

团 体 标 准

T/CPUMT 050—2026

5G+工业互联网 适配增强技术要求

5G+ Industrial internet—Technical requirements for adaptation enhancement

2026 - 03 - 05 发布

2026 - 03 - 05 实施

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 5G 无线接入网基本功能要求	3
5.1 物理层	3
5.2 层二	3
5.3 RRC 层	3
6 5G 适配增强功能要求	3
6.1 上行容量增强	3
6.2 下行容量增强	4
6.3 端到端时延	5
6.4 通信可靠性	6
6.5 高精度时间同步	8
6.6 高精度室内定位	10
7 与其他协议对接	12
7.1 概述	12
7.2 现场总线协议对接技术	12
7.3 工业以太网协议对接技术	12
7.4 无线通讯协议对接技术	13
7.5 5G 与其他协议的对接技术要求	13
参考文献	125

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国和平利用军工技术协会提出并归口。

本文件起草单位：中国移动通信集团设计院、蓝象标准（北京）科技有限公司、上海轩恩信息科技有限公司、海南大学、哈尔滨工业大学（深圳）电子与信息工程学院、北京中城汇标准化技术院、北京中科源途科技有限公司、联通数字科技有限公司、北京嗨标领航科技有限公司、中移（苏州）软件技术有限公司、嵩嘉标准化技术服务（北京）有限公司。

本文件主要起草人：焦燕鸿、张红艳、乔华阳、马振翔、张海涛、谢文明、唐浩、高林、邓安达、朱旭、姚佳、高锦雄、张婧宇、周家荣、匡澄、马志强、张德保、徐成利、姜冰、黄新芳、隋妍、刘颖、邱天、王新亮、王致远、段小莉。

引 言

“5G+工业互联网”利用以5G为代表的新一代信息通信技术，构建与工业经济深度融合的新型基础设施、应用模式和工业生态，通过5G技术对人、机、物、系统等的全面连接，构建起覆盖全产业链、全价值链的全新制造和服务体系，为工业乃至产业数字化、网络化、智能化发展提供了新的实现途径，助力企业实现降本、提质、增效、绿色、安全发展。5G与工业互联网的融合将加速数字中国、智慧社会建设，加速中国新型工业化进程，为中国经济发展注入新动能。随着“5G+工业互联网”的应用不断推广，网络技术与组网、网络管理技术、5G多接入边缘计算技术、终端技术、适配增强技术、建设实施等方面需要制定相关标准进行规范和引导。

目前5G数字蜂窝移动通信网标准，在国外主要由3GPP进行标准化，国内已有标准体系庞大，单一标准通常只针对编制主题一定的范围内进行技术能力本身的规范，未与具体的工业互联网的业务需求场景相结合。在工业互联网领域应用时，需根据业务情况有甄别的进行技术适配。同时，除5G通信网标准外，工业互联网领域还涉及更多标准，在两类标准对接互通方面，尚缺乏标准规范。

本文件针对工业互联网的应用需求，系统梳理整合5G通信标准和工业互联网相关标准，规范了较为常用的适配增强型技术，更加具有针对性，有利于从业人员系统、快速的了解技术规范要求，可用于指导“5G+工业互联网”规划、设计、制造、建设等相关工作。

5G+工业互联网 适配增强技术要求

1 范围

本文件规定了5G+工业互联网适配增强技术的5G无线接入网基本功能要求、5G适配增强功能要求、与其他协议对接等内容。

本文件适用于5G+工业互联网终端适配增强技术的规划、设计和部署等工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 42021 工业互联网总体网络架构

YD/T 0532 5G数字蜂窝移动通信网毫米波基站设备技术要求（第一阶段）

YD/T 3929 5G数字蜂窝移动通信网6GHz以下频段基站设备技术要求（第一阶段）

YD/T 4719 5G数字蜂窝移动通信网 6GHz以下频段基站设备技术要求（第二阶段）

ITU-T G. 8272.1 增强型主参考时钟的计时特性（Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks）

ITU-T G. 8273.2 适用于网络提供全定时支持的电信边界时钟和电信时间同步时钟的定时特性（Timing characteristics of telecom boundary clocks and telecom time synchronous clocks for use with full timing support from the network）

3GPP TS 38.104 无线接入网技术规范组；NR；基站无线发送与接收（Technical Specification Group Radio Access Network；NR；Base Station（BS）radio transmission and reception）

3 术语和定义

GB/T 42021界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

边界时钟 boundary clock

边界时钟是在一个域中具有多个精确时间协议（PTP）端口，并维护该域中所用时标的时钟。它可作为时间源，即为主时钟；也可与另一个时钟同步，即为从时钟。

[来源：GB/T 25931—2010, 3.1.3]

3.2

现场总线 field bus

连接智能现场设备和自动化系统的数字式、双向传输、多分支结构的通信网络。

[来源：GB/T 42021—2022, 3.7]

3.3

高精度时间同步 high-precision time synchronization

通过使用具有高精度的时间参考源，在5G通信网络中实现设备之间时钟的同步。

3.4

工业以太网协议 Industrial Ethernet Protocol

在工业领域中使用的以太网技术协议，它们旨在满足工业环境对高可靠性、实时性和安全性的特殊要求。

3.5

工业互联网 industrial Internet

新一代信息通信技术与工业经济深度融合的新型基础设施、应用模式和工业生态,通过对人、机、物、系统等的全面连接,构建起覆盖全产业链、全价值链的全新制造和服务体系。

[来源: GB/T 42021—2022, 3.1]

3.6

时延 latency

对于直通转发设备,从输入数据包第一个比特到达输入端口开始,至输出端口上输出该数据包的第一个比特为止的时间间隔。

[来源: GB/T 30094—2013, 3.1.25]

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

5G: 第五代移动通信技术 (5th Generation Mobile Communication Technology)

5GC: 5G核心网 (5G Core Network)

5QI: 5G服务质量标识 (5G QoS Identifier)

AOA: 到达角 (Angle of Arrival)

AR: 增强现实 (Augmented Reality)

BBU: 基带处理单元 (Baseband Unit)

CA: 载波聚合 (Carrier Aggregation)

DRX: 非连续接收 (Discontinuous Reception)

ePRTC: 增强型主参考时钟 (Enhanced Primary Reference Timing Clock)

FDD: 频分双工 (Frequency Division Duplex)

GPS: 全球定位系统 (Global Positioning System)

MAC: 媒体接入控制层 (Medium Access Control)

MIMO: 多输入多输出技术 (Multiple-Input Multiple-Output)

NG: 5G核心网与基站间接口 (Next Generation)

NR: 新空口 (New Radio)

NRPPa: NR定位协议A (NR Positioning Protocol A)

PDCP: 分组数据汇聚协议 (Packet Data Convergence Protocol)

PMA: 物理媒介附属 (Physical Media Attachment)

PRS: 定位参考信号 (Positioning Reference Signal)

PRTC: 基准主时间 (Primary Reference Time Clock)

QoS: 服务质量 (Quality of Service)

RedCAP: 轻量化5G终端技术 (Reduced Capability)

RLC: 无线链路控制层 (Radio Link Control)

RRC: 无线资源控制层 (Radio Resource Control)

RSRP: 参考信号接收功率 (Reference Signal Received Power)

RTC: 实时时钟 (Real Time Clock)

RTT: 往返时间定位技术 (Round Trip Time)

SDAP: 服务数据适配协议 (Service Data Adaptation Protocol)

SR: 调度请求机制 (Scheduling Request)

SRS: 探测参考信号 (Sounding Reference Signal)

SRS for positioning: 用于定位的探测参考信号 (Sounding Reference Signal for positioning)

SUL: 补充上行链路 (Supplementary Uplink)

TDD: 时分双工 (Time Division Duplexing)

TSN: 时间敏感网络 (Time-Sensitive Networking)

UPF: 用户平面功能 (User Plane Function)

UTDOA: 上行时间差到达 (Uplink Time Difference of Arrival)

VR: 虚拟现实 (Virtual Reality)

5 5G 无线接入网基本功能要求

5.1 物理层

物理层系统参数（参数集与帧结构）、信道复用、调制、信道编码、交织和加扰、多天线技术、参考信号、混合自动重传请求（HARQ）、资源分配和调度、带宽分段（BWP）、功率控制、物理下行控制信道（PDCCH）和下行控制信息、物理上行控制信道（PUCCH）和上行控制信息、同步和广播和随机接入应符合YD/T 3929和YD/T 0532相关规定。若工业有专用频段，则应遵从无线电管理局颁布的频段规定。

5.2 层二

层二MAC层基本功能要求、RLC层基本功能要求、PDCP层基本功能要求和SDAP层基本功能要求应符合YD/T 3929的相关规定。层二协议应包含MAC、RLC、PDCP、SDAP，负责数据封装、调度和 QoS管理。

5.3 RRC 层

RRC层功能、系统信息提供、移动性管理、测量功能和无线承载与QoS功能应符合YD/T 3929的相关规定。

6 5G 适配增强功能要求

6.1 上行容量增强

6.1.1 业务需求

5G上行容量增强技术业务应包括工业互联网的远程设备操控、高清视频监控与分析、数据采集与上传、协同作业与调度以及AR/VR辅助作业等。

6.1.2 规划要求

5G上行容量增强规划应符合下列要求：

- a) 支持根据行业的单终端上行速率和终端分布密度需求确定上行容量需求；
- b) 支持根据上行容量需求，结合无线频率规划和无线设备选型选择 5G 网络制式、频率带宽、天线数量等配置，支持引入载波聚合、SUL 等上行容量增强技术；
- c) 支持通过无线规划控制干扰，在无法有效控制干扰的情况下，预留上行业务余量；
- d) 1D3U 帧结构限于信号隔离值高的密闭场景（例如地下矿井等）使用，以避免不同帧结构配置造成的干扰。

速率需求与下行容量增强技术选择对应情况见表1。

表 1 速率需求与下行容量增强技术选择对应情况

上行容量需求分类 (Mbps)	规划要求		
	频率规划要求 (Hz)	无线设备选型要求	单 5G 终端协同要求
<25	① TDD 20M ② FDD 10M	① TDD 2TR/4TR ② FDD 2TR/4TR ③ 支持 RedCap	① NR 终端(1T2R) ② RedCap 终端(1T1R)
25~60	① TDD 40M ② FDD 20M	① TDD 2TR/4TR ② FDD 2TR/4TR ③ 支持 RedCap	① NR 终端(1T2R) ② RedCap 终端
60~100	① TDD 80M ② FDD 35M	① TDD 4TR/8TR ② FDD 4TR	NR 终端(1T2R)
100~150	① TDD 100M ② FDD 40M	① TDD 8TR ② FDD 4TR	NR 终端(2T4R)
150~250	① TDD 100M/160M	① TDD 32TR/64TR	NR 终端支持 SU MIMO

上行容量需求分类 (Mbps)	规划要求		
	频率规划要求 (Hz)	无线设备选型要求	单 5G 终端协同要求
	② FDD 40M	② FDD 8TR	
250~400	① TDD 200M ② TDD 100M+FDD 20M	① TDD 32TR/64TR ② TDD 32TR/64TR +FDD 4TR ③ 支持 上行 CA/SUL	① NR 终端支持 CA ② NR 终端支持 SUL
400~500	TDD 200 M+FDD 40M	TDD 32TR/64TR+FDD 8TR	NR 终端支持 SUL
500~700	TDD 100M (1D3U 帧结构)	TDD 4TR (1D3U 帧结构)	NR 终端支持 1D3U 帧结构

6.1.3 技术要求

5G上行容量增强技术应符合下列要求：

- 上行容量增强需求场景下，当需要采用载波聚合技术时，无线基站主设备与无线终端的选型，具备载波聚合功能，并支持相应的载波聚合频段组合；
- 上行容量增强需求场景下，当需要采用 SUL 和 1D3U 技术时，无线基站主设备与无线终端的选型，支持 SUL、1D3U 功能；
- 上行 SUL 功能要求，符合 YD/T 3929 的相关功能要求；
- 上行载波聚合工作频率和带宽要求，符合 YD/T 4719 的相关功能要求；
- 上行载波聚合功能要求，符合 YD/T 4719 的相关功能要求。

6.2 下行容量增强

6.2.1 业务需求

5G下行容量增强技术可应用于AR/VR、裸眼3D、集中化/云化机器人控制、数字孪生等对下行业务速率要求较高的需求场景。

6.2.2 规划要求

5G下行容量增强技术符合下列要求：

- 应支持根据业务需求，确定终端下行速率要求；
- 应支持根据终端下行速率要求，合理选择 5G 网络制式、频率带宽、天线数量等组合条件下的载波聚合、毫米波等下行容量增强技术。
- 在满足终端速率需求的基础上，应考虑建设成本因素，宜优先选择网络制式少、聚合频段少、终端复杂度低、成本低的载波聚合类型；
- 对于连片覆盖区域规划应考虑同频干扰的影响，通过合理控制小区边界、减少同频干扰交叠区域、高容量相邻小区选用不同频段等技术手段降低干扰、保证容量。

速率需求与下行容量增强技术选择对应情况见表2。

表 2 速率需求与下行容量增强技术选择对应情况

终端下行速率需求 (Mbps)		规划要求	
峰值	实际平均体验	下行容量增强技术 (网络制式及频段宽度要求)	基站主设备天线数量要求
1500~2400	500~800	① 2.6GHz 带内两载波聚合 (TDD 160M) ② 3.5GHz+1.8GHz 带间两载波聚合 (TDD 100M+FDD 40M)	① TDD 32TR/64TR ② TDD 32TR/64TR + FDD 4TR
2400~3000	800~1000	① 3.5GHz 带内两载波聚合 (TDD 200M) ② 2.6GHz+700MHz 带间三载波聚合 (TDD 160M+FDD 30M)	① TDD 32TR/64TR ② TDD 32TR/64TR +FDD 4TR

3000~4000	1000~1500	① 2.6GHz+4.9GHz 带间三载波聚合 (TDD 260M) ② 3.5GHz+1.8GHz 带间三载波聚合 (TDD 200M+FDD 40M) ③ 2.6GHz+4.9GHz+700MHz 带间三载波聚合 (TDD 200M+FDD 30M)	① TDD 32TR/64TR ② TDD 32TR/64TR +FDD 4TR
4000 以上	1500 以上	毫米波 (26GHz 或 39GHz 频段 带宽 400M 以上)	TDD 128TR 及以上

6.2.3 技术要求

5G下行容量增强技术应符合下列要求：

- 下行容量增强需求场景下，无线基站主设备与无线终端的选型，具备载波聚合功能，并支持相应的载波聚合频段组合；
- 下行容量增强需求场景下，无线终端天线数至少满足 2T4R；无线基站应至少支持下行 4 流单用户多输入多输出技术 (SU-MIMO)；
- 下行载波聚合工作频率和带宽要求，应符合 YD/T 4719 的相关功能要求；
- 下行载波聚合功能要求，应符合 YD/T 4719 的相关功能要求。

6.3 端到端时延

6.3.1 业务需求

工业互联网场景对端到端时延的要求因应用场景不同而存在显著差异，可参照表3确定典型场景时延需求范围。

表 3 工业互联网典型场景端到端时延需求

场景分类	典型场景举例	端到端时延要求
运动控制类场景	精密运动控制、机器人控制	1 ms~10 ms
高精度工业场景	高压配电、远程工程机械作业	5 ms~10 ms
过程控制类场景	过程自动化、物料传送	10 ms~100 ms
机器安全控制	智慧物流、辅助开车/停车	20 ms~50 ms
实时监控与监测类	设备状态监测、环境监测	50 ms~100 ms
非实时数据采集与传输	产品质量追溯与生产履历	100 ms 以上

6.3.2 规划要求

端到端时延规划符合下列要求：

- 应对 5G 核心网、无线网、传输网、终端等多层架构与功能进行统筹规划；
- 可将核心网用户面功能 (UPF) 下沉，缩短传输距离；支持优化传输路径、减少传输节点和跳数，降低数据传输和处理时延；
- 5G 无线网方面，可利用码资源预留、预调度、微时隙 (mini-slot) 调度、差异化 5QI 等方案进行无线时延优化，极端情况下可利用毫米波降低空口时延；
- 根据不同的端到端时延要求，可按照表 4 进行方案规划。

表 4 端到端时延规划要求

端到端时延需求分类 (ms)	核心网规划要求	无线网规划要求
>100	中心级 5GC	5QI 70/9, 非保证比特率 (NonGBR)
100~50	地市级 UPF	5QI 7/6, 非保证比特率 (NonGBR)+短 SR 周期调度+目标 BLER1%+无切换
50~20	UPF 下沉到园区	PRB 资源预留, 5QI 83/81, GBR+上行预调度+PDCP 乱序递交+无切换
<20	UPF 下沉到现场	① 支持 高可靠低时延通信 (URLLC) 功能: 低码率 MCS/CQI+PDCP 复制+mini-slot+ slot 聚合+上行配置授权 ② TDD 互补 (超级时频折叠) ③ 采用毫米波频段

6.3.3 技术要求

端到端时延符合下列技术要求：

- a) 上行预调度功能应支持按一定间隔（预调度最小间隔）、一定数据量大小（预调度数据量）持续主动给用户分配上行物理上行共享信道（PUSCH）资源。上行预调度的调度最小间隔可配（默认取值1个时隙，最小支持2个符号），调度数据量可配（默认值为80字节）。
- b) 5QI级别预调度参数配置功能应支持为每个5QI独立配置预调度参数，包括预调度模式（下行触发的上行预调度和持续的上行预调度）、预调度开关、预调度最小间隔、预调度持续时间（仅下行触发的上行预调度模式下配置）、预调度数据量等；
- c) 5QI级别DRX参数配置功能应支持为每个5QI独立配置DRX参数，包括DRX开关、OnDurationTimer、Drx-InactivityTimer、Drx-RetransmissionTimer、LongDrx-Cycle、ShortDrx-Cycle、ShortDrxCycleTimer等；
- d) 5QI级别SR参数配置功能应支持为每个5QI独立配置SR周期；
- e) 5QI级别UE不活动定时器配置功能应支持为每个5QI独立配置UE不活动定时器；
- f) 当同一终端同时存在多5QI时，对于UE级或逻辑信道组参数，应支持按照“优先级最高”原则选择相应的5QI参数为终端或逻辑信道组的参数，包括预调度、SR、DRX等参数，同时基站侧可配置5QI对应的优先级，当核心网该字段不下发时可按照基站配置生效；
- g) 5QI级别mini-slot配置功能应支持5QI级别独立配置mini-slot（上下行必选支持2/4/7符号中的任意两个），应支持mini-slot调度符号数自适应或mini-slot重复；
- h) 无线终端应具备与时延分类要求相匹配的处理功能，并满足相应时延处理能力。

6.4 通信可靠性

6.4.1 业务需求

根据工业互联网应用场景，网络应达到关键业务的通信可靠性要求，在某些可靠性要求较高的场景应能达到99.99%或99.999%，满足工业生产零中断的要求。

注：工业互联网典型应用场景包括远程控制、柔性生产制造、厂区智能物流、无人智能巡检（机器人 / 无人机）、现场辅助装配（AR/VR）、机器视觉质检、设备故障诊断、过程控制（PLC）等。

6.4.2 规划要求

通信可靠性规划应符合下列要求：

- a) 根据业务需求，确定通信可靠性要求；
 - b) 根据通信可靠性要求，合理选择核心网、传输网、无线网设备及终端可靠性增强技术。
- 通信可靠性规划要求见表5。

表5 通信可靠性规划要求

通信可靠性需求	规划要求
99%	\
99.9%	①接入环网+汇聚核心口字型拓扑
99.99%	①独享UPF（1+1容灾方式部署） ②单BBU双链路+接入环网+汇聚核心口字型拓扑 ③BBU主控板/基带板/电源模块备份+NG口断链保活 ④工业级高可靠终端
99.999%	①独享5GC（1+1容灾方式部署） ②双BBU双链路+接入环网+汇聚核心口字型拓扑 ③双网冗余+NG口断链保活 ④工业级高可靠双终端+双发选收

6.4.3 技术要求

6.4.3.1 核心网

核心网符合下列要求：

- a) 应采用独享 UPF，企业的数据可在专属的用户面进行处理与传输，实现与其他用户数据的有效隔离，并针对特定企业或业务场景，灵活配置网络资源，提供定制化的服务质量（QoS）保障。在物理部署上，UPF 应采用 1+1 容灾备份部署，同时，为实现主备 UPF 的快速切换，宜配备实时监测与切换机制；
- b) 5GC 应独立构建，实现“资源、数据、功能”三重隔离，以满足工业场景对数据隔离、定制化的需求；
- c) 5GC 应采用 1+1 双节点冗余部署，通过实时同步与快速切换，实现核心网故障时业务零感知中断。

6.4.3.2 传输网

传输网符合下列要求：

- a) 核心层与汇聚层应采用口字型拓扑，以“双汇聚+双核心”的闭环连接设计为工业互联网的高可靠通信提供底层传输支撑；
- b) 接入层应使用环网设计，与核心层和汇聚层以口字型拓扑形成分层联动的传输网可靠性体系；
- c) 每个 BBU 应采用双链路接入，分别连接至不同的上游节点。在接入层，支持连接至接入环网的不同接入节点；在汇聚层，支持连接至汇聚核心口字型拓扑的汇聚节点；
- d) 双 BBU 双链路对于传输网要求如下：
 - 1) 每个 BBU 应通过双链路接入上层传输网；
 - 2) 两个 BBU 之间应部署独立互联链路，用于数据同步与业务协同。

6.4.3.3 无线网

无线网符合下列要求。

- a) BBU 主控板、基带板、电源模块备份要求如下：
 - 1) 5G BBU 主控板应采用 1+1 热备份，以保证信令与管理不中断。主控板应内置心跳检测机制，以确保切换完成后无缝续传，核心网与基站的信令交互不丢包，丢包率应 $\leq 10^{-7}$ ，适配工业场景中对设备管控指令实时性的要求；
 - 2) 5G BBU 基带板应采用 N+1 热备份配置。当某块业务板故障，备用板应能在 200 ms 内自动激活，接管故障板的小区业务，保障用户数据传输不中断。备用板应能参与动态负载均衡，避免单块板过载导致的业务降级，适配工业场景中“海量传感器+高带宽设备”混合接入的算力需求；
 - 3) 5G BBU 电源模块应采用 N+1 冗余配置，采用“均流供电”模式。电源模块应支持“市电+备用电池”双输入，市电正常时由市电供电，市电中断后应能自动切换至 48V 备用电池，切换时间应 ≤ 10 ms，电池容量应满足 BBU 满负荷运行 ≥ 8 h，避免突发停电导致设备宕机。
- b) NG 口断链保活：为确保“端到端”通信韧性，应配置 NG 口断链保活机制，通过实时监测、智能预警，提前应对潜在断链风险；应支持借助双链路冗余、跨区域容灾，实现毫秒级链路切换；依托数据缓存与重传，保障业务数据完整。
- c) 双 BBU 双链路对于无线网要求如下：
 - 1) 双 BBU 应物理隔离部署，同机房部署时，应置于不同机柜；分布式部署时，间距宜大于 500 m；
 - 2) 双 BBU 应按“业务量均分”原则承担接入业务。
- d) 双网冗余要求如下：
 - 1) 无线网设备应采用双网冗余配置，按“主用网+备用网”部署两套独立的无线设备，主用网与备用网的 5G 无线基站（gNB）/RRU 应物理隔离，关键射频组件采用“1+1 备份”；
 - 2) 在正常状态下，双网负载分担，协同覆盖增强；在故障状态下，针对“单设备故障”、“单网局部故障”、“单网全故障”等场景，应支持触发分层差异化切换。

6.4.3.4 终端

终端应符合下列要求。

- a) 工业级高可靠终端要求如下：
 - 1) 构建“端—网—云”全链路可靠性体系，应采用 5G 工业级高可靠终端；
 - 2) 应支持高可靠性网络连接；具备防水、防尘、抗震等特性以及在高温、低温、潮湿、震动等极端环境下稳定运行的能力；拥有多种接口，广泛支持多种工业通信协议；有强大的数据处理能力，满足工业现场的实时决策需求；拥有硬件层面、网络层面、应用层面等多层次安全防护，保障工业网络安全。
- b) 工业级高可靠双终端+双发选收要求如下：
 - 1) 构建“端—网—云”全链路可靠性体系，应采用 5G 工业级高可靠双终端，双发选收配置；
 - 2) 每套双终端应包含 2 个独立终端，每个终端应支持独立供电、独立射频链路、独立硬件模块。物理安装时，两个终端间距应 >1 m，以减少电磁干扰，且分别部署在设备的不同方位，避免单点碰撞导致双终端同时损坏；
 - 3) 双终端应通过“低功耗互联链路”实时同步运行状态，同步链路采用“加密+重传”机制，高级加密标准-128 位 (AES-128) 加密，重传次数 ≥ 3 次，避免状态数据传输错误导致协同失效；
 - 4) 双终端应采用双发选收配置，双路数据并行传输，接收端择优解析，抵消空口传输的不确定性。

6.5 高精度时间同步

6.5.1 业务需求

6.5.1.1 协同业务同步

根据 3GPP TS 38.104 技术要求，5G 不同类型的协同增强同步要求见表 6。

表 6 5G 不同类型的协同增强同步要求

基站类型	协同增强类型	时间偏差要求	备注
BS Type1-0	MIMO和发射分集	65 ns	针对低频基站 (Sub 6GHz)
	带内连续CA	260 ns	
	带内非连续CA	3 μ s	
	带间CA	3 μ s	
BS Type2-0	MIMO和发射分集	65 ns	针对高频基站 (Above 6GHz)
	带内连续CA	130 ns	
	带内非连续CA	3 μ s	
	带间CA	3 μ s	

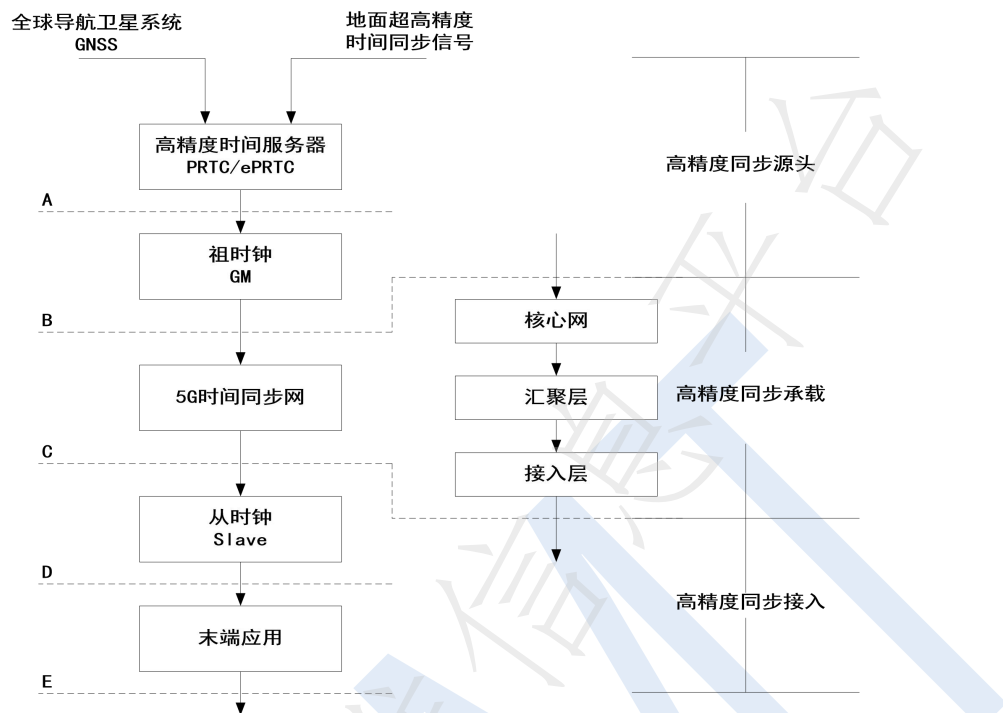
6.5.1.2 垂直行业应用业务同步

5G 网络应支持垂直行业应用业务的业务同步需求，部分要求较高的业务对 5G 网络的高精度时间同步的需求应达到 10 ns 量级。

6.5.2 规划要求

6.5.2.1 组网模型

5G 高精度时间同步组网模型见图 1。



标引序号说明：

- A——PRTC或ePRTC的输出；
- B——GM (Grandmaster) 的输出 (GM可能内置于PRTC/ePRTC)；
- C——5G时间同步网的输出；
- D——Slave时钟的输出 (Slave可能内置于末端无线设备)；
- E——无线末端应用输出 (比如天线空口)。

图 1 5G 高精度时间同步组网模型

6.5.2.2 高精度时间服务器要求

高精度时间服务器 (PRTC/ePRTC) 应采用卫星授时关键技术, 在卫星不可用的情况下, 宜通过地面获取超高精度时间同步信号。高精度时间服务器的性能应满足ITU-T G. 8272.1标准的要求。

6.5.2.3 祖时钟要求

祖时钟功能通常由PRTC/ePRTC实现, 组网模型参考点A (见图1) 应位于设备内部。

6.5.2.4 5G 时间同步网要求

5G时间同步网符合下列要求：

- a) 图 1 中参考点 B 和参考点 C 之间属于 5G 时间同步网, 应采用高精度同步传输技术实现高精度同步承载, 为由多个电信用边界时钟 (T-BC) 组成的同步链；
- b) 为提升端到端同步性能, 扩大组网规模, 传输设备单节点时间同步精度应优于一定的限值, 应符合 ITU-T G. 8273.2 中的类型 C 和类型 D 相关规定。

6.5.2.5 从时钟和末端应用要求

从时钟 (Slave) 和末端应用一般集成在同一设备中, 符合下列要求：

- a) 图 1 中参考点 C 或参考点 D 属于 5G 时间同步网与无线末端设备连接点, 宜采用高精度同步接口 (例如带内 10GE/25GE 光) 进行对接, 以降低局内互联引入的时间误差；
- b) 图 1 中参考点 E 为 5G 无线空口, 5G 同步需以无线空口间的相对时间偏差衡量, 同步网宜通过实现相对于协调世界时 (UTC) 的绝对时间精度来满足无线侧的相对时间精度要求。

6.5.3 技术要求

6.5.3.1 高精度同步源头

高精度同步源头符合下列要求。

- a) 技术措施：应通过卫星双频接收技术，满足工业级高精度需求；双频接收技术应通过同时接收单个卫星系统的两个频点载波信号（例如 GPS 的 L1/L2 频段、北斗的 B1/B2 频段），利用双频信号的电离层延迟差异，通过算法消除电离层影响，提升授时精度。
- b) 性能指标：卫星双频授时技术的授时精度应达到 ± 30 ns，具备独立部署能力，作为高精度时间服务器的核心技术支撑，为网络提供稳定、可靠的时间基准；
- c) 应用建议：应能适用于对时间基准精度要求严苛的场景（例如工业控制、电力同步等），宜单独部署为全网时间源，或与其他同步技术（例如原子钟）冗余备份，提升源头可靠性。

6.5.3.2 高精度同步传输

高精度同步符合下列要求。

- a) 同步优化要求如下：
 - 1) 宜在 PTP 协议基础上，通过打戳位置优化、打戳分辨率提升、同步算法改进、模块间协作增强、同步网络部署优化等方式优化提升精度，在多跳转传输场景下，端到端时间同步精度应控制在 ± 50 ns 以内，满足工业控制（如远程机器人、精密制造）对时间同步的严苛要求；
 - 2) 打戳位置优化：打戳位置应尽量靠近物理接口，减少光模块内部的半静态延时误差（例如光电器件响应差异）和动态延时误差（例如信号传输路径波动）；宜在信号流经过 PMA 层时执行打戳动作，最大限度缩短打戳点与实际信号传输路径的距离；
 - 3) 打戳分辨率提升：宜通过提升打戳时钟频率（例如从 156.25MHz 提升至 1GHz）或采用插值算法等方式，提高打戳分辨率，降低采样误差对同步精度的影响；
 - 4) 同步算法改进：应支持通过优化系统 RTC 的时间调整粒度，从微秒级细化至纳秒级，减少因时钟步进调整导致的动态抖动误差，确保时间平滑过渡；引入自适应滤波算法，动态补偿链路延时变化，提升同步的稳定性；
 - 5) 模块间协作增强：应通过内部高速同步总线，例如高速外围组件互连（PCIe）时钟同步，实现模块间 RTC 的亚纳秒级同步；
 - 6) 同步网部署优化：针对光纤传输的不对称性（如上下行链路长度差异），宜在条件具备时采用单纤双向方式部署 PTP，通过同一根光纤传输上下行同步信号，最大程度消除链路不对称导致的延时差。为增强同步网络的安全可靠性（例如防篡改、故障快速定位）及运维管理效率，宜在 PTP 开通与运维中引入智能时钟，支持同步状态实时监测、异常告警与自动修复。
- b) 应用策略要求如下：
 - 1) 优化后的 PTP 适用于 5G 承载网、接入网的端到端同步部署，宜用于工业园区、工厂内网等短距离、低跳数场景；
 - 2) 长距离骨干传输场景宜结合卫星双频授时源头，通过分段同步+中间节点校时的方式，保障全程精度。

6.6 高精度室内定位

6.6.1 业务需求

典型行业的定位业务需求见图2。

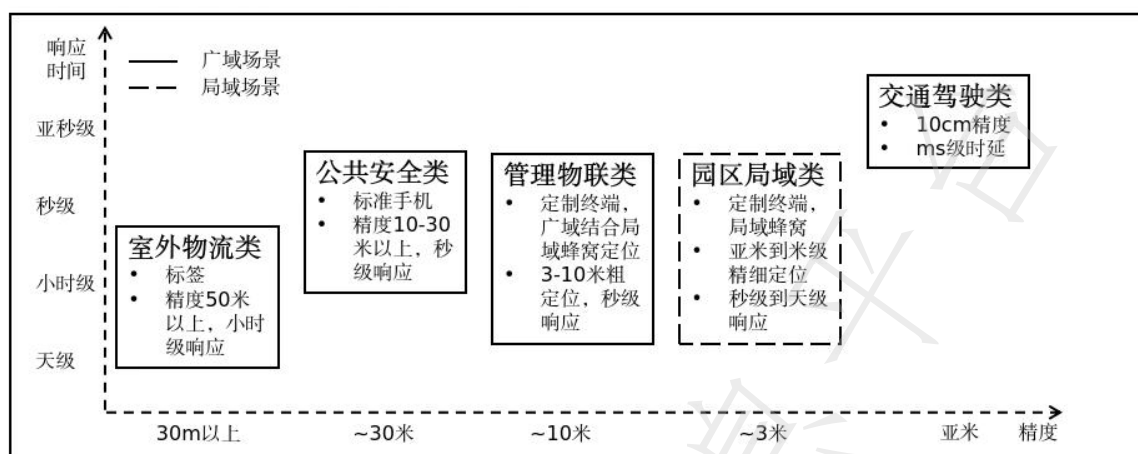


图2 典型行业定位业务需求

6.6.2 规划要求

6.6.2.1 5G蜂窝定位技术,应基于5G网络参数来定位。针对垂直行业的高精度定位需求,应引入UTDOA、RTT、AOA等定位技术,支持基于SRS/SRS for positioning或PRS参考信号测量终端位置,能提供2~3m的米级定位能力。

6.6.2.2 5G泛无线融合定位技术基于5G通信网络与蓝牙、超宽带技术(UWB)等泛无线技术融合定位,可提供米级和亚米级定位服务。通信网络宜支持提供供电、传输、站址、运维等资源,节约产业成本,达到一网多用的目的,5G泛无线融合定位架构见图3。

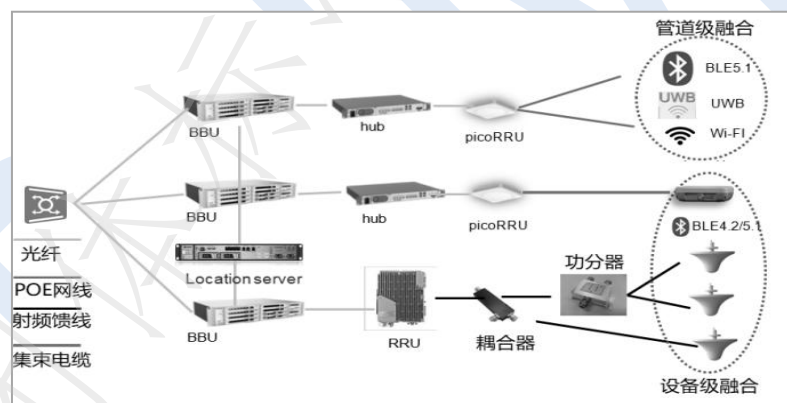


图3 5G泛无线融合定位架构

6.6.3 技术要求

6.6.3.1 网络架构要求

网络架构符合下列要求。

- 5G集中定位架构: 广域场景下,5G应能为交通、物流、司法矫正、金融支付等行业的移动终端进行实时定位,在GPS信号弱、有遮挡、天气不佳等情况下,能作为GPS卫星定位的补充方案,提供综合定位能力。针对局域场景下(例如园区、室内),应支持使用5G网络实现“一网双用”,同时满足数据业务和高精度定位业务,结合定位算法实现米级定位,定位时延缩短至秒级。
- 5G本地定位架构: 应引入部署在园区的本地位置服务功能提供本地位置服务,基于定位管理单元实现位置解算、位置信息与用户信息绑定等功能,由定位管理单元负责维护用户标识映射表用户映射。5G本地定位架构见图4。

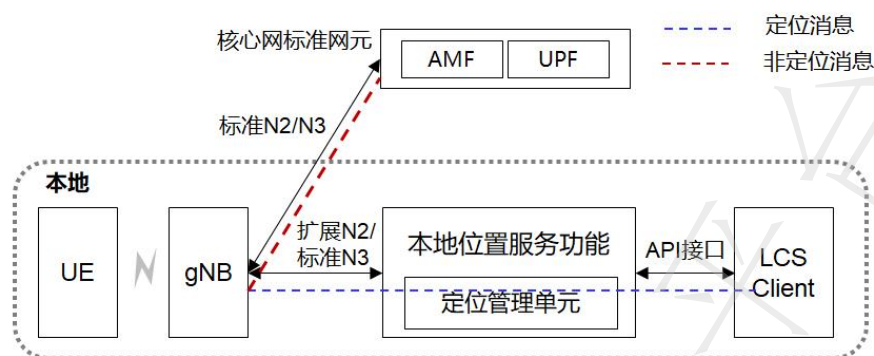


图4 5G本地定位架构

6.6.3.2 功能要求

功能符合下列要求：

- 应支持 SRS 或 SRS for positioning 参考信号的网络配置及接收测量，上报参考信号接收时间、信号强度 RSRP 等测量量；
- 应支持 NRPPa 协议流程及消息；
- 应支持 UTDOA 定位技术，能基于 SRS/SRS for positioning 测量并上报信号到达时间；
- 可支持 RTT 定位技术，支持下行定位参考信号 PRS 的配置与发送，能基于 SRS/SRS for positioning 和 PRS 测量并上报信号收发时间差；
- 可支持 AOA 定位技术，能基于 SRS/SRS for positioning 测量并上报信号到达角度；
- 本地化部署时应支持本地定位架构，支持响应本地定位请求，实现定位测量/上报等定位相关消息的本地转发；应支持扩展 NRPPa 协议，以支持基站与定位服务器的定位相关流程、信息交互；应支持各方定义接口，以支持定位服务器与第三方定位服务提供商的信息交互。

7 与其他协议对接

7.1 概述

工业互联网中的其他网络协议对接技术是实现设备间高效、可靠通信的关键。这些协议包括但不限于现场总线协议、工业以太网协议以及无线通讯协议等。

7.2 现场总线协议对接技术

在工业互联网中，现场总线协议应与其他网络协议进行对接，以实现更广泛的数据集成和互操作性，对接技术应符合下列要求。

- 协议转换技术：支持通过开发协议转换器，将现场总线协议的数据格式转换为其他网络协议（例如以太网、5G 等）可识别的格式，实现数据的跨协议传输。
- 网关设备：支持使用网关设备作为协议对接的桥梁，网关设备同时支持现场总线协议和其他网络协议，能接收现场总线设备的数据并将其转发至其他网络，同时接收来自其他网络的数据并将其转发至现场总线设备。

7.3 工业以太网协议对接技术

工业以太网协议对接技术应符合下列要求。

- 无缝集成：工业以太网协议与标准以太网协议兼容，与其他网络协议进行对接，实现设备之间的无缝集成。
- 实时性保障：支持通过优化网络架构和通信机制，确保工业以太网协议在数据传输过程中的实时性，满足工业控制对实时性的高要求。
- 安全性和可靠性：加强数据加密、身份认证和访问控制等安全措施，保障工业以太网协议对接过程中的安全性和可靠性。

7.4 无线通讯协议对接技术

无线通讯协议对接技术应符合下列要求。

- a) 低功耗与远距离传输：支持针对低功耗和远距离传输需求，优化无线通讯协议的性能和参数设置，确保数据传输的稳定性和可靠性。
- b) 网络安全：加强无线通讯协议的网络安全防护措施，例如使用加密技术保护数据传输过程中的安全性，防止数据泄露和非法访问。

7.5 5G 与其他协议的对接技术要求

7.5.1 协议转换

工业协议转换符合下列要求：

- a) 宜支持符合 5G 与主流工业协议（例如 EtherCAT、Profinet）的双向适配，支持协议转换功能（例如 OPC UA over 5G），协议应支持深度兼容及数据无缝交互，满足工业场景对确定性时延和时钟同步的需求；
- b) 宜支持 5G-A 的确定性网络技术（例如 5G 局域网、TSN、5G-TSN 等），支持工业控制端到端时延 ≤ 10 ms 或 20 ms；宜支持 TSN 协议栈；宜支持 5G-TSN 的融合；宜通过 UPF 下沉部署 TSN 转换网关，实现 5G 空口与 TSN 的时钟同步。

7.5.2 工业网关

工业网关符合下列要求：

- a) 应支持工业协议转换与接口适配，支持工业协议（例如 OPC UA、Profinet、EtherCAT）与 5G/5G-A 网络协议的双向适配转换，实现工业设备与网络之间的无缝连接；
- b) 应支持网关侧进行数据预处理，例如数据清洗、压缩、格式转换等，减少数据传输量；
- c) 应支持与工业控制器的直接接口，实现工业设备与网络的高效连接；
- d) 可支持工业控制器与网关侧的协同工作，实现工业控制系统的闭环控制；
- e) 应支持多种工业设备接口（例如 RS485、Modbus、CAN 等）与 5G 网络的接口适配管理，包括接口配置、状态监控、故障诊断等；
- f) 应支持工业设备与网络之间安全防护、故障冗余涉及，防止数据泄露和非法访问。

7.5.3 QoS 分级保障

QoS 分级保障应符合下列要求：

- a) 应具备 QoS 分级功能，支持为工业控制指令流分配最高优先级，保障其独占空口及传输资源；
- b) 应支持动态 QoS 策略，根据业务场景自动调整带宽与优先级参数。

7.5.4 安全性与可靠性

安全机制：应建立端到端的安全防护体系，采用加密、认证和访问控制等技术手段，保障工业控制系统和关键基础设施的安全稳定运行。

可靠性保障：应确保 5G 网络在工业互联场景中的高可靠性，提供稳定的网络连接和通信服务。

7.5.5 灵活性与可扩展性

灵活配置：应支持网络切片的灵活配置，满足不同工业场景下的多样化需求。

动态扩展：应支持网络资源和功能的动态扩展，适应未来新技术、新应用和新场景的需要。

7.5.6 实时性与低延迟

低延迟通信：应确保 5G 网络在工业互联场景中的低延迟特性，满足实时性要求高的应用需求。

实时数据处理：应支持利用多接入边缘计算（MEC）边缘计算平台实现实时数据处理和分析，提高生产效率和维护准确性。

7.5.7 兼容性

宜开发5G与工业协议的兼容适配技术，进行兼容性测试和认证工作，确保5G网络能顺畅地接入工业互联网生态系统。

参 考 文 献

- [1] YD/T 4492 工业互联网时间敏感网络技术要求
 - [2] IEEE Std 1588-2019 IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems
-