
基于免授权频谱的 LTE 工业无线互联专网宽带方案

华为技术有限公司

网络改造技术篇/成熟技术/工厂内网改造

1 概述

当前行业无线网络应用中，基于 Unlicensed 频谱的 WiFi 是主流无线网络技术，但 Wifi 有诸多问题，制约行业无线的应用发展，比如 WiFi 在非视距场景下覆盖难以满足；在移动或高密场景时延不稳定；自干扰系统连接不可靠；覆盖距离短导致 AP 站点数量众多，选址和安装都存在困难，维护成本高等。

随着 LTE 技术在移动宽带的广泛应用，行业逐步引入 LTE 技术提升网络性能，但 Licensed 频谱资源有限，基于 Licensed 频谱的 LTE 技术无法广泛应用，基于 Unlicensed 频谱的 LTE 技术应运而生，采用 Unlicensed 频谱提供 LTE 无线网络覆盖，兼有 Wifi 的组网便捷性和 LTE 的稳定可靠的高性能，重点解决生产业务流中的“痛点”：覆盖、连接高可靠、抗干扰，成为承载企业园区和工厂内网无线工业互联更优质的解决方案。

1.1 背景

随着行业数字化的持续深入，工业领域对连接的诉求越来越高，虽然现场总线、工业以太以及基于 Wifi、RFID 等的无线技术的使用，实现了部分工业设备的连接，但更大部分的工业设备

还属于没有任何连接的哑设备。据 HMS 公司分析，在工业领域的已连接部分，工业以太和工业无线持续发展，至 2018 年初，工业以太新增至 52% 的份额（年度首次超过现场总线的 42%），无线连接也以 32% 的增长率快速增长（但无线连接还仅占到 6% 左右的份额），随着工厂智能化的持续发展，工业领域对无线通信的期望越来越高。

但工业厂矿园区分布零散，场景复杂，不具备建设一张无线通信大网的条件，也很难获取区域性专用通信频谱；而基于免授权频谱的 Wifi 技术在工业领域的应用中，逐步暴露出**可靠性、安全性、稳定性、移动性**等方面的不足，难以胜任更高性能的工业无线通信需求。

1.2 实施目标

针对工业园区难以申请专用频谱，Wifi 性能又无法满足需求的状况，基于免授权频谱引入高性能 4G/5G 蜂窝无线技术，提升工业无线网络性能，匹配工业互联业务诉求，加快行业数字化进程，助力工业领域产业升级，推进加快中国智能制造 2025 宏伟目标的进程。

1.3 适用范围

eLTE-U 蜂窝无线专网解决方案主要适用于：

智能制造、仓储物流领域智能装备（AGV、UAV 等）的无线通信、生产管理人员移动办公等业务；智能工厂、智慧医疗、无人商店等领域的机器人无线通信业务；工业园区的移动巡检、移动

视频、数据回传等业务；港口码头 AGV 转运车调度控制、RCMS 吊机检测、堆场管理等 TOS（港口运营管理）业务；轨道交通生产领域的 CBTC 业务、PIS 业务、CCTV 等车地无线业务等。

表 1 业务应用及场景特点

业务应用	场景特点
各类型 AGV 控制通信	仓储分拣 AGV：小型空旷环境，AGV 密度大，网络容量要求高； 工厂、仓储搬运 AGV：无线环境复杂，工程复杂，移动范围较广，通信可靠性、稳定性要求高，对时延有要求
机器人无线控制通信	活动范围大小不一，移动性要求高，自主控制类机器人要求具备点对点通信能力；
工控类无线通信业务	主要承载生产网安全控制数据，要求超低时延、高可靠性，通信速率要求不高；
无线视频监控业务	摄像头分布散，距离远，走线困难的场景是优势场景； 环境恶劣，要求设备支持高防护等级；
移动巡检业务	电力变电站无人巡检：要求无缝覆盖以支持机器人无人自动巡检，站内不能安装无线设备，设备仅能安装在周边。 工业园区巡检：终端需支持数据回传、视频回传以及 RFID 等近距离无线采集能力，油气石化等特殊行业有防爆要求；
港口 TOS 业务	港口泊位区金属遮挡严重，堆场区面积大，巷道长，干扰多，主要可视距传输，部分场景会有遮挡，无线基站只能安装于灯塔等设施，近海场景，需抗盐雾腐蚀。
地铁车地业务	要求支持高速移动(最高支持 120km/h)条件下稳定高可靠通信(CCTV 业务)，和无线大带宽需求（上行 CCTV，下行 PIS 等业务）、轨旁设备状态回传要求大容量接入能力等。

1.4 在工业互联网网络体系架构中的位置

eLTE-U 无线专网解决方案主要针对《工业互联网体系架构》

内的工厂内网场景,承载智能机器(如 AGV 等)与工厂控制系统、智能机器与智能机器、工厂控制系统与工厂云平台等之间的信息交互与通信需求。eLTE-U 通信技术提供的高可靠、高性能、可移动的数据传输能力,可以减少工厂内网复杂环境下有线传输线缆的部署,适用于多种工厂内网环境的无线通信需求场景。

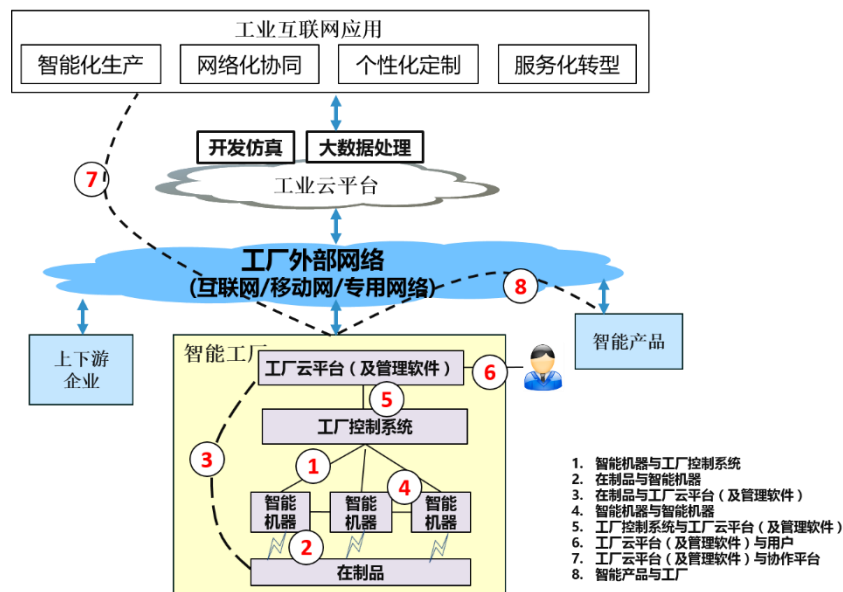


图 1 工业互联网互联示意图

2 需求分析

2.1 智能制造、仓储物流等 AGV 业务需求

AGV: (Automated Guided Vehicle) 是智能工厂/智慧仓储的重要装备,已经被越来越广泛地应用在各个行业中,不同种类 AGV 的应用场景差异较大,综合而言,AGV 对无线通信的需求主要体现在以下几个方面:抗干扰、支持移动性,通信性能稳定(时延 <100ms),分拣仓库等特殊场景要求支持较大容量(单小区支持超过 100 台 AGV)等。

2.2 工业和服务机器人业务需求

机器人通信业务，除了和 AGV 类似的抗干扰、支持移动性、稳定性等方面的需求，为实现智能工厂、智慧医院、无人商店等场景服务机器人之间的信息实时交互，还要考虑支持机器人两两之间的点对点通信，便于由当前主流的集中式控制机器人向更高级、更智能的自主控制机器人发展演进。

2.3 港口 TOS 系统业务需求

可以按照场景分为两大类：场景 1：地面深度覆盖（AGV）场景，主要需求：移动性、小带宽、低时延、可靠连接（中低速移动：约 30Km/h，时延：<100ms；带宽：下行<100Kbps；上行：100~150Kbps；高可靠性：普遍要求网络和设备冗余，保障业务的连续性）；场景 2：上行大容量（CCTV&视频监控类）场景，主要特点：上行带宽要求高、低时延、抗干扰和高可靠性（低时延：<150ms，上行大带宽：单用户上行带宽典型 10+Mbps，支持 3~10 路视频的回传和监控；抗干扰和高可靠性：优于 WiFi 的抗干扰的连接，需要考虑网络备份和冗余）。

2.4 轨道交通业务需求

CCTV 视频监控业务需求：

- 1) 要求每小区可同时进行上行至少 2 路视频传输；
- 2) 要求每路视频传输速率至多 2Mbps；
- 3) 要求传输时延不超过 500ms 概率不小于 98%；
- 4) 要求丢包率不大于 1%。

PIS 业务需求：

-
- 1) 要求支持广播或组播通信;
 - 2) 要求能够传输图像分辨率为标清或高清的视频, 要求传输速率为下行 2~8Mbps;
 - 3) 要求传输时延不超过 500ms 的概率不小于 98%;
 - 4) 要求丢包率不大于 1%。

3 解决方案

3.1 方案介绍

eLTE-U 解决方案是给企业提供的面向生产业务的工业级宽带无线互联网络解决方案, 包含有企业业务引擎 eCore 核心网, unlicense 网络接入基站 AirNode, 接入终端 CPE 和可以集成到行业终端的 MiniPCIe 数据卡。

eLTE-U 解决方案主要包含有以下网元和设备:

eCore 核心网: eCore 作为业务控制核心网络设备, 为业务提供高可靠的核心接入控制和数据交换处理功能, 通过 SGi 接口通过 IP 网络接入客户业务平台。

基站 AirNode: eLTE-U 室外型基站 AirNode, 提供 unlicense 频谱的无线接入设备, AirNode 采用 POE 供电和传输, 既支持内置天线, 也可以 N 型射频接头外接射频天线, 支持抱杆和挂墙安装。

CPE/ MiniPCIe 卡: CPE 提供对应的 unlicense 频段的接入功能, 可以和客户视频摄像头、交换设备连接, 支持 POE 供电和 IP 接口传输。MiniPCIe 卡可以集成到行业终端, 为行业终端提

供数据接入业务。

网管：完成对企业无线网络设备的管理和控制，对设备进行远程维护升级和监控功能。

3.2 系统架构和网络拓扑

eLTE-U 无线工业互联网解决方案的基本组网系统架构如下图所示：

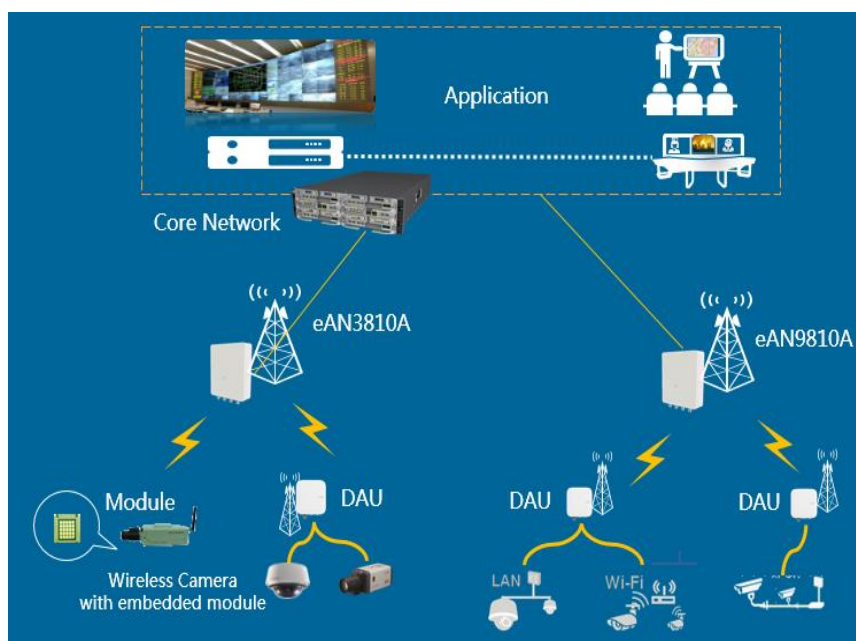


图 2 基本组网系统架构

网络整体自上而下分为三层：最上层是业务应用层，中间是有 eCore 核心网和基站 Airnode 按星型组网组成的网络层，最下层是终端接入层，业务应用层和网络层之间通过 IP 有线连接按照开放的 API 互通，网络层和终端接入层之间通过无线空口连接。

eLTE-U 解决方案有两种组网方式，一种是上图左边的组网：核心网+AirNode e+终端，另一种是上图中右边的组网：兼有核心网和基站功能的 AirEdge +终端。

两种组网方式的区别如下：

表 2 eLTE-U 解决方案组网比较

组网	核心网+AirNode +终端	AirEdge +终端
特点	AireNode 连接核心网，核心网再连接应用服务器，支持跨基站切换，支持完整的 QoS 控制和数据路由等功能	无须核心网，AirEdge 通过网口连接应用服务器，不支持跨基站切换和 QoS 控制等核心网等功能

3.3 功能设计

eLTE-U 无线专网支持如下功能特性：

在 5.8GHz 免授权频谱上使用 LTE 宽带技术，支持高速数据宽带网络接入，支持数据回传和视频监控，行业终端设备可以通过网线连接到 eLTE-U 的终端 CPE，也可以集成 MiniPCIe 卡，在网络覆盖区内，提供稳定、可靠数据通信服务。

- 公共业务：完成对用户签约信息的管理和网元间的同步；完成用户的开机注册、关机注销；终端 Idle 状态下的移动性管理和周期性发起跟踪区更新等。
- 数据业务：完成各种速率数据业务，完成移动状态下的业务跨小区、跨基站的切换，完成数据业务漫游等功能。
- 组网功能：支持 VLAN；支持配置 IPV4 路由；支持基站星型组网等。
- O&M 功能：支持进行各项操作维护。如：设备维护时支持单板复位等。
- 传输业务功能：支持多基站配置；减少端到端信道时延；完成多个基站星型组网时的数据转发。

-
- 传输配置功能
 - 实现网口参数配置，如通过 MML 可以配置速率，双工模式，自适应等参数。
 - VLAN 参数配置，通过 MML 可设置网口的 VLAN ID 和 VLAN 优先级。
 - 支持通过 MML 配置、删除、查询 IPV4 路由。
 - 终端 CPE 支持防火墙服务：
 - 防火墙开关：启用或禁用网络连接的防火墙。
 - 局域网 MAC 地址过滤：通过 MAC 地址限制局域网内的特定设备访问网络。
 - 局域网 IP 过滤：阻止特定的 IP 地址访问在本地网络的计算机。
 - URL 过滤：禁止局域网内设备访问特定的 URL。
 - MiniPCIe 数据模块，可应用于行业客户进行终端二次开发。该模块集成到终端中，作为 LTE Modem 使用，提供无线数据接口，实现空口数据传输功能。

3.4 关键技术

3.4.1 IRC 抗干扰算法

IRC(Interference Rejection Combining 干扰抑制合并)是一种分集合并技术，能够消除干扰。与采用了 MRC 的分集式天线相比，采用 IRC 的分集式天线能够消除干扰信号，只选择“好的”信号进行接收(如下图示意)。在干扰受限的区域，与 MRC 相

比，IRC 能产生将更大的增益。这一增益能够带来网络质量的提高和更好的室内覆盖。IRC 接收机信号接收示意图如下。

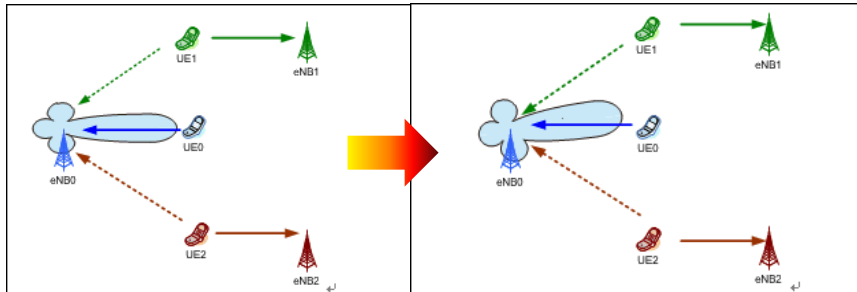


图 3 IRC 接收机信号接收

IRC 增益：IRC 接收机旨在提高接收信号中的发送信号成分与噪声成分的功率比，获得分集增益和阵列增益，从而提高系统性能。除此以外，IRC 接收机还可以提供额外的干扰消除增益，达到进一步提高系统性能的目的。IRC 利用干扰的空间有色特性抑制同频干扰，增强覆盖。IRC 要求有多个接收天线，单天线接收是无法获得 IRC 增益的。

3.4.2 DL power boosting 覆盖增强技术

DL Power Boosting 是一种增强 LTE 下行覆盖的一种调度方式，当 UE 处于小区边缘并且低速率业务要求时，通过 power boosting 调整每个被调度下行资源块组 (RBG) 的发射功率，使得 RBG 组的功率集中在一个 PRB 发射，提升单个 PRB 的功率谱密度，可有效提升小区边缘低速率业务用户的解调性能，增强下行覆盖。

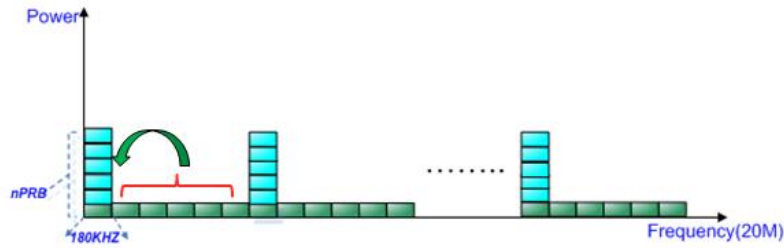


图 4 DL power boosting 示意图

3.4.3 DL TTI Bundling 下行覆盖增强技术

DL TTI Bundling 是指在 N 个连续的 TTI 上传输同一个数据块，N 个绑定的 TTI 作为同一个资源进行处理，不同的 TTI 传输同一个数据块的不同 HARQ 冗余版本。对小区边缘的下行 SINR 较低，位于小区边缘的终端可以通过 TTI Bundling 特性在连续子帧中发送相同的数据块，减少重传，降低 RTT 传输所需要的时间，充分利用 HARQ 合并的增益，提高 LTE 下行覆盖。

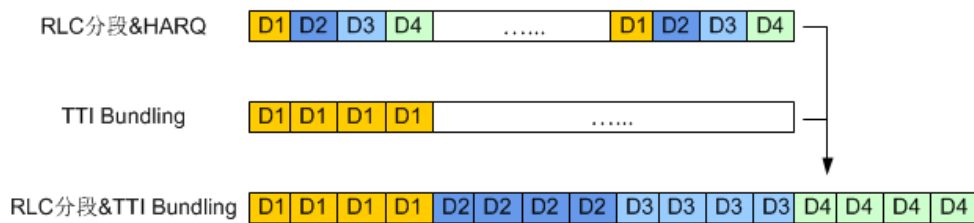


图 5 TTI Bundling 示意图

3.4.4 MIMO 容量增强技术

多入多出 (MIMO: Multi-Input Multi-Output) 或多发多收天线 (MTMRA) 技术是无线移动通信领域智能天线技术的重大突破。MIMO 技术能在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率，也是第四代移动通信系统采用的关键技术。

MIMO 系统在发射端和接收端均采用多天线和多通道。根据收发两端天线数量，MIMO 还可以包括 SIMO (Single-Input Multi-

ple-Output) 系统和 MISO (Multiple-Input Single-Output) 系统。本质上来讲, 如果每对发送接收天线之间的衰落是独立的, 这样就产生多个并行的子信道。在发射端, 传输信息流经过空时编码形成 N 个信息子流。这 N 个子流由 N 个天线发射出去, 经空间信道后由 M 个接收天线接收。多天线接收机根据各数据流的空间特性, 利用先进的空时编码处理能够分开并解码这些数据子流。这样在这些并行的子信道上传输不同的信息流, 使得同样的频率带宽下, 传输速率倍增。示意图如图 6。

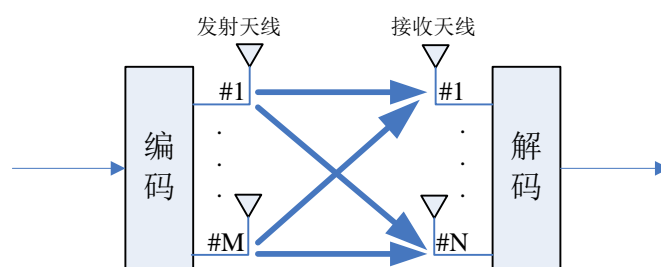


图 6 通用的 MIMO 形式

3.4.5 上行 64QAM 容量增强技术

上行 64QAM 是 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 和 16QAM 的一个补充调制方案。UL 64QAM 旨在增加好信道条件下 UE 的比特率。使用 QPSK 时, 每符号承载两信息比特; 使用 16QAM 时, 每符号承载四信息比特。使用 64QAM 时, 每符号可以进行六信息比特调制。因此, 64QAM 可以极大提高上行的系统容量。

根据无线环境的质量, eNodeB 可以选择不同阶次的 QAM 调制方案。如果 UE 离 eNodeB 非常近或是处在一个好的无线环境下, 那么 eNodeB 能够选择最高阶 QAM 调制 (64QAM 方式) 和较大

的传输块进行上行传输，从而实现更高的数据速率。

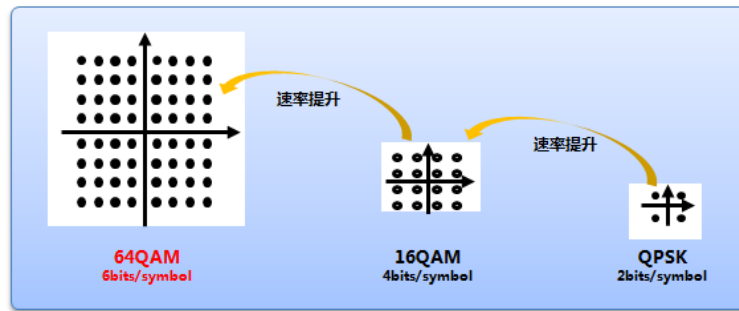


图 7 上行 64QAM 方式

3.5 安全及可靠性

3.5.1 安全性

LTE 支持终端和基站之间的双向认证保证终端和基站的合法性，控制信令支持 NAS 加密保证信令安全。

- 设备和基站之间的双向认证。
- AES128 / 256 位空中接口加密。
- IPSec 确保基站与视频平台之间的安全。

3.5.2 可靠性

基站可靠性：

- 支持全面故障检测功能，包括硬件、软件、天线、传输、小区。
- 支持故障隔离和自愈功能，确保局部故障不影响系统中的其他部分。此外，还支持降规格建立小区，将故障对业务的影响降至最低限度。

eLTE-U 核心网具有以下软、硬件可靠性：

- 分布式设计：采用分布式的硬件结构，通过功能的模块化

设计实现分布式处理，各模块功能相对独立，并分别由不同的处理机负责控制，一个处理机的故障不会影响整个系统的正常运行。

- 冗余设计：硬件广泛采用主备用、负荷分担、冗余配置等可靠性设计方法，确保了硬件系统的可靠性；关键部件均采用多处理机冗余技术，采用主备进程运行方式。在正常情况下，主用处理机控制模块的运行，备用处理机则实时与主用处理机保持同步；一旦主用处理机故障，备用处理机将立即投入运行接替主用处理机控制模块，从而保证系统的业务不中断。业务模块与接口模块采用负荷分担的设计方式，两块或多块模块在正常工作时，均承担相同的处理功能，而当其中一个模块出现故障时，在保证一定性能指标（如呼损）的前提下，由其它模块完成故障模块的处理任务，不影响系统正常工作。IP 接口支持物理备份，确保与 IP 承载网之间的 IP 路由的可靠性。
- 供电可靠性：采用分布式供电方案，冗余备份的双供电系统，具有防雷、断电保护、电压和电流的过高过低保护等功能。若系统掉电，系统支持整机掉电重启时间小于 5 分钟。机框的电源模块采用 1+1 备份的冗余设计，确保在一个电源模块出现故障时，不影响系统的正常工作。
- 容错能力：通过对关键软件资源定时检测、实时任务监控、存储保护、数据校验、操作日志信息保存等手段，可有效

地防止小软件故障对系统所造成的冲击，提高软件系统的容错能力（即软件错误情况下的自愈能力）。

- 故障监视及处理：核心网具备自动检测与诊断系统软硬件故障的功能，可对故障硬件实施自动隔离、倒换、重新启动、重新加载等处理。
- 支持热补丁：在设备的运行过程中，支持对主机软件打热补丁的功能，可以在不影响系统业务的情况下实现对主机软件的动态在线升级，有利于提高通信服务质量。

3.5.3 系统可靠性指标

系统可靠性指标如表 3 所示。

表 3 系统可靠性指标

指标名称	指标值
典型配置系统可用度	≥99.999%
系统平均故障间隔时间 MTBF	≥24 年（满配置） ≥42 年（单框）
系统平均故障修复时间 MTTR	≤1 小时（不含准备时间）
冗余备份机制	1+1 备份

3.6 解决方案亮点

3.6.1 抗干扰能力强

干扰检测：

- 检测及时：最快 1ms 级别的检测。
- 检测全面、精细：全系统检测、系统内子带宽级（180KHz）的信道监测。

干扰抑制：

- Turbo 纠错编码。
- HARQ 重传机制，增加抗干扰能力。
- UL IRC，干扰最小化的合并，有效抑制各类干扰。

干扰控制：

- 支持 MCS0~MCS28 共 29 阶调度，适应更多不同程度的干扰场景。
- MCS 自适应调整，有效利用非(弱)干扰资源。
- 下行固定/动态功控；上行开环/闭环功控算法，避免产生网络自干扰。

干扰躲避：

- (上/下行)频选调度：根据每个终端的信道状况，优先分配干扰小，信号质量高的子带频率资源。
- 子带级资源分配，避免干扰，有效利用非干扰资源。
- GPS 同步，整网同步的上下行独立调度，TDD OFDMA 高效全双工。

3.6.2 覆盖距离更远

eLTE-U 的覆盖距离是 Wi-Fi 的 2~3 倍。主要原因是 eLTE-U 的接收灵敏度相比 Wi-Fi 高 10dB，并且采用了 Power boosting 技术。

3.6.3 移动性更好

eLTE-U 基于蜂窝通信系统设计，有完善的切换机制，切换时

延可以控制在 50ms 以内，不丢包。而且，eLTE-U 支持自动频率校正 AFC 技术，能够消除快速移动引起的频率偏移，eLTE-U 的功率控制和信号检测更加精细，适应快速移动时信号的快速变化，尤其适用于地铁车地通信等高速移动的场景，可以支持 160 公里/小时的移动速度。

3.6.4 同时在线用户更多

eLTE-U 可以支持 100 个以上的用户，并不会降低小区整个吞吐率速率。LTE 5 用户小区吞吐量比 WiFi 的高 93%，传输时延低 80%。LTE 多用户的小区吞吐量相对单用户基本持平，WiFi 随着用户数增多，小区吞吐量快速下降。

3.6.5 QoS 保障机制完善

为了满足不同业务类型和用户等级对不同传输性能（例如带宽，优先级，时延和吞吐量）的要求，eLTE 解决方案为用户提供端到端 QoS 保证机制，确保服务质量合理利用网络资源。eLTE-U QoS 保证机制可以根据用户最大速度，最小速度，传输延迟，丢包率和一系列 QoS 指标的服务要求，确定用户特定的 QoS 等级。通过高级访问控制，无线资源管理，传输资源管理算法确保系统性能，并保证差异化服务和用户的信号传输质量。

3.6.6 传输时延更低

传输时延最小 20ms。跨小区切换时延小于 50ms。洋山港项目实测，单小区多用户（>60 用户/小区）调度状况下，单用户端到端平均传输时延稳定在 50ms 左右。

4 成功案例

eLTE-U 网络解决方案已于 2017 年成功服务于华为东莞松山湖 HUB 仓自动化物流项目，海康机器人公司基于华为创新的 5.8GHz 免授权频谱 eLTE-U 无线专网方案，为该仓库提供智能仓储 AGV 及配套设备，实现仓库 7000 平方米的自动物流运输，大幅度的提高仓库运作效率。



仓库内景

基站及天线位置

AGV 小车

图 8 现场设置

由华为 eLTE-U 工业级蜂窝无线网络、海康智能仓储机器人、机器人调度系统（RCS）和智能仓储管理系统（iWMS）四大核心模块组成的智能仓储解决方案，以机器换人为核心理念，工人只需在工作台操作终端进行必要的操作，就实现了仓库“货到人”的先进技术，提升了仓库整体运作效率。

eLTE-U 商用组网的另一个典型案例是上海洋山港四期自动化码头项目。上海洋山港是我国最大的集装箱深水港，洋山港四期项目中，华为公司联合振华重工集团建设了覆盖洋山四期全码头的 eLTE-U 无线专网，将港口 TOS 业务系统、集装箱水平运输系统和安全监控系统等无缝融合，引入大型 AGV 集装箱自动化搬

运技术，实现集装箱搬运“无人化”作业，集装箱在码头的搬运全部靠无人驾驶的大型 AGV 车完成。洋山四期码头自 2017 年 12 月 10 日商用开港以来，没有发生过一次因为网络问题而导致的业务停摆，可靠性得到充分检验和验证，助力洋四码头以全球最大的全自动化集装箱码头贯彻国家“一带一路”战略，并通过经验分享，模式复制，引领全球全自动化码头建设。



图 9 上海洋山港设备布设