极大的提升了数据传输效率。
- 2、更强抗干扰能力：高带宽特性降低了突发干扰影响，同时支持快速数据重传机制，可保障通信成功率超过 99.9%。
- 3、更远距离覆盖：点对点通信距离达 500 米以上，组网中继覆盖范围可扩展至几公里，适应大规模配电网场景。
- 4、更健壮的通信网络：结合网络管理手段，具备自配置、自修复、自优化的运维能力，为多业务部门提供零等待、零接触、零故障的网络服务。

（二）全面支撑低压侧配电网各类业务应用：

- 1、支持高效数据采集：支持单次抄读 500 块电表数据仅需 1 分钟（窄带需 3 ~ 4 小时），可同步处理窃电检测、能耗分析等复杂任务。
- 2、支持低压配电网透明化：支持低压配电网拓扑自动识别、故障快速定位、用电质量实时监测等。
- 3、支持配电网实时监测与控制：实现电力设备的远程实时监控与精准调控，如动态调整分布式电源输出功率、快速定位电网故障等，显著提升电网可靠性。
- 4、兼容未来升级：具备南向接入及协议转换能力，满足智能家居、分布式新能源、隔墙售电、需求响应等多场景扩容需求。

（三）经济效益与社会价值

- 1、满足电网多部门业务需求：新一代技术以≥ 3.9Mbps 高速率、超千节点接入能力及灵活应用架构，统一承载营销、配电、调度等多部门业务，打破专业壁垒，支撑本地实时处理与高效协同。
- 2、促进电网数字化转型：提供高速可靠连接与边缘智能，实现台区通信、感知、计算的泛在覆盖，为分布式光伏、储能系统提供高可靠通信通道，支撑微电网与传统配网的协同运行。
- 3、推动新质生产力发展：预计 2030 年国内载波通信芯片市场规模超百亿，推动国内通信产业链升级，通过自主协议栈与芯片研发加速国产化替代，提升产业竞争力，支撑我国通信强国战略与数字经济发展。

4. 新一代载波解决方案

面向新型电力系统的业务发展需求，低压配用电网台区的技术发展需要实现在 400V 电压等级面向多业务多场景的统一高速通信网。结合 5G+ 通信技术的演进趋势，通信、感知、计算、控制一体化是必然的发展方向，该特性对低压台区的业务的云边协同控制、拓扑识别、就地决策具有重大的价值，需要提前布局。

4.1 新一代设备

4.1.1 工作频段扩展

4.1.1.1 技术概述

电力线载波通信信道环境具有噪声干扰强时变性、负载变化随机波动的特征，现有宽带载波通信出于传输距离、兼容性等方面考虑，仅允许全台区使用单一通信频段，频段资源利用率低。新一代载波技术各通信节点间可以根据信道情况自适应选择合适的通信频段，并允许利用全频段进行通信，以提升通信速率。新一代载波可选通信频段见表 4-1。

表 4-1 通信频段

频段	频段范围（MHz）	载波起始编号	载波截止编号	子载波数	备注
0	1.953 ~ 11.963	80	490	411	现有频段（未使用）
1	2.441 ~ 5.615	100	230	131	现有频段
2	0.781 ~ 2.930	32	120	89	现有频段
3	0.781 ~ 11.963	32	490	459	扩展频段

4.1.1.2 实现方案

在新一代载波技术中，要充分挖掘低压台区载波信道可用的频段资源，增加 0.781 ~ 11.963MHz 通信频段，提供一种具备提供更高通信带宽和更高通信速率的能力的选择。在上下级通信质量好的电表设备间、配电房设备间、分支箱设备间及表箱设备间可以根据信道情况，自适应选择使用 0.781 ~ 11.963MHz 的高速通信频段，并结合后文的 OFDMA 的频段资源最优调度策略，实现对频段资源的充分利用，提升低压台区的载波通信速率。

4.1.1.3 带来的效益

采用 0.78 ~ 12MHz 通信频段，相对于现有标准现场使用的频段速率可提升 1.5 ~ 4 倍，根据现网部分高层台区的实测点对点通信性能，0.781 ~ 11.963MHz 频段可达到 96% 以上通信成功率，现场具备应用的条件。

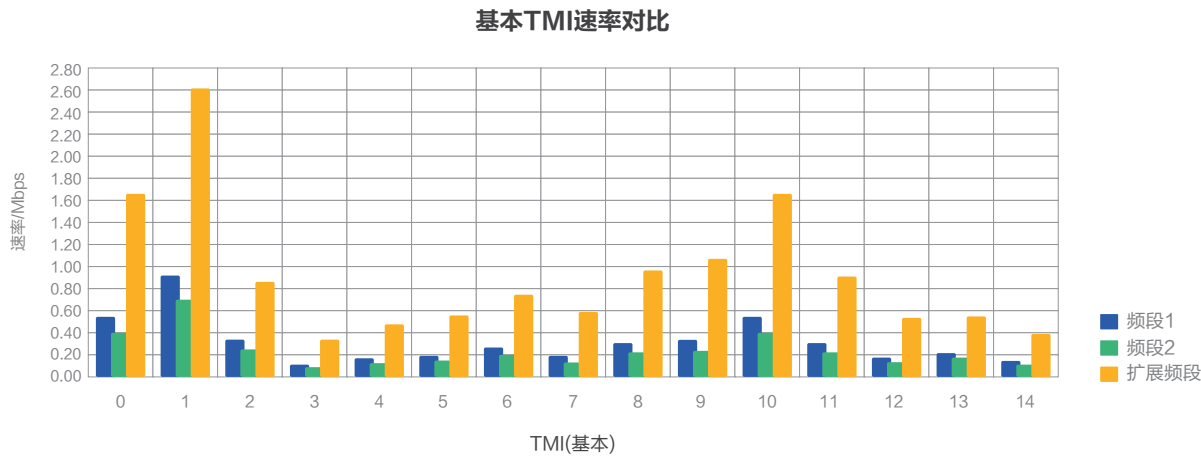


图 4-1 扩展频段的基本 TMI 速率对比

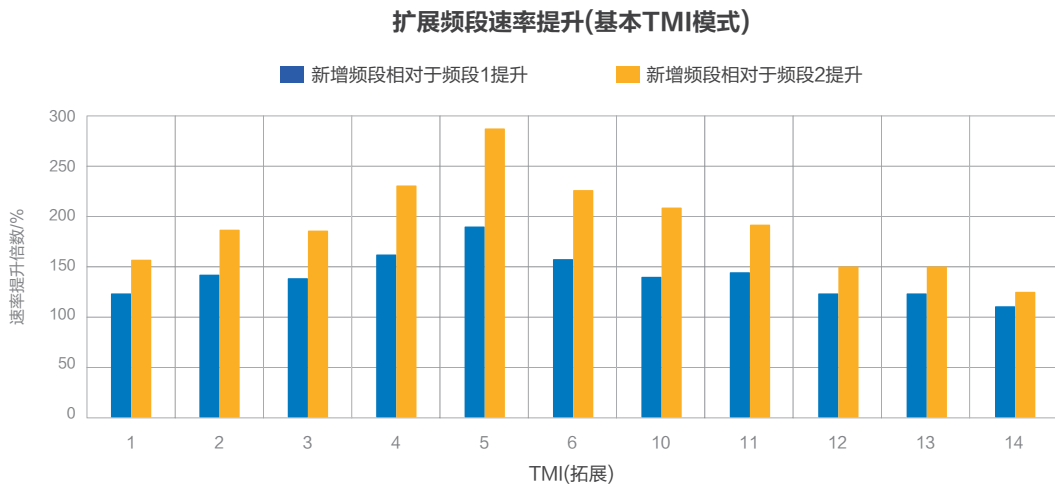


图 4-4 扩展频段的扩展 TMI 相对于现有频段的速率提升对比分析

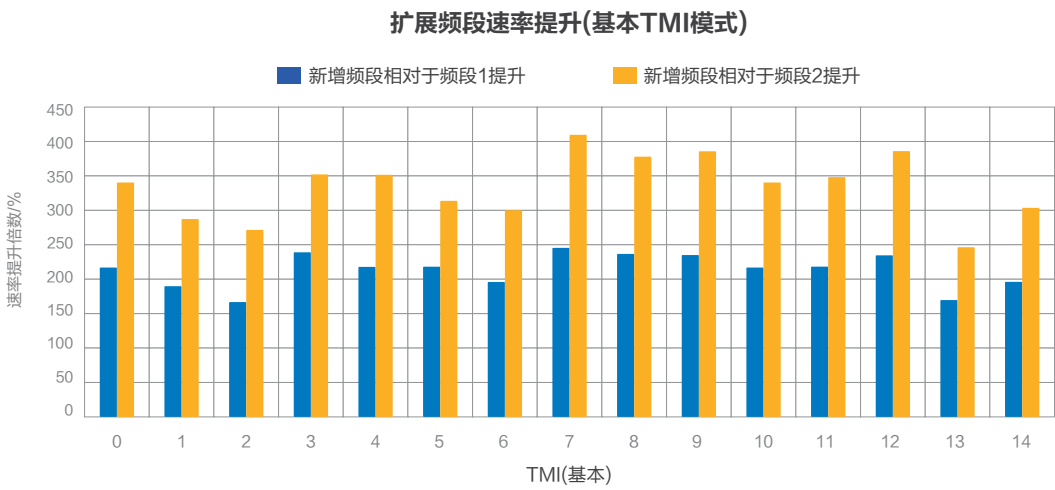


图 4-2 扩展频段的基本 TMI 相对于现有频段的速率提升对比分析

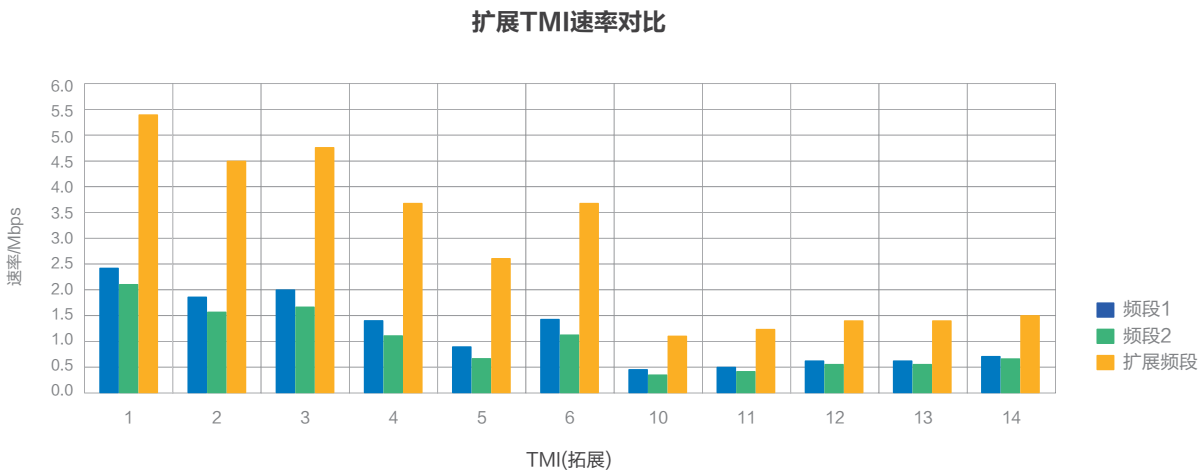


图 4-3 扩展频段的扩展 TMI 速率对比

表 4-2 速率对比表

TMI	扩展 TMI	频段 1 Mbit/s	频段 2 Mbit/s	扩展频段 3 Mbit/s	扩展频段 3 相对于频段 1 提升	扩展频段 3 相对于频段 2 提升
0	—	0.523	0.377	1.646	215%	337%
1	—	0.903	0.676	2.600	188%	285%
2	—	0.318	0.228	0.843	165%	269%
3	—	0.095	0.071	0.320	237%	349%
4	—	0.145	0.102	0.458	216%	348%
5	—	0.171	0.132	0.541	216%	311%
6	—	0.247	0.183	0.727	194%	297%
7	—	0.166	0.112	0.568	243%	406%
8	—	0.284	0.200	0.949	234%	374%
9	—	0.315	0.217	1.048	233%	382%
10	—	0.523	0.377	1.646	215%	337
11	—	0.288	0.205	0.910	216%	345
12	—	0.158	0.109	0.525	232%	382
13	—	0.198	0.154	0.531	168%	244
14	—	0.126	0.093	0.372	194%	301
15	1	2.414	2.100	5.362	122%	155
16	2	1.859	1.570	4.471	141%	185
17	3	1.996	1.667	4.733	137%	184
18	4	1.406	1.115	3.660	160%	228
19	5	0.903	0.676	2.600	188%	285
20	6	1.431	1.130	3.660	156%	224
21	10	0.465	0.361	1.108	138%	207%
22	11	0.510	0.427	1.238	143%	190%
23	12	0.631	0.564	1.402	122%	149%
24	13	0.631	0.564	1.402	122%	149%
25	14	0.717	0.672	1.502	109%	124%

4.1.1.4 需要付出的代价

基于电力线载波通信信道中噪声、负载等的时变性以及电力线本身的阻抗特性，决定了高频段的信号衰减更大，传输距离降低，在现网应用时扩展通信频段要与通信频段 1 和通信频段 2 做好自适应选择应用，需要结合信道特性进行评估。

4.1.2 PLC-MIMO 技术

4.1.2.1 技术概述

MIMO (Multi-input Multi-output, 多输入多输出) 的概念最早是在无线通信系统中提出的，指通过多天线独立收发信号并在接收端恢复信息的技术。MIMO 系统包含空间复用与空间分集技术：空间复用通过不同天线发送独立信息以提升系统容量；空间分集利用多天线收发相同信号以增强抗衰减和抗噪声性能。整体而言，在同等带宽和发射功率下，MIMO 可提升系统容量、覆盖范围、信噪比及信号质量。

在电力线通信 (Power Line Communication, PLC) 技术领域，MIMO 技术最早出现在 G.hn、HomePlug AV2 等标准中，称为 PLC-MIMO。相对于单输入单输出 SISO (Single Input Single Output) PLC 系统来说，PLC-MIMO 可以利用单相线环境中的零线、火线、保护地线构建多条物理电路连线形成 MIMO 系统，也可以用于三相四线制环境中相线 A/B/C 与零线构建多条物理电路连线形成 MIMO 系统。PLC-MIMO 通过多端口并行发送独立信号获取空间复用增益以提升速率，或发送相同信号获取空间分集增益以提升可靠性，可显著提升系统可靠性。

根据发射和接收通道个数不同，可构成不同形式的 MIMO 系统，从广义上来说，SIMO (Single Input Multiple Output, 单输入多输出)、MISO (Multiple Input Single Output, 多输入单输出) 均属于 MIMO 系统。不同形式的 MIMO 示意如图 4-5 所示，



图 4-5 不同 MIMO 形式示意图

PLC-MIMO 系统的构建方式取决于具体电力线环境。对于三相环境可利用三相四线构建相线与零线结合的三相 MIMO 系统，支持 2×2 、 2×3 、 3×3 MIMO 传输，如图 4-6 所示；对于单相通信环境，支持下行 MISO 1×3 、上行 SIMO 3×1 传输，如图 4-7 所示。

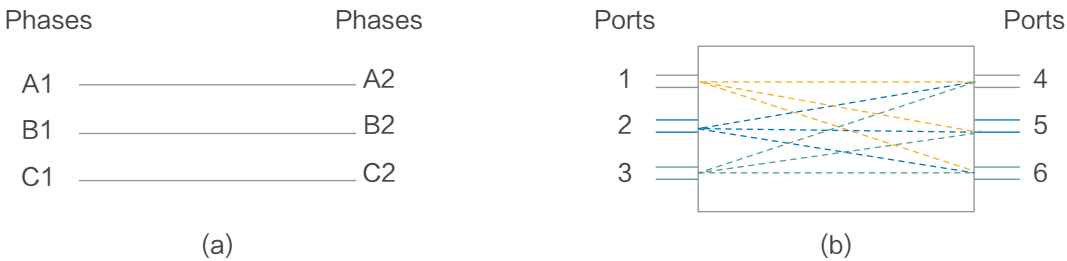


图 4-6 三相四线制的 MIMO 示意图

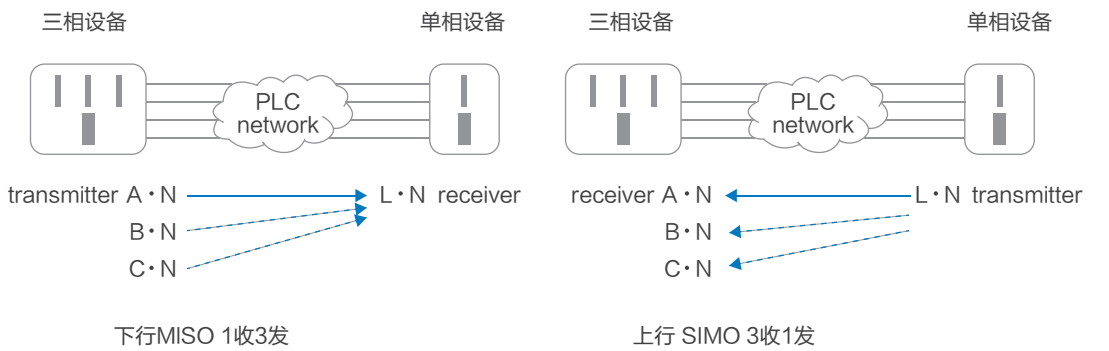


图 4-7 单相通信 1×3 和 3×1 配置示意图

4.1.2.2 实现方案

新一代载波中，PLC-MIMO 系统通过设计 2 流三发三收的结构来实现，其物理层结构如图 4-8 所示。

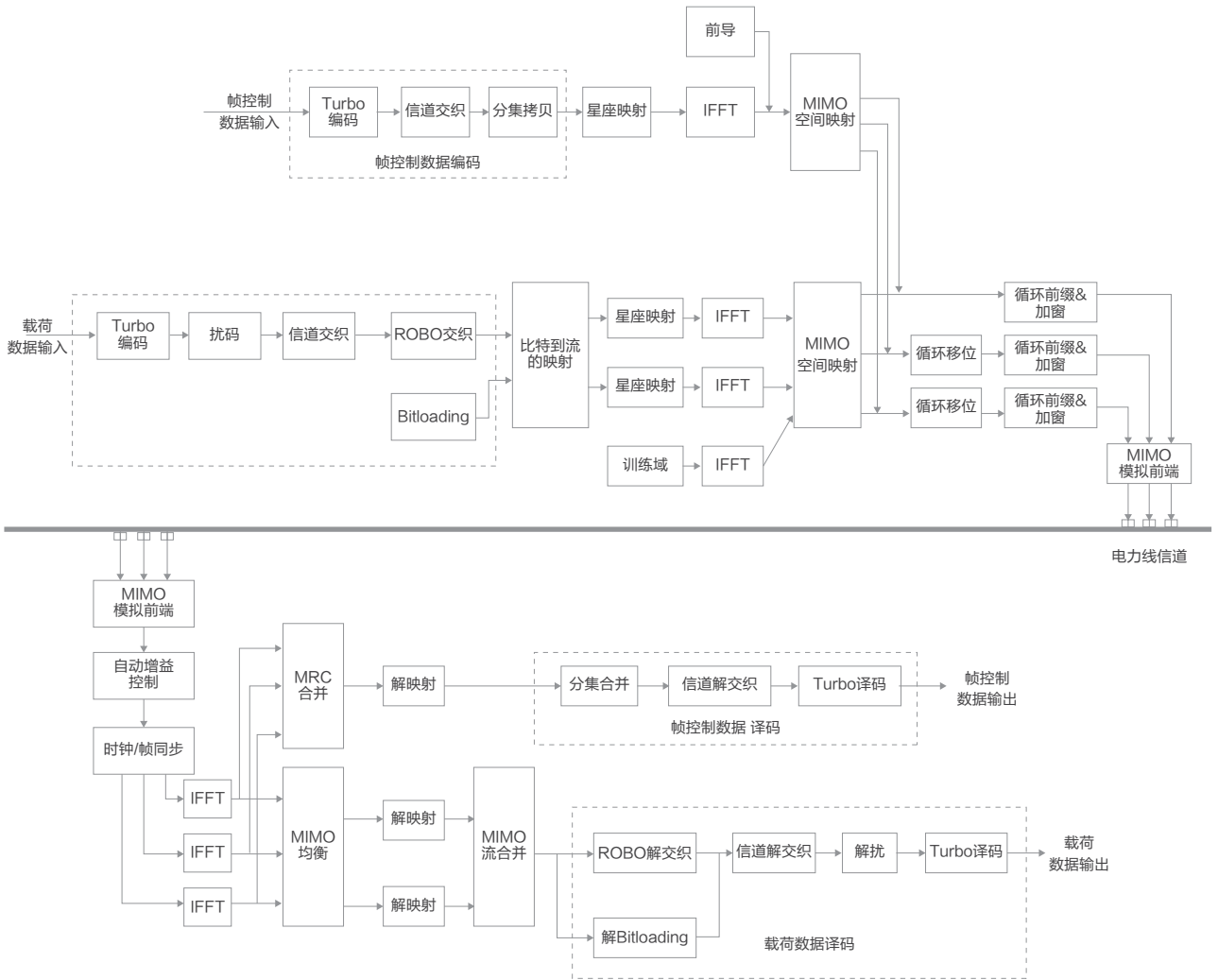


图 4-8 三相 MIMO 物理层结构图

在低压台区中，针对单相通信设备（如单相表）和三相通信设备（如集中器、断路器、三相 LTU 等），MIMO 技术的可用性及参考方案分析如表 4-3：

表 4-3 低压台区 MIMO 技术的可用性及参考方案分析

发送端	接收端	可用技术	性能收益
三相 CCO	三相 LTU/ 断路器 / 光储充接入单元	MIMO	1. 空分复用，提升速率。 2. 空间分集和干扰抑制，提升抗干扰性能。
三相 LTU/ 断路器 / 光储充接入单元	三相 CCO	MIMO	
三相 LTU/ 断路器 / 光储充接入单元	三相单相 STA	xT1R 波束成形	波束成形，提升速率。
单相表	三相 LTU/ 断路器 / 光储充接入单元 / CCO	1T3R 分集合并	分集合并，提升速率和抗干扰性能。

4.1.2.3 带来的效益

PLC-MIMO 技术的应用增益与低压台区载波网络的三相线路覆盖度正相关，随着接入设备的类型的增加，其应用可分为两个阶段：

（1）用电信息采集阶段

当前低压台区普遍处于此阶段，使用 PLC 通信的设备主要包括集中器和智能电表，其中集中器 - 三相表 - 表箱间为三相线路，集中器 - 表箱 - 单相表间为单相线路，其场景示意如图 4-9。

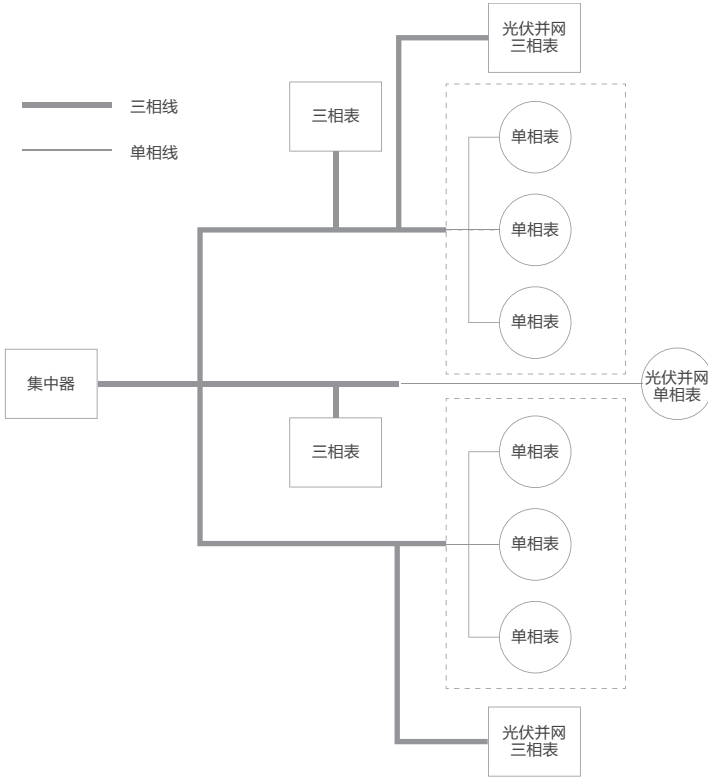


图 4-9 用电信息采集场景示意图

该阶段使用 PLC-MIMO 技术可获取的收益如下：

- 1) CCO 接收端通过空间分集提升接收性能，有效降低台区变压器周边噪声对 CCO 接收信号的影响；
- 2) 台区中的三相电表模块之间、CCO 和三相电表模块间使用 MIMO 通信，通过代理评估时增加 MIMO 能力的评估维度，优先选择具 MIMO 能力的站点作为中继代理，抗干扰性能提升约 5.8dB，通信速率提升 1 倍。

（2）配用电智能化全覆盖阶段

在此阶段，PLC 通信设备除集中器和电表外，新增的智能断路器、光储充接入单元、分支监测单元等设备均为三相设备，其场景示意如图 4-10。

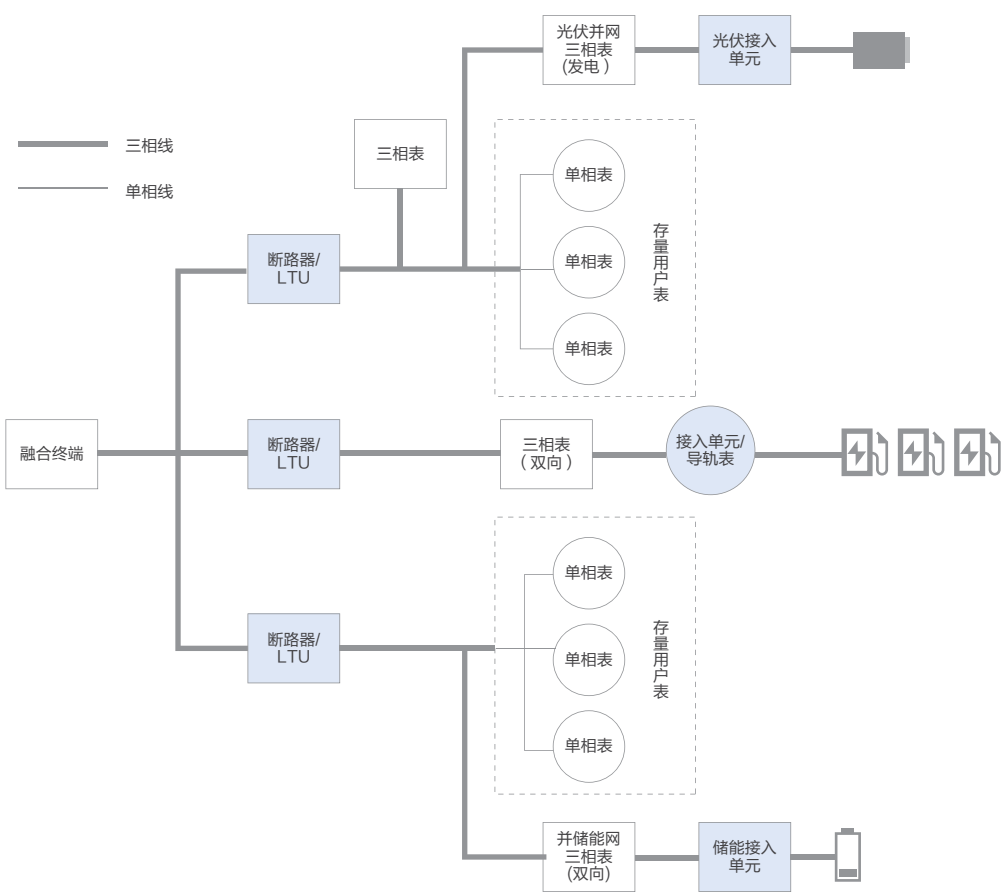


图 4-10 配用电智能化全覆盖场景示意图

该阶段使用 PLC-MIMO 技术可获取的收益如下：

- 1) 分支侧 LTU/ 断路器中的三相节点、光储充接入单元可充分发挥 MIMO 的性能，作为网络的代理节点实现对全网性能的提升。
- 2) 随低压台区管理精细化进程推进，箱级集中管理设备，如导轨表或量测开关等三相通信的节点将显著拓展 PLC-MIMO 技术的覆盖范围。

4.1.2.4 需要付出的代价

相较于 SISO 通信，PLC-MIMO 需额外增加 2 路收发通道及两路耦合电路模组，功耗增加约 150mW ~ 200mW，符合双模标准对三相表本地单元(500mW)及集中器本地单元(800mW)的静态功耗余量要求。此外，在芯片硬件方面，由于增加收发通路及相应的滤波器，硬件成本可能增加 30% 左右。

4.1.3 Bit-loading 技术

4.1.3.1 技术概述

如何在复杂信道环境下实现高效可靠的信息传输，是新一代载波技术的核心挑战之一。当前载波通信系统采用固定调制与编码策略，其设计基于对信道质量的“最坏情况假设”，即在所有子信道上采用统一的保守调制阶数以确保可靠性。然而，实际信道特性（如多径衰落、噪声干扰、频率选择性衰减等）具有显著的时变性与空间差异性。在正交频分复用（OFDM）系统中，不同子载波可能因频率选择性衰落呈现明显的信噪比（SNR）差异。若采用固定调制，高质量子信道会因为使用低阶调制浪费频谱资源，而低质量的子信道会因为使用高阶调制引发高误码率，导致系统整体性能受限。固定调制方式和动态比特加载方式的信道资源利用对比如下图所示。

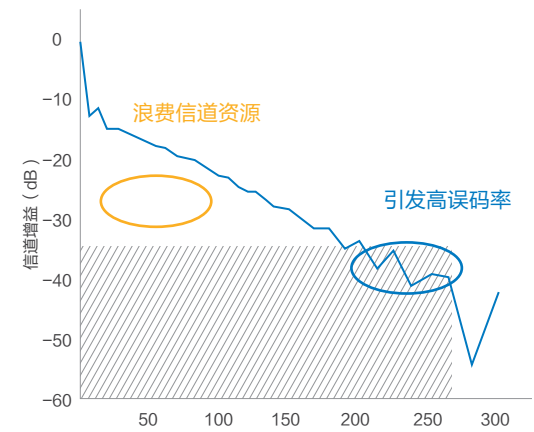


图 4-11 固定调制方式的信道收益分析示意图

香农定理指出，信道容量与带宽和 SNR 的对数成正比，但实际系统需通过离散化的调制阶数逼近这一极限。动态比特加载技术（Bit Loading）应运而生，其核心是通过动态分配各子信道的调制阶数、功率甚至编码速率，使系统总传输速率逼近香农容量。

4.1.3.2 实现方案

在动态比特加载的方案中，发送方在发送数据之前需要得到各子载波的信道条件，方式为接收方对信道条件进行测量估计，然后将信道状态信息（CSI）返回给发送方。发送方得到反馈信道反馈回的 CSI 来对子载波进行比特分配，并将数据信息映射到对应的调制星座点上，再执行串并转换、IFFT 调制等等程序，同时各个子载波的调制方案也一起发送给接收方。接收方先对前面一些操作进行对应逆操作，即 FFT 解调、并串转换等，然后依据子载波调制方案解调子载波，获取数据信息并进行信道估计，并把得到的 CSI 经由反馈信道返回到发送方。采用比特加载技术的 OFDM 系统流程如图 4-13 所示。

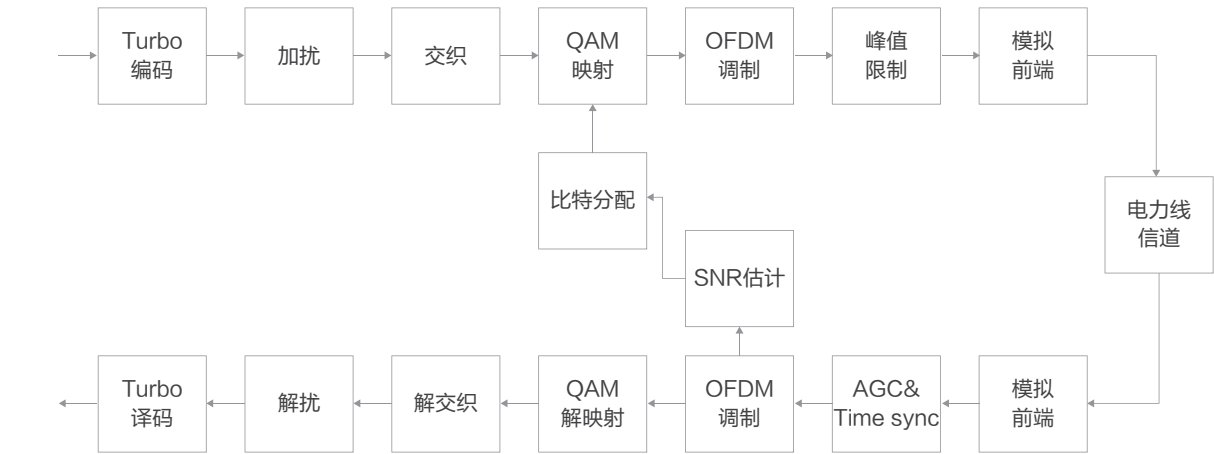


图 4-13 采用比特加载技术的 OFDM 系统流程图

动态比特加载技术指根据信道质量给不同的子载波分配不同数量的信息比特，使各子载波自适应选择调制方案以提高信道利用率，达到最优系统性能。比特分配策略直接关联系统优化准则，其优化目标通常包括两个维度：一是服务质量（Quality of Service, QoS），即系统能够最大限度提供的服务，通常表征为误比特率与信息传输速率；二是服务代价（Cost of Service, CoS），即系统为了提供服务而所需要耗费的资源，通常表征为信号功率。几种常见的比特加载算法的性能分析如表 4-4 所示。

表 4-4 不同比特加载算法的性能分析

算法	优化准则(RA)	优化准则 (MA)	优点	缺点
Water-filling	√	—	运算复杂度小	不能得到整数比特分配，需要离散比特时不能取得最佳方案
Hughes-Hartogs	—	√	离散比特分配的最优方法	每一个比特的分配都需要对所有的子载波进行搜索，运算复杂度高
Fischer-Huber	—	√	复杂度适中	需要提前知道最初的速率分配
Chow	√	—	复杂度适中	自身算法限制，优化余地有限；BER 较高时，准确度下降

4.1.3.3 带来的效益

动态比特加载技术根据实时信道条件动态调整子载波的比特分配，可带来以下收益：

(1) 提升频谱效率

通过为不同子载波分配最佳比特数（如高信噪比子载波采用高阶调制），最大化每个符号传输的比特数，在高信噪比条件下，可以显著提高整体传输速率 2 ~ 3 倍。

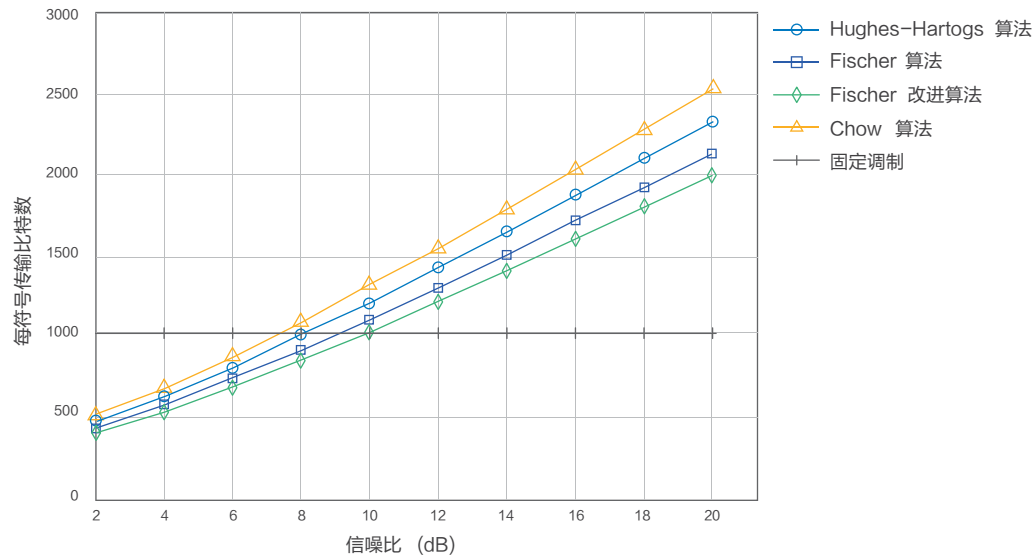


图 4-14 不同信噪比下不同的算法每个符号承载比特数分析

(2) 优化通信质量

在保证误比特率的前提下，动态加载策略能适应信道变化，降低误码率，确保服务质量。不同信噪比下各方法的误比特率见图 4-15。

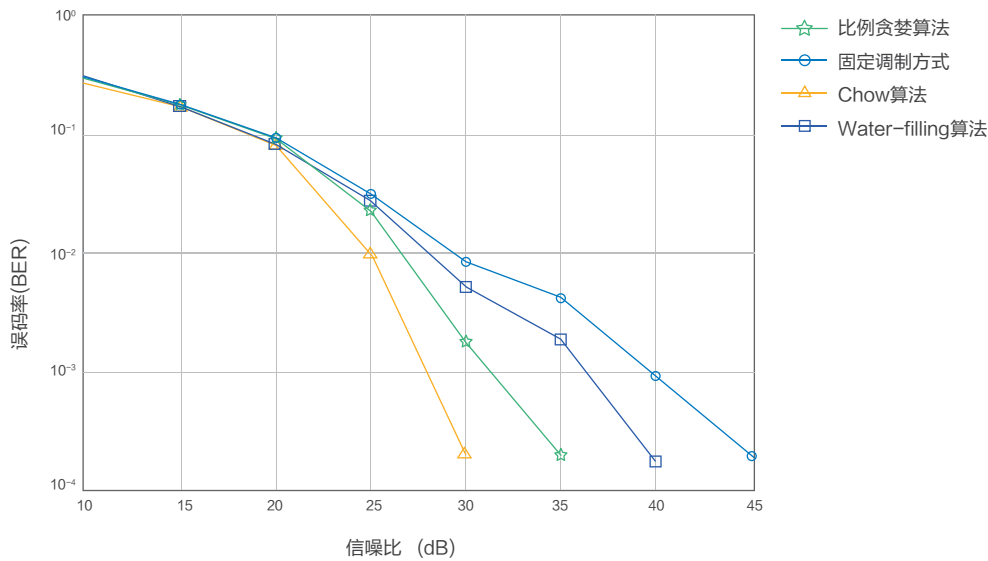


图 4-15 不同信噪比下各方法的误比特率

(3) 增强系统灵活性与适应性

动态调整机制使系统能应对信道时变性和噪声干扰，提升鲁棒性，同时支持多调制方式切换。

4.1.3.4 需要付出的代价

动态比特加载技术在提升通信系统性能的同时，需要考虑以下限制因素和代价：

(1) 信道信息反馈延迟

动态比特加载技术需实时回传信道状态信息（CSI），占用额外带宽资源，尤其在多用户场景下可能加剧资源竞争。

(2) 时变信道导致估计误差

信道时变性和反馈延迟可能导致 CSI 信息过时或失真，降低动态分配的准确性，甚至恶化系统性能。

(3) 信道条件依赖性

在低信噪比（SNR）场景下，动态比特加载分配的增益有限，难以适应极端恶劣环境。

4.1.4 物理层帧格式优化

4.1.4.1 技术概述

物理层帧结构由前导（Preamble）、帧控制（PFH）、帧载荷数据三部分组成。在现有宽带载波标准中，前导为 13 个 OFDM 符号，主要用于同步和信道估计；在频段 1 和频段 2 下，帧控制采用 12 个 OFDM 符号长度，主要用于指示载荷的物理层参数。

以工作于 0.78~2.93MHz 的频段 2 为例，preamble 前导为 13 个 OFDM（10.5SYNCP+2.5SYNCM），对应 532us，帧控制为 12 个 OFDM，对应 711us，两者加起来占用开销约 1243us。

表 4-5 是各个主要扩展高速模式在频段 2 情况下，前导和帧控制占完整帧长的比例分析。

表 4-5 导和帧控制占比开销特性

扩展模式编号	物理块（字节）	分集次数	调制方式	码率	帧长 1 块（ms）	帧长 2 块（ms）	帧长 3 块（ms）	帧长 4 块（ms）
1	520	1	16QAM	16/18	1.98(63%)	2.70(46%)	3.42(36%)	4.14(30%)
2	520	2	16QAM	16/18	2.65(47%)	4.04(31%)	5.43(23%)	6.82(18%)
3	520	1	16QAM	1/2	2.5(50%)	3.73(33%)	4.96(25%)	6.20(20%)
6	520	1	QPSK	1/2	3.68(33%)	6.102(20%)	8.52(14.5%)	10.94(11%)

从上表可以看出，前导和帧控制在部分高速模式下占比最高约 63%，而大部分在 20% 以上，在高速通信模式下前导和帧控制的开销过于沉重，限制了数据传输速率的提升。

因此，高效帧结构优化设计，对提升实际系统的数据传输速率有很大的帮助。

4.1.4.2 实现方案

物理层帧格式优化，主要涉及自适应前导长度设计、TMI 简化设计及帧间隔优化等。

自适应前导长度设计和传输模式相结合，系统设计两种传输模式：鲁棒传输模式和高速传输模式。前导长度可以根据传输模式选择。鲁棒传输模式保持现有的前导长度，而在高速模式下减少 3 个前导符号，在对通信性能影响不大的基础上，提升高速模式的传输效率。

帧间隔优化主要针对竞争帧间隔（CIFS）、突发帧间隔（BIFS）、回应帧间隔（RIFS）进行设计，通过将帧间隔从 400us~2300us 进一步调整至 300us~1000us，大幅降低帧间隔开销，提升整体系统的传输效率。

4.1.4.3 带来的效益

通过前导长度自适应设计，在高速传输模式下，实现了前导长度设计优化，降低前导的开销提升传输速率。帧间隔减小可以提升传输效率。

4.1.4.4 需要付出的代价

在高速模式下，由于降低了前导符号个数，导致定时同步和信道估计性能损失约 0.5dB。帧间隔优化需要芯片进一步加快处理能力，压缩译码时间，提升响应速度，提升芯片成本。

4.1.5 OFDMA 技术

4.1.5.1 技术概述

电力线信道有很强的频率选择性，图 4-16 为一组实测集中器 CCO 模块与电表 STA 模块间的信道频率响应数据，其高低频点衰减最大差异大于 50dB，表明对于某一通信链路，由于子载波衰减差异很大，无法完全利用 0.7 ~ 12MHz 全频段，存在频谱浪费现象。

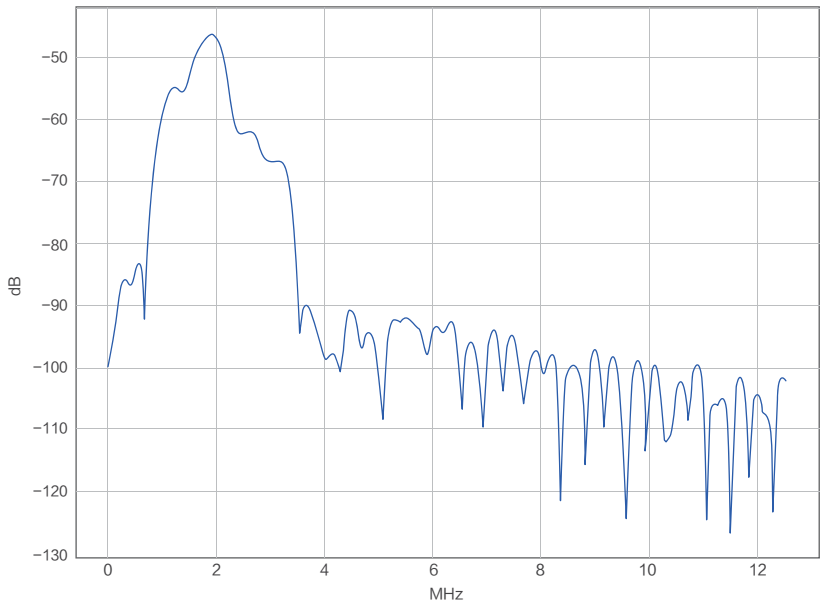


图 4-16 CCO 与某间的信道频率响应实测数据图

此外，当前载波通信技术采用 CSMA/CA 机制协调多通信节点在共享信道资源时的冲突问题。但低压台区载波网络的节点数量通常从几十个到几百个不等，规模大的网络甚至接近一千个节点，导致冲突和退避频繁，降低了信道资源利用率。

OFDMA 是一种多用户多址接入技术，核心在于将整个频段划分为若干子频段，通过频域资源精细化调度实现多用户高效并发传输，从而显著提升通信系统的频谱效率、降低延迟并增强多业务支持能力。

4.1.5.2 实现方案

(1) 多用户之间灵活分配频谱资源

低压台区中不同站点处的网络噪声和信道衰减呈现多样化。以图 4-17 为例，假设站点 0 要和站点 1 ~ 站点 4 通信，但受到噪声的影响，站点 0 和站点 1 ~ 站点 4 之间都存在某些频段不可用的情况。通过引入 OFDMA 机制，结合频段精益规划扩展和网络分层管理，通过调度实现站点 1、2、3、4 分别在 A、B、C、D 频段上同时发送，相较仅使用频段 A 极大提升了频谱资源利用率，减少帧间隔时间。

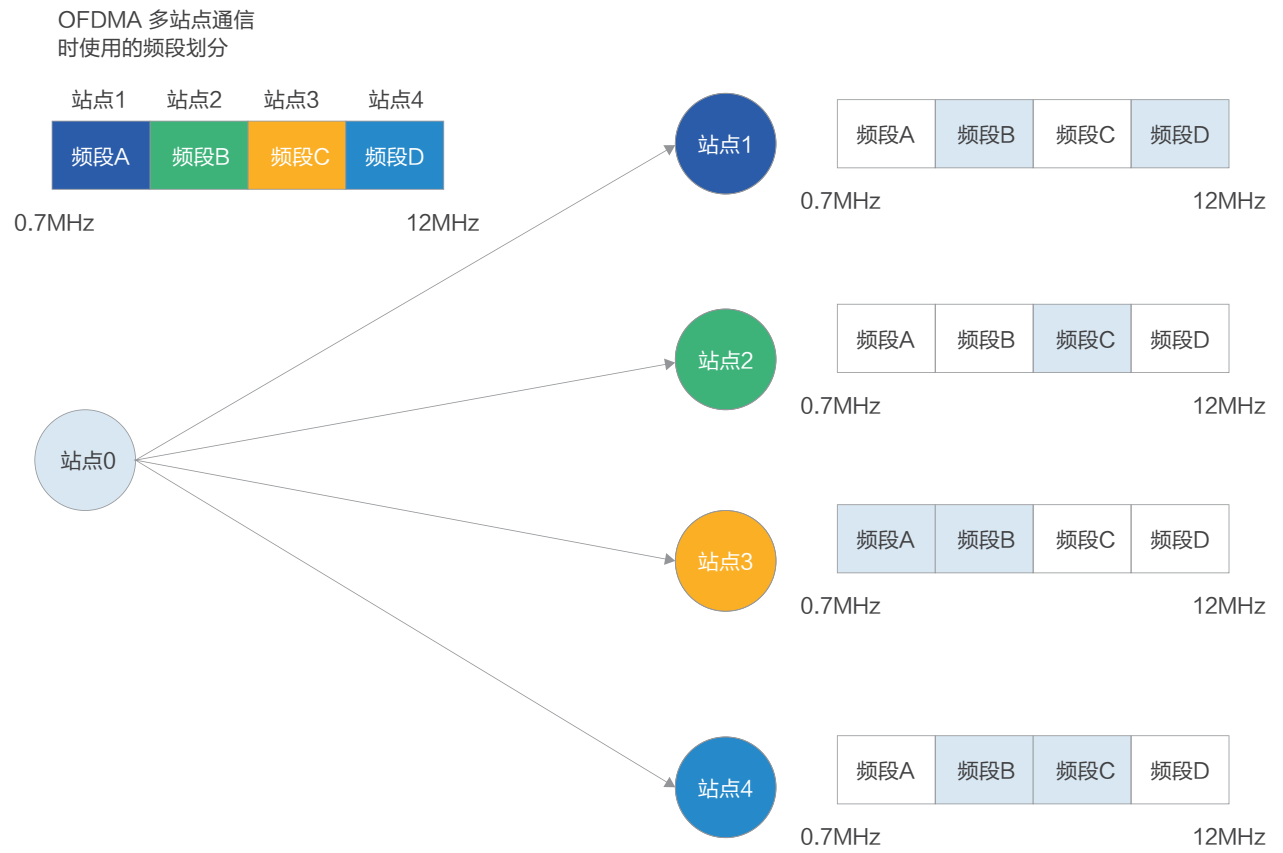


图 4-17 多站点间 OFDMA 机制的载波分配示意图

(2) 多用户并发，减少信道抢占次数

如下图所示，CCO 要与 4 个 STA 节点进行通信，普通报文发送机制为串行（竞争）发送，要发送 4 个业务帧（SOF1 ~ SOF4）和 4 个返回确认帧（SACK1 ~ SACK4）共 8 个报文。OFDMA 通过将整个频段（如 2.3MHz）划分成 4 个均匀的子频段（0.57MHz），CCO 在这 4 个子频段上同时向 4 个 STA 站点发送 4 个报文，4 个站点收到起始报文后在 4 个子频段上同时回复返回确认报文。相对于串行发送方式，OFDMA 机制下，每条报文由于带宽减为 1/4，长度变为 4 倍，报文有效传输时间不变，但交互次数由 8 次减少到了 2 次，可以节省发送前抢占信道的 3 次退避耗时、6 个帧间隔耗时和 6 个帧头耗时，约 27.2ms，极大的提高了信道利用率。

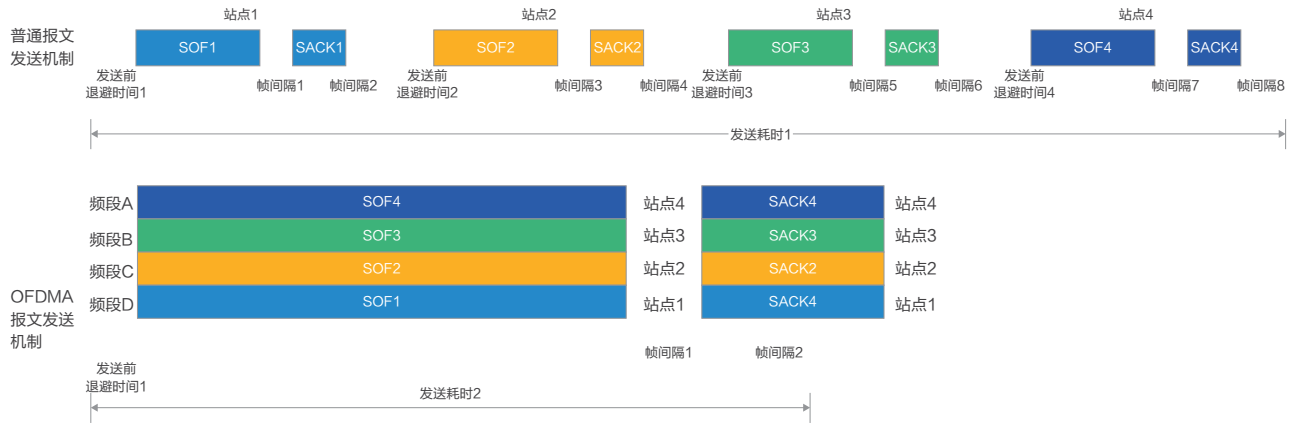


图 4-18 串行发送和 OFDMA 并行发送示意图

在使用 OFDMA 功能进行通信时，通过 CCO/PCO 调度给不同的 STA 节点分配不同的资源单位 (资源单位，Resource Unit，RU) 进行下行或上行数据的并发传输，减小帧间隔和帧头开销，降低对物理层资源的占用。其中多用户下行数据帧由 CCO/PCO 直接发送，多用户上行数据帧由 CCO/PCO 先发送 Trigger 帧触发，指示对应 STA 节点按照分配的 RU 模式发送上行数据帧。为减少实现复杂度，建议 OFDMA 帧内支持 2~4 个用户。

下行通信 OFDMA 的帧结构示意图如图 4-19：

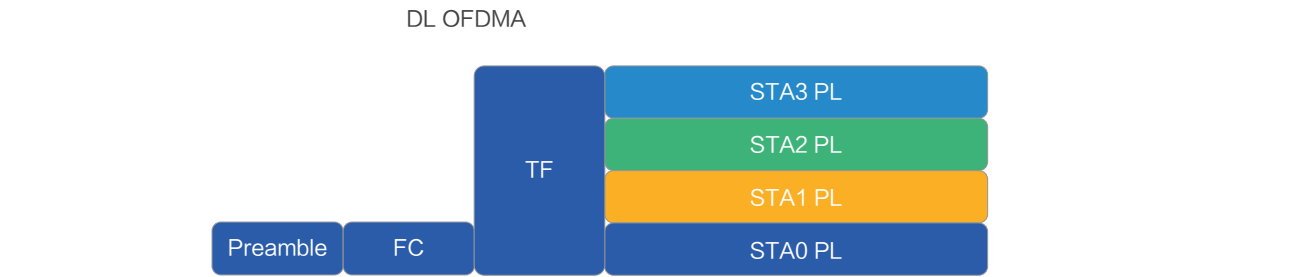


图 4-19 下行通信 OFDMA 的帧结构示意图

上行通信 OFDMA 的帧结构示意图如图 4-20：

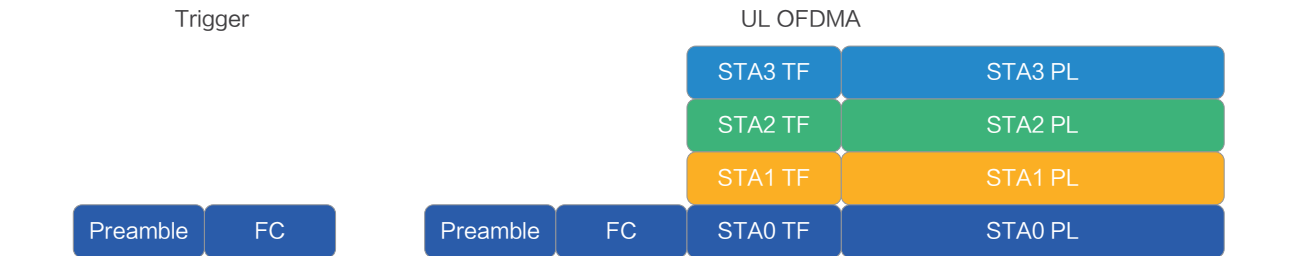


图 4-20 上行通信 OFDMA 的帧结构示意图

4.1.5.3 带来的效益

(1) 多用户之间灵活分配频谱资源

通过对多用户可用频段资源在 0.7~12MHz 频段的充分调度，相对于全台区仅使用 0.7~3MHz 频段的方式，OFDMA 的通信速率可达传统模式的 3~4 倍。

对于上行 OFDMA 方式，通过 4 用户同时采用 OFDMA 传输相比 1 个用户的 1 发 1 收方式，在接收端多用户的前导和 FC 功率叠加，使 FC 解调性能提升约 3dB，在实际 PLC 网络中可通过消减部分隐藏站点来减少碰撞概率，提升网络的可靠性和通信效率。上行 OFDMA 性能的仿真分析如图 4-21：

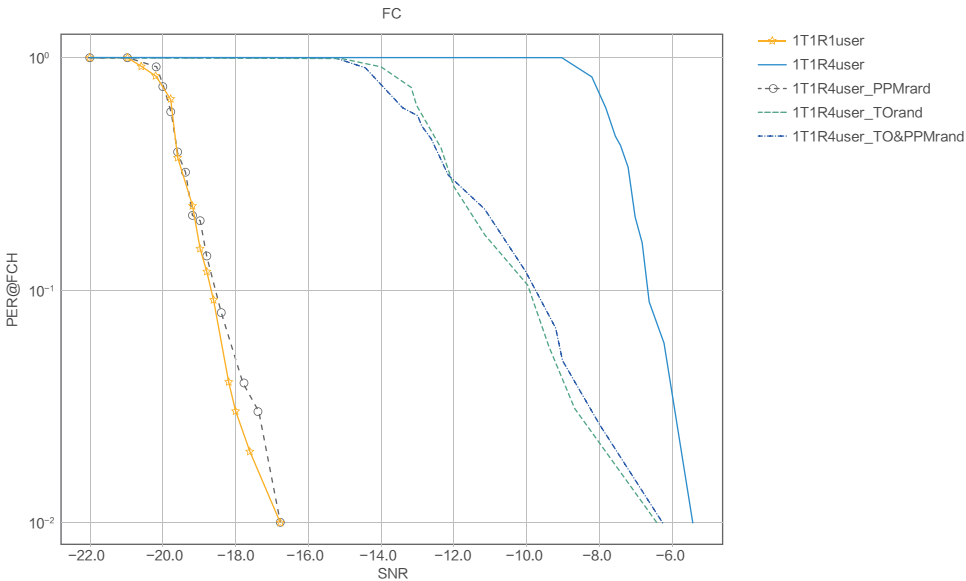


图 4-21 上行 OFDMA 的 FC 性能仿真

(2) 多用户并发，减少信道抢占次数

以 0.7~3MHz 频段为例，使用 OFDMA 方式并行发 4 帧报文的耗时收益能比使用传统方式串行发送 4 帧报文在时间上节省约 15.23%~55.74%，具体分析数据见表 4-6：

表 4-6 OFDMA 发送和串行发送的收益分析

模式 (TMI)	PB 块大小 / 字节	复制次数	调制方式	串行发送四次报文耗时 /ms	OFDMA 同时发送四个报文耗时 /ms	OFDMA 节省的时间 /ms	OFDMA 节省时间占比 /%
0	520	4	2	74.77	47.56	27.20	36.38
1	520	2	2	55.19	27.99	27.20	49.29
2	136	5	2	48.80	21.60	27.20	55.74
3	136	11	1	91.67	64.46	27.20	29.68
4	136	7	1	73.12	45.92	27.20	37.20
5	136	11	2	63.64	36.44	27.20	42.75
6	136	7	2	54.37	27.16	27.20	50.04
7	520	7	1	178.63	151.43	27.20	15.23
8	520	4	1	113.72	86.51	27.20	23.92
9	520	7	2	107.12	79.92	27.20	25.39
10	520	2	1	74.77	47.56	27.20	36.38

4.1.5.4 需要付出的代价

为使用 OFDMA 技术，需要增加各 STA 设备的 RU 可用性评估机制以及通过 trigger 帧触发多个站点同步进行 OFDMA 帧的发送。以上机制会相较于现有通信机制增加少许复杂度，但信道利用率明显提升，速率提升 4 倍，传统业务的多并发访问时间平均节省 30%，新型群管群调下行并发业务提升近 50%，同时对成本影响极小。

4.1.6 功率自适应控制

4.1.6.1 技术概述

功率控制 (Power Control)，即在通信过程中对发射信号进行功率的自动控制与管理。随着通信频段的划分、网络架构的优化，在通信网络中网络发送信号的功率静态设置的单跳最大覆盖在一些场景下不再是唯一追求的指标，而网络中末端节点的灵活接入对网络的最小化以及灵活性要求越来越高。如何结合新技术和新场景，设计更加智能、高效、安全的自适应功率控制机制是一个需要研究的技术方向。

4.1.6.2 实现方案

网络拓扑结构决定了信息的传输路径和节点间的交互方式。不同的网络拓扑（如星型、网状、树型等）对功率控制策略有不同的影响。网络中传输报文的业务类型以及网络负载不同，也可以采用相同的功率控制策略。比如在高负载情况下，网络需要更高的功率来确保通信质量。不同类型的业务或者报文对传输质量的要求不同，这也会影响功率控制策略的设计。

在网络中的同频段或者邻近频段的干扰等都会降低信号的接收质量，尤其是小规模网络，点对点链路覆盖范围要求较小，采用可满足本微型网络需求的发送功率即可。在设计功率控制策略时，需要充分考虑这些干扰因素，在实际通信系统中可以按照要发送的按物理信号以及物理信号的通信频段来区分各自的发射功率。

自适应功率控制的实现方案依据设计策略有所不同。比如可以在物理层和 MAC 层中添加针对接收信干噪比的估计、传输和处理功能，每个节点在发送业务数据之前，将以目的节点反馈报文中的接收信干噪比信息作为参考依据，然后对其发射功率进行自适应控制，使得源节点到目的节点的接收信号功率能够始终保持在接收灵敏度附近，从而降低功耗、减少干扰的目的。

自适应功率控制策略的协议的实现过程如下图所示，首先每个节点在接收到正确的报文后会进行信干噪比估计，并将所有一跳邻居节点到本地节点的接收信干噪比估计值，保证各节点在经过信令交互之后，都能够建立并维护一个到网络内所有节点的 SINR 信息表。当节点收集到所有的 SINR 信息后，会依次比较本地节点到其他节点的 SINR 估计值和预设门限，并按顺序调整本地节点对其他节点的业务消息发射功率。需要注意，针对广播消息的发射功率调整，需要先将 SINR 信息表中信道质量相对最差（即 SINR 估计值相对最小）的通信链路作为参考，然后将最差通信链路对应的 SINR 估计值与预设门限进行对比，最后调整本地节点的广播发射功率，从而保证网络中信道质量最差的通信链路也能达到系统的各项指标要求。

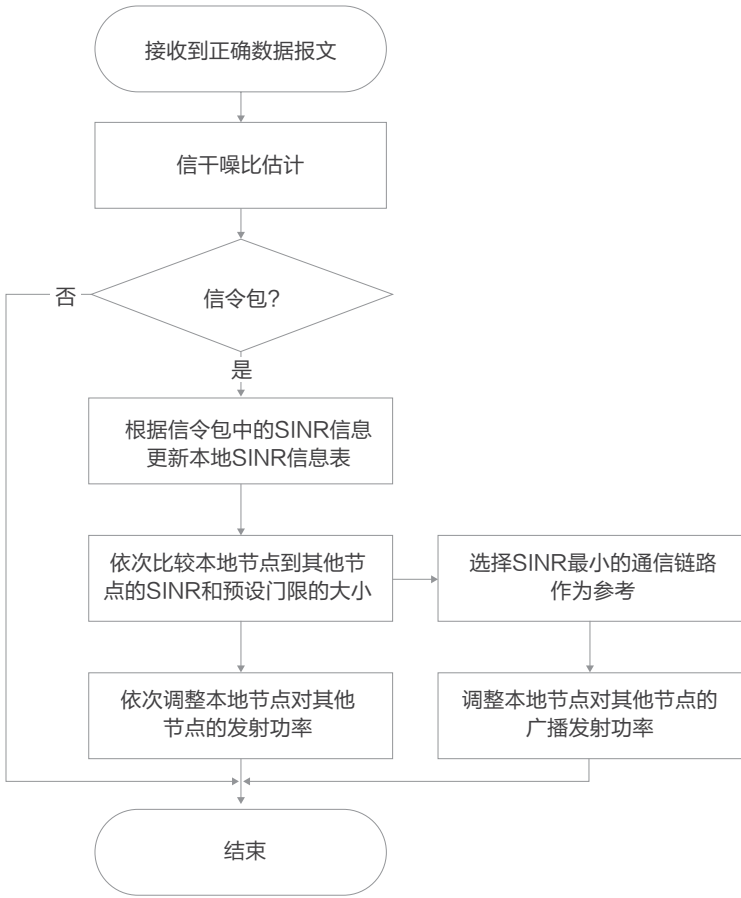


图 4-22 自适应功率控制流程示意图

4.1.6.3 带来的效益

功率控制机制对系统邻道干扰、同网络同频干扰、动态功耗以及系统中的远近效应等都会带来一定的改善。全网节点的发送动态功率可调策略，对动态功耗的降低、不同频段以及相同频段的信号的通信性能的影响能够带来一定的改善。

不同的负载情况下发送增益不同，整机功耗差异变化不同，网络节点采用动态功率控制机制，增益动态调整相对于全网节点只采用静态最大增益时发送功耗降低比例在预估约 6%，尤其是台区线路负载较重时，某些节点间通信信道较好无需采用最高增益发送时，降低发送功率时的功率消耗可降低约 48%。

4.1.6.4 需要付出的代价

网络节点功率自动控制策略需要结合不同链路的反馈结果进行动态评估与管理，会带来整体协议复杂度的增加；同时相邻节点要管理邻居节点功率信息，会带来网络管理负担的增加，对点对点通信链路的评估反馈结果准备度与实时性要求较高；由于电力线噪声干扰以及负载存在实时变化的特性，评估结果出现偏差反而会导致通信失败的情况出现，对自适应控制的评估策略也是一个挑战。同时由于设备要求发送功率能够自适应，要求节点具备配置不同功率的能力。

4.2 新一代网络

4.2.1 新型网络架构

4.2.1.1 技术概述

在为适配 MIMO 技术引入后低压台区三相 / 单相链路并存场景，新一代载波将采用“主干网 + 区域网”的新型网络架构。主干通路由三相节点构成，是网络的高速通路，传输汇聚后的信息流；区域通路由三相节点和单相节点组成，形成代理关系的上下层级关系，并由电表作为末梢节点向南向延伸，实现营销、配电及用户侧多类型海量设备广泛接入。这种网络布局，增强了网络区域属性和灵活性、扩展性和运行效率，从而构建一个高性能、高可靠性的网络架构，其架构如图 4-23 所示。

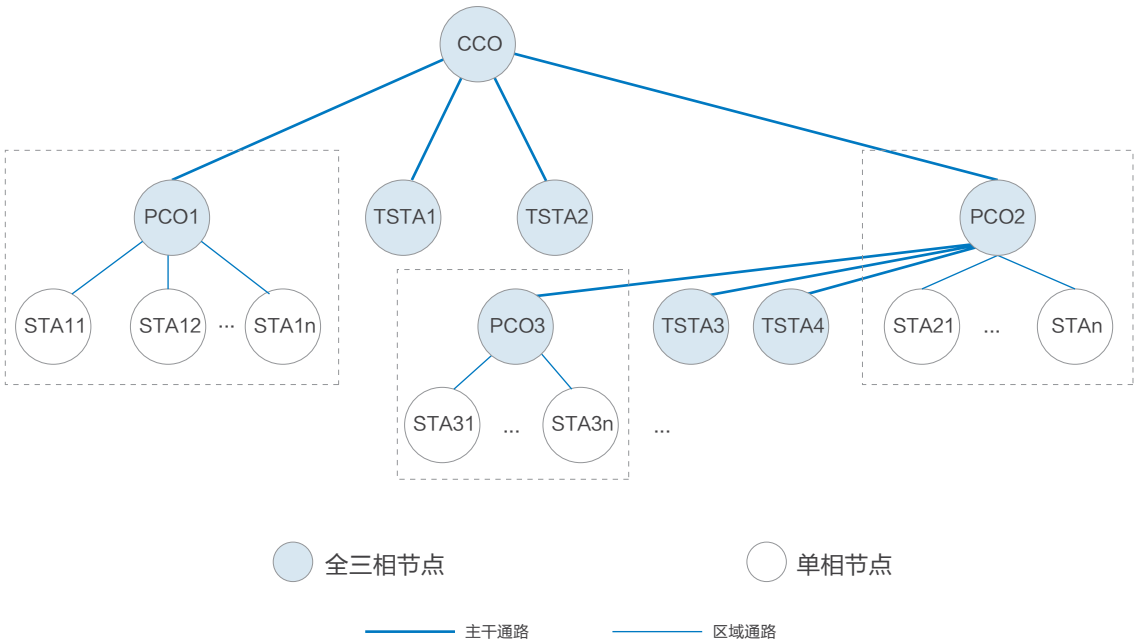


图 4-23 分层网络结构示意图

4.2.1.2 实现方案

（1）主干通路设计

主干通路在本架构中承担“高速公路系统”的职能，其核心功能是确保数据能够在全网范围内实现高效传输，其设计涵盖以下特性：

- 1) 高速通信传输：采用 Bit-Loading、MIMO 等高性能技术实现三相节点间高速吞吐，以处理大量的数据流量和实现快速的路由转发；
- 2) 智能路由决策：依据网络拓扑和路由协议，采用高效算法及路由表确定最优传输路径，保障高速高可靠传输；
- 3) 数据处理和过滤：骨干节点执行数据汇聚与过滤，优化网络性能与安全性，合理分配资源；

- 4) 数据传输策略控制：运用 OFDMA、TDMA 时隙分片及报文优先级等机制实现负载均衡与流量控制，确保紧急任务执行并优化资源利用；
- 5) 安全性和可靠性：需要具备高级的安全性和可靠性机制，以保护网络免受安全威胁和故障的影响；
- 6) 弹性扩展架构：应具备良好的可扩展性，能够适应网络规模的增长和变化。可以容纳更多的节点接入，以满足不断增长的数据流量和用户需求。

（2）区域通路设计

区域通路设计专注于本地通信，支持多样化的应用接入，涵盖微网设备、室内电器等多种终端设备，其设计涵盖以下特性：

- 1) 多并发性：各区域网络由不同分支 MIMO 节点管理，彼此互不干扰，支持多区域、多分支同时性并行通信，提升全网有效时隙利用率。
- 2) 灵活性：区域通路结构灵活，能够适应不同场景下的设备接入需求。
- 3) 多样性：支持多种设备类型和应用场景，包括微网控制、随器计量等电表后端设备的接入。
- 4) 稳定性：区域通路不需要复杂的逻辑和算法，确保运行稳定，减少故障发生的概率。
- 5) 高效性：区域通路速率可以采取多种技术融合，结合 PLC 高速 TMI 并有效利用 HRF 在本地网络高速的传输特性，实现数据的高速且高效传输，满足本地通信的需求。

4.2.1.3 带来的效益

通过“主干网 + 区域网”一体化网络架构设计，提升网络整体通信速率、可靠性和可拓展性，核心收益如下：

（1）扩大网络规模，支持南向多设备接入：解决当前通信网络机制下设备接入数量的限制，以及随着网络规模扩大导致的运行不稳定及高频数据采集成功率降低等问题，满足不同规模和数据采集的通信需求。

（2）提高通信速率和吞吐量：在当前分层网络架构下，主干节点具有较强的通信能力，子网节点专注于本地通信接入可以采用多种通信方式结合和高速率模式，大幅度提升网络通信速率。同时主干节点可以对数据进行汇集和过滤处理以及流量控制，优化网络资源利用，提升吞吐量。

（3）提升通信可靠性并降低时延：由于主干网络节点减少，路由周期可以缩短，链路维护开销减少，增加业务应用通信可用带宽。同时主干节点具备实现复杂的路由算法的能力，在路径失效的情况能够更快地计算出最优路径，提高路由的收敛速度，减少因路径失效导致通信失败，从而保证通信的低时延和高可靠性。另外由于主干网络节点数量减少，可大幅减少网络维护报文的开销，减少网络风暴，提升通信成功率，降低时延。

（4）减少维护，兼具稳定性和灵活性：当前分层结构按照功能划分，主干通路专注于提升通信速率和路由算法，确保网络的稳定性，子网设计保证设备灵活高效的接入。分层设计提升了系统的稳定性，满足各种设备的灵活接入，减少运维成本及人工参与。

4.2.1.4 需要付出的代价

新一代网络设计在实现高性能、稳定可靠的网络架构的同时，也对通信系统的开发和管理提出了更高的要求：

- 1) 对主干通路系统性能要求提升，同时通信系统能够实现复杂高效的路由算法并保证系统运行的稳定性，增加了装置的开发难度。
- 2) 为解决成本，需要区分主干通路三相模块和区域通路单相模块，分别进行资产管理和采购，现有流程已满足。而三相模块，当前是“非三相能力的模块”，全三相 MIMO 模块能力全面提升，成本稍有增加（ < 15% ），属于功能性能加量微加价。

4.2.2IP 组网技术

4.2.2.1 技术概述

为实现我国制定的双碳目标，新型电力系统需深度整合分布式能源、充电桩等新型负荷，计量数据正从单一计费功能向电网态势感知、用户能效管理、碳足迹追踪等增值服务延伸，这对计量通信网络的广域覆盖能力、动态响应速度提出了更高要求。传统非 IP 架构的计量通信网络存在协议碎片化、设备兼容性差、跨系统数据互通困难等问题，难以支撑源 - 网 - 荷 - 储协同控制，而 IP 化网络通过统一协议栈和开放架构，可实现“端 - 边 - 云”数据无缝贯通，支撑计量数据与环境感知、AI 运算、用户行为等多元数据融合分析，将会成为新型电力系统建设不可或缺的“神经网络”。

计量通信网络 IP 化是新一代信息通信技术发展的必然趋势，其核心在于将传统基于专有协议或非 IP 架构的计量通信系统逐步迁移至标准化、开放化的互联网 IP 协议架构。在 IP 协议架构中，不同的设备都使用标准的 TCP（UDP）/IP 协议进行数据传输，远程通信与本地通信将从 IP 层直接打通，如下图所示，从主站到端设备之间可以直接建立 IP 连接，智能网关只在网络层按 IP 协议进行路由转发，不用解析应用层协议，能够大大降低协议开销和系统开发的复杂度，不同制造商的设备能在同一个网络中相互通信，而无需定制协议转换器；同时，不同业务数据可分别连接各自的主站进行数据传输，实现低时延的广域资源调度，激活数据资产价值。

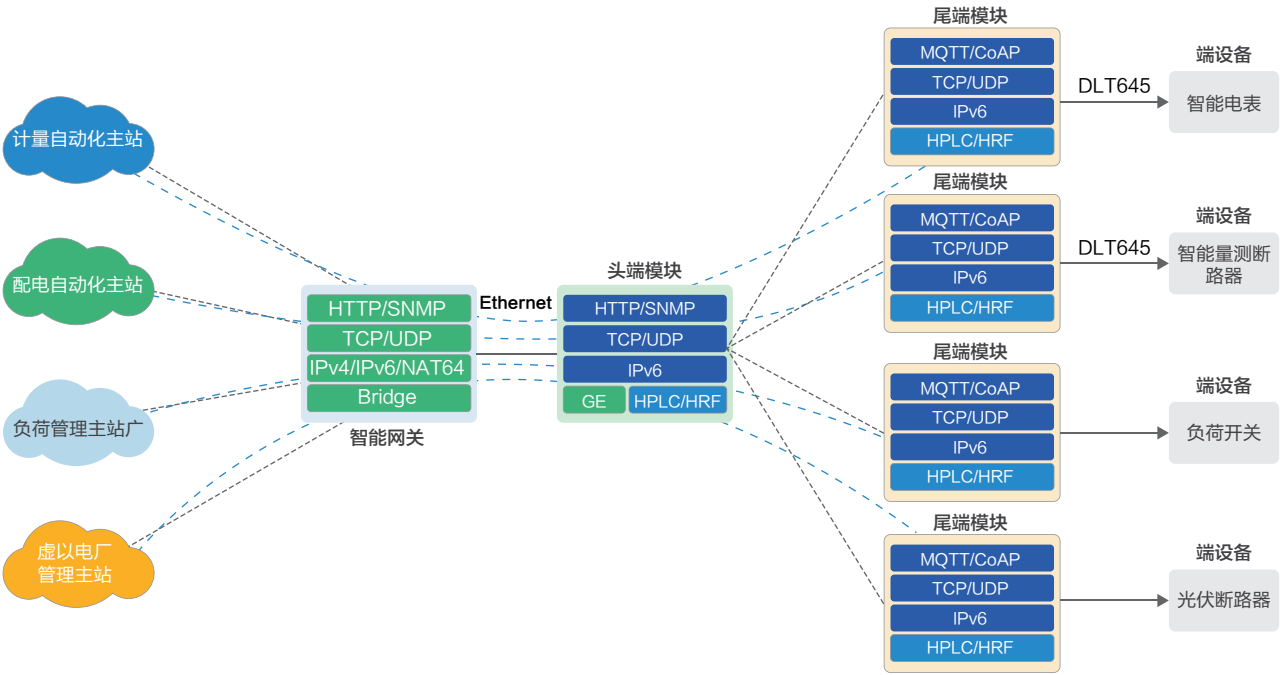


图 4-24 多主站系统 IP 化网络连接示意图

4.2.2.2 实现方案

IP 化计量通信网络涉及到主站与智能网关、智能网关与端设备等之间的通信。其通信系统架构如下图所示：

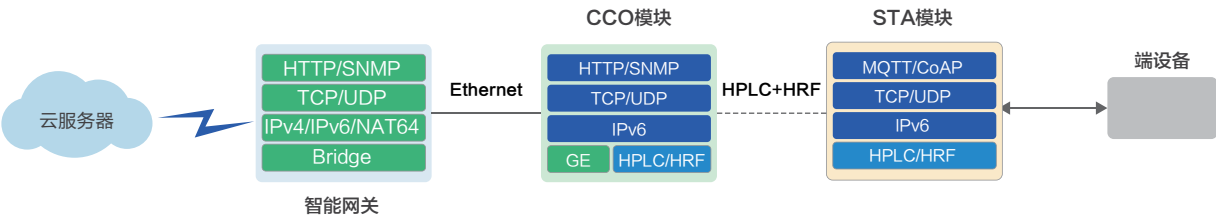


图 4-25 IP 化计量通信网络系统架构示意图

参考 OSI 七层模型，新一代 IP 化低压电力线宽带载波协议栈应包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层，协议栈架构如表 4-7 所示：

表 4-7 新一代 IP 化宽带载波协议栈架构

应用层	数据业务和管理服务
	CoAP（RFC7252）/ MQTT（PRF 20922）
传输层	UDP / TCP（RFC768 / RFC793）
网络层	IPv6（RFC2460）
	6LoWPAN（RFC6282）
数据链路层	新一代宽带载波协议数据链路层
物理层	新一代宽带载波协议物理层

新一代 IP 化低压电力线宽带载波网络层支持 IPv6（RFC 2460）协议，智能网关和所有端设备应支持 128 比特 IPv6 地址，该地址由 IPv6 前缀和接口 ID 组成。对于 IPv6 前缀，其在端设备入网过程中，通过网络层消息公告（RA）中获取。对于接口 ID，则可以通过 SLAAC（无状态地址自动配置）或 DHCPv6（动态主机配置协议）方式获得，其组网过程中的报文交互流程如图 4-26 所示：

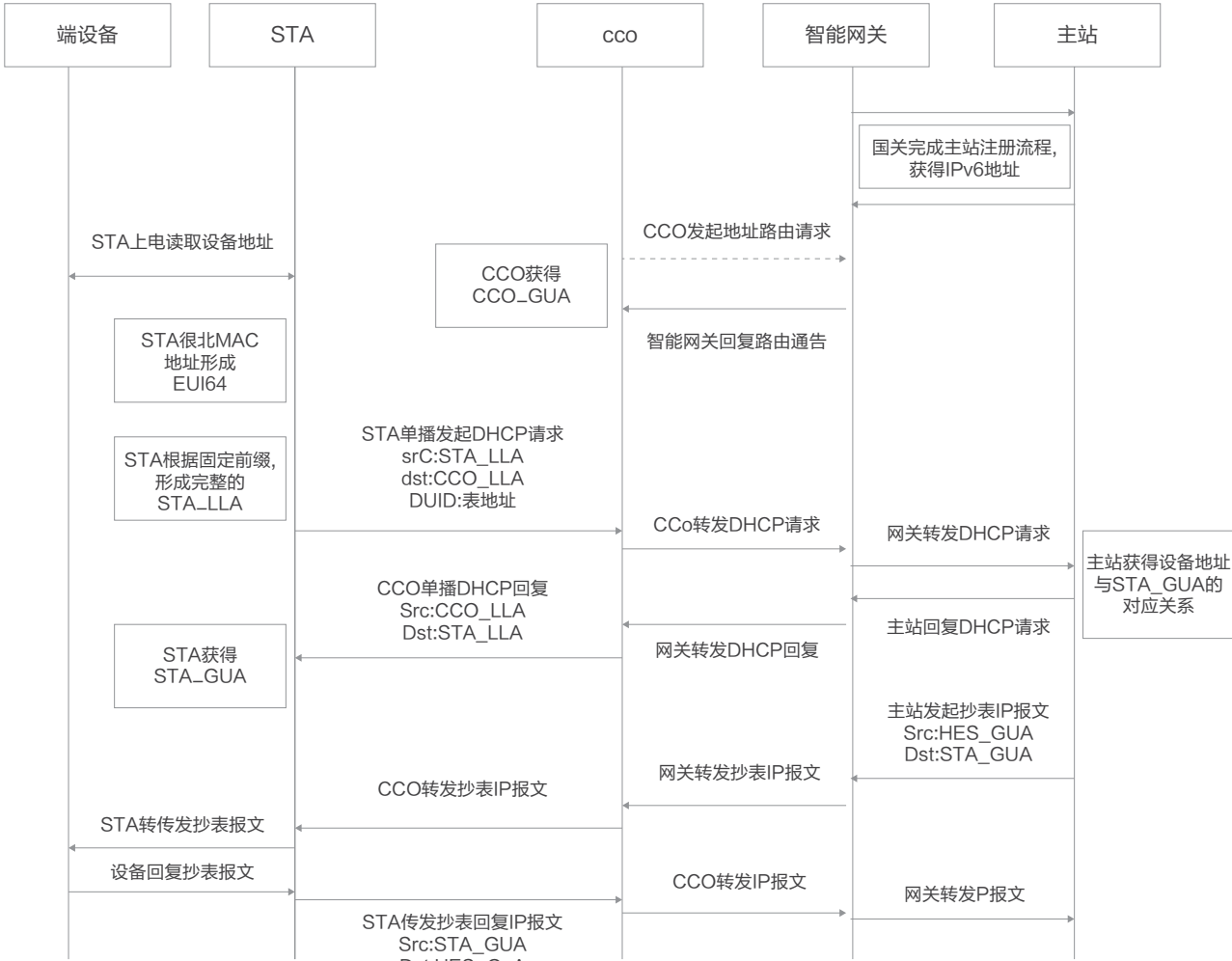


图 4-26 IPv6 宽带载波网络报文交互流程示意图

上述报文交互过程中，各类 IPv6 地址的生成规则和功能说明如表 4-8 所示：

表 4-8 IPv6 地址类型与功能说明

地址类仿型	前缀	生成规则	功能说明
链路本地地址（LLA）	FE80::/10	启动后自动生成	用于和直连设备通信，只支持 1 跳
全球单播地址（GUA）	2000::/3	可采用 SLAAC/DHCPv6 获得	类似 IPv4 的公网地址，全球唯一，可基于 IP 进行寻址和路由
节点组播地址	FF01::1 FF02::1	固定地址	IPv6 取消了广播的概念，代替为组播，规范报文传播的范围

由于 IPv6 的地址长度增加至 128bit，传统的 IPv6 数据包长度较大，增加了网络报文的实际开销。因此，新一代 IP 化低压电力线宽带载波网络层应采用 6LoWPAN（RFC 6282）提供的 IPHC 和 NHC 报头压缩技术，减少 IPv6 报头开销，增加带宽利用率；同时支持将 IPv6 长报文分成多片承载在宽带载波通信链路上，解决智能设备在资源受限网络中的报文适配难题。

为了应对多样化网络威胁、满足合规要求、维护用户信任，新一代低压电力线宽带载波技术还应增加基于 IP 的网络安全设计，支持基于数字证书的接入认证，为不可靠的传输层提供基于 DTLS 的安全通信协议，通过数据加密保证数据机密性，通过完整性校验保证数据防篡改，通过序列号校验防止重放冲击，增强链路安全性，防止网络攻击。

4.2.2.3 带来的效益

新一代 IP 化低压电力线宽带载波网络带来的效益包括：

- 1) 提升互联互通能力：通过统一的 IPv6 协议和 TCP（UDP）/IP 标准，消除不同厂商设备间的协议差异，解决因路由算法不一致导致的互联互通问题，实现跨厂商设备的即插即用
- 2) 扩展接入灵活性：光伏、储能、充电桩等电网外设备可直接通过 IP 化网络接入，无需定制协议转换器，直接通过 IP 地址实现设备间通信，增强电力网络的开放性和扩展性。
- 3) 优化系统集成与架构：每个设备拥有唯一 IP 地址，支持计量自动化、负荷管理、虚拟电厂等系统直接访问数据，不同业务数据（如计量、控制、监测）可通过独立 IP 连接直达主站，支持多系统多业务并行运行。
- 4) 增强网络安全防护：应用 DTLS 协议实现传输层加密与认证，结合 IPv6 的 IPSec 扩展，抵御窃听、篡改和重放攻击，保障数据机密性和完整性。

4.2.2.4 需要付出的代价

新一代 IP 化低压电力线宽带载波网络付出的代价包括：

- 1) 海量连接压力：光伏、储能、充电桩等新能源装备大量接入以及原本通过集中器汇聚的台区设备转为直连主站，使得主站负载激增，需要处理海量并发连接（如百万级终端），对服务器性能、带宽和负载均衡能力提出极高要求。
- 2) 报文开销增加：IPv6 基本报头（40 字节）+ 传输层报头（UDP 8 字节 /TCP 20 字节）增加冗余开销，即使通过 6LoWPAN 压缩（IPv6 头部压缩至 4~12 字节），仍会占用链路的有效载荷。
- 3) 带宽与承载压力：IP 化后，计量、控制、光伏等多系统数据共享网络，易引发带宽拥塞，需升级本地通信网络带宽与数据承载能力。

4.2.3 网络 QoS 技术

4.2.3.1 技术概述

网络 QoS（Quality of Service，服务质量）是一种网络管理技术，用于确保网络能够为不同的应用和服务提供合适的服务质量。它旨在通过优化网络资源的分配，保证关键应用的性能，减少延迟、丢包和抖动等问题，从而提升整体的网络体验和效率。

4.2.3.2 实现方案

网络 Qos 的可用方案主要包括以下几种：

- (1) 基于业务特征的流分类技术

依托于新一代网络协议中更精细的动态时隙分配，为不同业务提供更精细的网络带宽服务，根据业务优先级，对高优先级业务动态分配独占的网络时隙或分配更有效的网络资源。

(2) 依托设备边缘计算能力的流量监管和整形技术

依托新一代设备的边缘计算能力，在流分类技术的基础上，对进入或流出设备的特定业务流量进行监管和整形。当流量超出设定值时，采取控制或限制，以保护网络资源不受损害。同时通过设备的报文聚合功能，将不同源站点、相同目的站点的业务报文进行汇聚，时隙业务层面的流量整形，以降低业务报文的网络流量。

(3) 依托设备边缘计算能力的网络拥塞感知、管理和避免技术

新一代设备将拥有对网络通信环境的感知能力，根据当前网络状态，合理制定资源的调度策略，决定报文的转发处理次序。监督网络资源的使用情况，当发现拥塞有加剧的趋势时，采取主动丢弃报文的策略，通过调整队列长度来解除网络的过载。同时，在计算能力充足的情况下，还可以根据历史信息和未来情况的推算，预判网络的拥塞可能性，采取主动丢弃或报文聚合的策略，提前避免网络拥塞的发生。

4.2.3.3 带来的效益

网络 Qos 的作用总结如下：

- 1) 保障关键应用：在网络资源有限的情况下，QoS 能够根据应用的需求，为不同的数据流分配不同的优先级和带宽，确保关键应用的数据包在网络拥塞时仍然能够得到及时传输。
- 2) 优化网络资源：通过合理分配带宽和优先级，QoS 能够避免网络资源被少数大流量应用占用，提高整体网络的利用率。
- 3) 提升用户体验：QoS 能够确保用户在访问网络时获得稳定、快速的服务，提升用户的满意度

在新一代网络中，网络协议将充分发挥新一代物理层技术的灵活性和可靠性优势，将自适应算法与智能化管理紧密结合，共同推动网络资源的优化分配，提高关键应用的性能，减少延迟、丢包和抖动等问题，从而提升整体的网络体验和效率。

4.2.3.4 需要付出的代价

网络 QoS 通信设备具备一定的调度、缓存能力，同时在实现策略上有一定的复杂度。

4.2.4 统一网管技术

4.2.4.1 技术概述

统一网管技术旨在通过集成多种功能模块，实现对新一代载波网络的全面监控、管理和优化。该技术涵盖了通信模块的档案管理、链路监测、告警分析、故障诊断、通信质量调优、网络安全增强、可视化展示等多个方面，旨在提升网络的可靠性、稳定性和运维效率。通过统一的管理平台，运维人员可以实时监控网络状态，快速定位和解决故障，优化通信参数，并生成详细的统计报告，为网络优化和升级提供数据支持。

4.2.4.2 实现方案

统一网管技术通过以下四大核心能力构建闭环管理平台：

一是统一接入层能力。深度对接营销系统获取终端档案，兼容无线公网、宽带载波等异构设备，建立全量台账管理；通过多协议扩展（如 MQTT 物联网协议、Kafka 告警工单协议）实现跨系统数据采集与传输。

二是智能运维中台能力。实现全链路监测，实时追踪远程通信（SIM 卡状态 / 流量）与本地通信（拓扑层级 / 信道质量）性能，支持历史趋势分析；自动化闭环，从告警阈值配置→智能工单派发→故障画像建模（多指标关联分析）→远程调优（频段 / 功率 / 复位）形成自愈能力；支持高安全防护，实时检测异常设备并自动隔离，强化 VPN/ 防火墙策略；支持设备近端运维，提供能安装在移动终端上的统一网管 APP，统一网管 APP 支持通过近端连接到现场设备，认证通过后支持在统一网管 APP 上对设备进行运维操作，包括重启模组、调节模组发射功率、调节工作频段，操作结果支持自动同步至云端统一网管平台，支持在统一网管 APP 上查看模组运行日志，方便快速查看模组运行状态和定位问题。

三是可视化与决策支持能力。支持动态渲染拓扑全景图，模拟台区运行状态，实时生成模块参数可视化图表；支持智能报表生成，提供基于大模型和知识图谱技术的智能问数引擎，使运维人员可通过自然语言对话的方式生成台账统计报表、故障统计报表和运行报告，并能根据问答内容生成对应的折线图、柱状图、热力图等可视化报表，帮助管理员快速了解网络运行状况和性能表现，生成的各类报表支持导出；支持故障诊断分析，提供详细的故障诊断逻辑和整改意见，涵盖模块类、通信类等多种故障类型，帮助运维人员快速定位和解决问题；支持基于行业知识库微调参数的自建大模型，驱动云侧 Agent 对设备状态数据的定期自动巡检，筛选重点设备，操控端侧 Agent 在设备系统内执行深度自检流程，生成详细报告，在预设条件范围内进行自主修复，在一定程度上实现端云一体的 AI 自治。

四是弹性扩展能力。协议可扩展（兼容计量终端规约演进），存储 / 算力按需扩展以应对海量数据分析需求。

最终目标为以可控代价换取电网“被动响应→主动预防”的运维范式革新，达成可靠性提升与全生命周期成本最优解。

4.2.4.3 带来的效益

统一网管技术通过集成多种功能模块，实现了对低压配电网通信网络的全面监控和管理。该技术不仅提升了网络的可靠性和稳定性，还通过可视化展示和统计分析功能，为运维人员提供了强大的工具支持，帮助其快速定位和解决故障，优化网络性能，减少运维成本。

4.2.4.4 需要付出的代价

统一网管技术在技术整合（兼容性 / 安全）、设备更替、运维协同（多部门联动）层面需承担初期投入。

上述代价可通过规模化效应降低模块采购成本、主动运维转型减少故障损失及管理效率跃升实现长期成本优化。

4.3 新一代应用

4.3.1 电鸿操作系统多业务承载

在新型电力系统加速转型背景下，南方电网新一代载波确立了“以通信承载为基础、多业务主体服务延伸”的战略定位。其服务范围伸至调度（光伏、充电桩调控）、规划（配变容量计算）、输配电（拓扑辨识、三相不平衡监测）、市场营销（用电信息采集、市场交易）、新兴业务（虚拟电厂调度）等多部门业务链条。

面向多部门业务定制化开发需求，新一代载波设备深度融合南网“电鸿”物联操作系统，构建“统一操作系统 + 模块化功能 APP”的开放生态。电鸿（PHIOS，PowerHarmony IoT Operating System）操作系统是南方电网于2023年10月联合开放原子开源基金会发布的国内首个电力物联操作系统，基于OpenHarmony和OpenEuler技术底座、面向电力物联网设备深度定制，具备“统一架构、分层适配”的核心特征，提供硬件抽象描述、底层驱动程序管理和程序间的消息传递等功能，具备高实时性、高资源使用效率、快速连接、高效数据处理和高安全可靠等特点。电鸿物联操作系统的分层架构见表4-9、技术价格见图4-27。

表 4-9 电鸿物联操作系统的分层架构

分层架构	分层架构描述
硬件层	操作系统运行所依赖的硬件，支持各载波通信厂商的核心芯片。
内核层	包括内核与驱动两部分，提供操作系统的基础能力，实现硬件资源管理，以系统调用的方式对上层服务与应用提供能力支持。
系统服务层	基于操作系统内核提供的能力所实现的多种服务能力，包括多种系统库、运行时、GUI、AI、分布式。向上提供服务 API 接口支撑各种应用的运行。
应用层	使用操作系统提供的系统服务构建的各种应用，根据多业务部门需求，提供业务处理支撑能力。

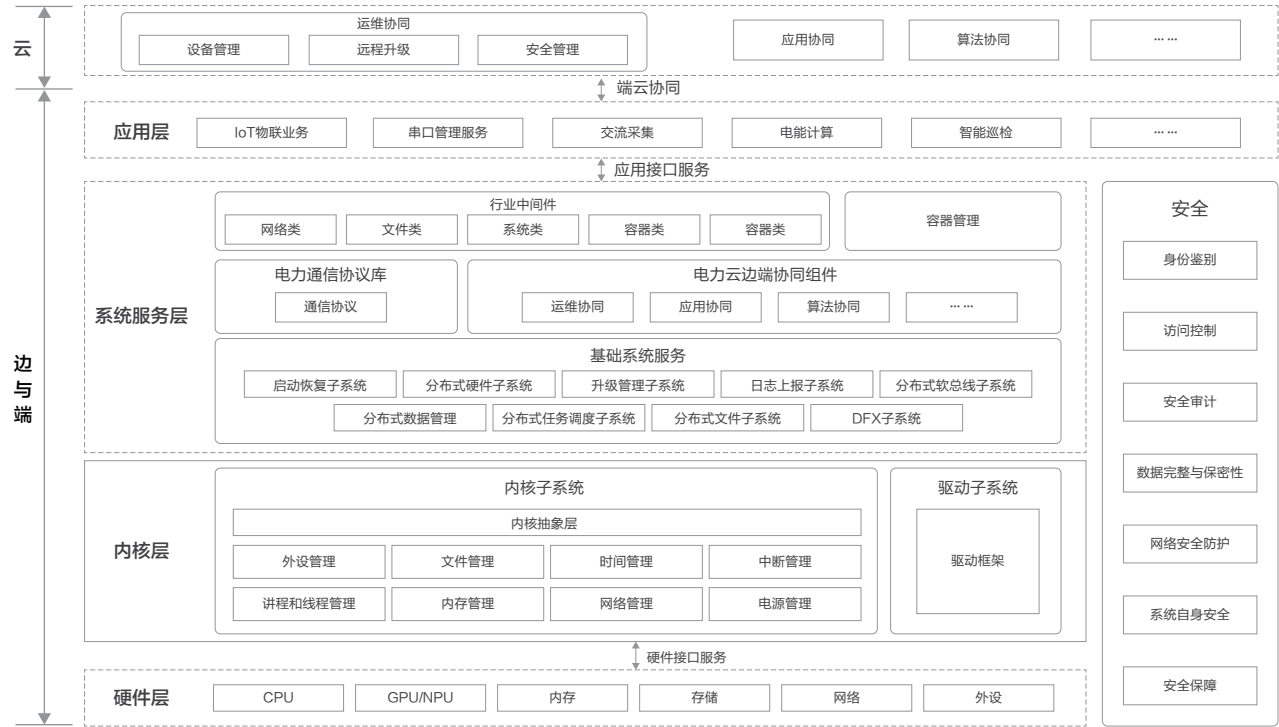


图 4-27 电鸿物联操作系统技术架构

4.3.2 通感算一体化技术应用

在电力系统数字化转型过程中，AI技术已深度渗透至电力生产各环节。根据任务响应速度可以分为非实时性应用（分钟级以上响应）和实时性应用（秒级响应）。非实时性应用主要指全局性复杂分析，需要依托主站云端强大的算力对采集的海量数据进行分析 and 挖掘，例如台区运行状态分析、线损异常分析、新能源功率趋势预测、用户画像及行为分析等。实时性应用则需在秒级甚至毫秒级完成闭环控制，任务处理逻辑相对简单，包括本地通信网络优化、设备即插即用认证、光伏等新能源调控、空调等负荷自动需求响应等。

为支撑上述智能化场景，新一代载波突破传统通信边界，向“通感算”一体化方向演进，这既是通信技术的发展趋势，也是电力系统需求变化的结果。在新一代载波技术在数据传输能力大幅提升的基础上，持续推进通信能力、AI服务、业务应用的多层面融合，为多业务部门提供通信、感知、计算（AI）一体化服务，实现了算力在低压配电网“最后一公里”的广泛部署，“有电就有网，有网就有算”。

技术落地层面，通感算一体化架构采用“云端集中式大模型 + 本地分布式小模型”协同架构实现智能分层部署，如图4-28所示。云侧，主站部署算力强劲的AI大模型，借由新一代通信网络传输能力，提供海量的训练样本，满足复杂任务计算需求。端侧，本地通信设备中部署轻量化AI小模型，满足低压台区内实时性应用需求。边缘侧，智能终端处于二者之间作为智能枢纽，承担数据中继及预处理、任务分发、设备管理等职能。

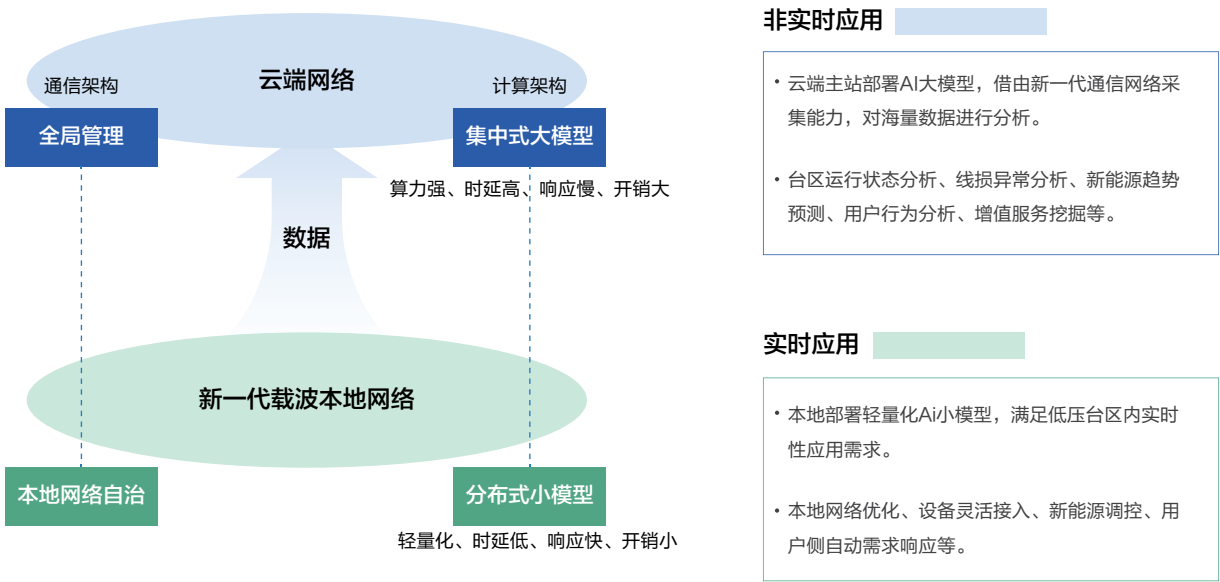


图 4-28 通感一体化架构

设备层面，“通感算”一体化技术的关键还在于将“通、感、算”的功能通过一颗芯片实现，通过芯片高集成度实现设备小型化。这种多功能集成的设计方式，不仅减少了系统复杂性和成本，还提高了设备的整体性能和可靠性。



图 4-29 通感算控一体化芯片架构示意图

注：nx 中的 n 代表多路 n，x 为 16 进制；不同 IO 口有不同的路数。

4.3.3 配电监测类典型业务应用

配电监测类业务以掌握低压台区配电系统实时运行状态为目标，以周期性采集分支开关、传感器、电表等监测设备的运行状态，并开展故障分析及维护为主要任务，实质性要求较低，采集频率通常大于 15 分钟 / 次，低压台区拓扑识别是其中典型的业务之一。

随着分布式能源、电动汽车充电桩等新型负荷的接入，以及城市化进程加速，低压台区结构日益复杂化、动态化。传统台区管理依赖人工录入和离线数据，存在拓扑信息更新滞后、数据精度不足等问题，导致线损计算不准、故障定位困难、供电质量难以优化。在此背景下，亟需通过自动化技术实现低压台区拓扑的精准识别，支撑配电网智能化升级和精益化管理需求。

当前主流的拓扑辨识方法可分为三类：一是脉冲测试法，通过波通信设备在电能表端注入特征脉冲信号，并在线路各关键节点检测该信号以实现拓扑绘制；二是数据分析法，基于智能电表高频量测数据，利用聚类分析、相关系数法或机器学习模型挖掘用户电压电流相似性特征，自动推断连接关系；三是距离推演法，通过信号传输的时延，测量 PLC 网络所有通信节点的两两之间的电力线距离，利用智能算法将整个 PLC 通信网络的拓扑结构推演出来。

低压台区环境错综复杂多变，由于拓扑结构高度异构性、电磁干扰复杂以及电气参数间关系复杂等问题，使得上述方法均存在场景适应性局限，难以实现全域全场景的拓扑精准辨识。为提高识别效果，需要通过 AI 模型来驱动更复杂的算法、综合分析距离、电气量等更多维度的数据，这对新一代电力线载波通信设备的智能化水平提出要求，一方面需内嵌轻量化 AI 推理引擎，支持实时数据处理与模型迭代；另一方面应实现通信规约解耦与功能 APP 化部署，通过可编程接口实现异构设备的数据格式适配与算法动态加载，从而在跨厂商设备混装场景下保障拓扑辨识的鲁棒性和系统兼容性。

4.3.4 营销计量类典型业务应用

营销计量类业务周期性采集为主，根据采集需求实时性要求从秒级（停电等事件上报、费控操作等）到分钟级（电能周期采集任务）不等。

在新型电力系统加速转型背景下，低压台区通信网络正从原先的单一电表数据采集向多源异构设备高频互动演进。接入设备类型广泛扩展，例如电网公司部署的智能开关、智能断路器、各类传感器，用户侧接入的光伏逆变器、充电桩、需求侧的可调负荷等，网络规模提升至 1000 个节点以上。数据交互维度也从单相抄表提升为双向的实时数据交互，采集频率也从当前的 15 分钟 / 次提升至 1 分钟 / 次，控制类任务甚至需要秒级响应。

高频采集对通信网络提出以下要求：一是通信速率提升，从当前载波通信的 1.5Mbps 至少提升至 3.9Mbps；二是接入能力提升，网络规模从典型的 500 个智能电表提升至超过 1000 个多类型设备；三是时钟同步精度提升，为满足控制类业务，时钟同步精度至少需要提升至毫秒级。

为应对上述挑战，新一代载波技术需要通过 MIMO 多天线技术、OFDMA 调制技术、动态比特加载（Bit-loading）等技术大幅提升通信效率，通过身份认证和网络管理技术实现泛在设备灵活接入和即插即用，通过高精度的网络时钟（NTB）为泛在计量设备授时，以保证新型电力系统多业务承载能力。

4.3.5 调度运行类典型业务应用

低压台区范围内，调度运行类业务以光伏、充电桩、储能设备的实时监测和控制位主，对控制指令的实时性要求较高，通常为秒级。光伏“四可”是其中典型的业务之一。

在“双碳”战略的强力驱动下，我国分布式光伏装机规模呈现指数级增长，从 2013 年 0.03 亿千瓦的基础量级跃升至 2024 年 3.7 亿千瓦，渗透率突破 20% 临界点。这种跨越式发展正不断凸显传统电网架构对高比例新能源消纳的适应性短板，特别是在午间大发时段的逆功率倒送、电压越限等问题频发。为此，国家能源局于 2025 年 3 月颁布《分布式光伏发电开发建设管理办法》，首次将“四可”纳入强制性技术规范体系，旨在通过数字化升级推动分布式光伏由“被动并网”向“智能互动”模式转型，为构建新型电力系统提供技术支撑。

光伏逆变器与主站进行一次交互的往返时间通常为分钟级，为保障秒级调控，控制算法需要在本地实现处理。

分布式光伏“四可”体系的落地对通信网络提出双重技术挑战。一是，逆变器厂商间存在通信协议壁垒，导致数据采集与控制指令难以形成统一交互通道；二是，指令传输实时性差，现有系统依赖主站 - 终端 - 通信设备 - 光伏逆变器的纵向逐级传输模式，光伏逆变器与主站进行一次交互的往返时间通常为分钟级，无法满足光伏集群参与调频调压所需的秒级实时响应要求。

为解决上述问题，新一代载波技术需要在两方面突破：首先，需构建动态自适应的协议转换架构，实现跨厂商设备即插即用；其次，要构建通信与计算深度耦合的边缘智能网络，在台区智能终端、代理通信节点部署轻量化分析模型，实现全台区光伏节点的集群柔性控制和独立光伏节点的超限刚性调控，将关键指令响应速度压缩至秒级。



5. 总结与展望

本白皮书通过分析新型电力系统下新一代宽带载波的典型应用场景和业务通信需求，结合新一代载波的特性及价值，给出了具备新一代设备、新一代网络和新一代应用三个“新一代”特性的新一代载波解决方案。与当前宽带载波技术相比，新一代宽带载波将围绕三个方向创新，即新一代设备的基础通信能力创新、新一代网络的组网能力创新、新一代应用的通感算一体深化应用创新和边端 AI 计算能力创新。新一代设备的基础通信能力创新，在通信速率、通信可靠性、通信时延、基础算力等方面有大幅度提升；新一代网络的组网能力创新，具备更好的适应性和灵活性，可以通过主干网和子网相结合的方式实现对载波通信设备的管理，通过 IP 组网方式支持更灵活的节点接入和路由寻址，结合网络 QoS 机制实现对不同业务的调度，使电力线载波通信可以拓展应用到低压台区的各个业务场景；新一代应用的通感算一体深化应用创新和边端 AI 计算能力创新，实现多业务之间实时数据交互与协同控制，最终达到低压台区一张网、毫秒级感知、秒级调控、1 分钟采集、边端实时计算等目标。基于新一代载波的超高速特性，新一代载波未来拟定名为“超高速低压电力线载波通信”（Super high speed Power Line Communication–SPLC）。

新一代载波在设计之初便面向更广泛的低压台区各类业务，为高级计量、透明配电网、分布式光伏“四可”等业务提供了一种更优的载波通信解决方案。新一代载波通过在通信速率、抗干扰能力的提升和网络技术的优化，将更好地支撑低压台区分钟级采集、拓扑识别、分布式光伏“四可”等新业务的开展，为实现低压台区设备的智能化升级提供基础的连接能力，助力实现低压台区的业务从简单的采集到复杂的控制、协同、调度的升级，支撑突破电力可靠供应、电网安全运行、电能经济供应的挑战，助力新型电力系统发展战略的推进。

新一代低压电力线技术具有广阔的市场前景，目前全国电网总共有近六亿只表，扩展到开关则超过十亿只，如果延伸到居民用户侧，市场规模成倍增加。新一代载波发展及应用目前处于起步阶段，后续电网企业、载波芯片厂商、载波模组设备厂商共同引领载波通信领域技术的标准和产业化发展，推动新一代载波终端模组通用化，做好新一代载波管理支撑平台，提升对新一代载波的可管可控能力。