



## 面向5G ToB的确定性通信高可靠关键技术研究

孙逊<sup>1</sup>, 宋旭光<sup>1</sup>, 马洪源<sup>2</sup>, 冯志强<sup>1</sup>, 卢友伟<sup>1</sup>

(1. 中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080;

2. 中国移动通信集团有限公司, 北京 100032)

**摘要:** 针对工业制造、智能驾驶等面向垂直行业的超可靠低时延通信 (ultra-reliable low-latency communication, uRLLC) 业务, 当前国际标准移动通信网络通过系统级双路冗余传输方案等确定性通信技术解决低可靠性问题。然而, 当前技术存在对芯片/终端要求高、发展受制于终端模组、对通信核心网N3/N9接口占用资源翻倍等问题。基于此, 提出“双发选收”解决方案, 不需要将终端芯片升级改造, 仅在用户面功能 (user plane function, UPF) 侧进行了功能改造以支持报文的冗余处理, 提高了网络的可靠性能力, 与工业制造核心场景契合。

**关键词:** 工业制造; 确定性通信; 高可靠; 双发选收; uRLLC

中图分类号: TN915

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.DXKX250128

## Research on key technologies for deterministic and high-reliability communication in 5G ToB network

Sun Xun<sup>1</sup>, Song Xuguang<sup>1</sup>, Ma Hongyuan<sup>2</sup>, Feng Zhiqiang<sup>1</sup>, Lu Youwei<sup>1</sup>

1. China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China

2. China Mobile Communications Group Co., Ltd., Beijing 100032, China

**Abstract:** For ultra-reliable low-latency communication (uRLLC) services targeting vertical industries such as industrial manufacturing and intelligent driving, current international mobile communication standards address low reliability issues through deterministic communication technologies like system-level dual-link redundant transmission schemes. However, existing technologies face challenges such as high requirements on chipsets and terminals, development constraints due to terminal modules, and doubled resource consumption on N3/N9 interfaces of the core network. Based on this, the “dual-transmission and selective-reception” solution was proposed. It did not require upgrades or modifications to terminal chips. Instead, only functional modifications were made on the user plane function (UPF) side to support redundant processing of messages. This enhanced the network’s reliability, making it well-suited for core industrial manufacturing scenarios.

**Key words:** industrial manufacturing, deterministic communication, high reliability, dual-transmit and selective-receive, uRLLC

## 0 引言

自2020年开始,移动运营商基于第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP) Release 15 (Rel-15)版本开展5G独立组网(5G standalone, 5G SA)核心网建设, Rel-16版本重点围绕专网能力进行了设计与增强,完善了超可靠低时延通信(ultra-reliable low-latency communication, uRLLC)<sup>[1]</sup>、海量机器类通信(massive machine-type communication, mMTC)<sup>[2]</sup>、增强移动宽带(enhanced mobile broadband, eMBB)<sup>[3]</sup>三大业务场景,同时,面向需要网络提供确定性通信能力<sup>[4]</sup>的应用,进一步定义了基于移动通信网的确定性网络。

确定性网络的业务应用场景复杂多样、通信需求各异。其中,交通运输(如无人驾驶/辅助驾驶)、工业控制应用、智能电力控制、交互式的远程医疗诊断或治疗等应用均需要网络提供确定性保障。确定性网络的核心目标是保持通信网络的稳定性和可靠性,实现通信路径的时延、抖动可控以及高精度时间同步,从而为用户提供确定性通信服务。

5G SA架构中的核心网网元包括接入与移动性管理功能(access and mobility management function, AMF)网元、策略控制功能(policy control function, PCF)网元、统一数据管理(unified data management, UDM)网元、统一数据存储(unified data repository, UDR)网元、会话管理功能(session management function, SMF)网元、用户面功能(user plane function, UPF)网元、网络存储功能(network repository function, NRF)网元。在5G移动通信网络架构中,网络为用户终端(user equipment, UE)至数据网络(data network, DN)间的会话通道,使用户可以完成端到端的通信。

移动通信网络中的确定性通信可分为三大维

度的能力。第一维度是高精度时间同步<sup>[5]</sup>,主要目标为同步精度,为端到端网络节点提供确定的“时基”,是保证抖动,尤其是转发抖动的前提;第二维度是确定性时延及抖动<sup>[6]</sup>,其中确定性时延的主要目标是保证最低时延、提高时延置信度以及保证平均时延,确定性抖动的主要目标是保证最大传输抖动、提高抖动置信度;第三维度是确定性高可靠<sup>[6]</sup>,主要目标为提升网络可靠性,降低丢包率,保证最大丢包率、最大连续丢包数。

3GPP<sup>[7]</sup>对低时延、高可靠业务场景进行了定义,称为uRLLC。确定性通信的第二维度、第三维度能力与uRLLC业务场景相匹配,主要聚焦于高可靠、低时延<sup>[8]</sup>两个技术实现方案的推进,可以广泛应用于如增强现实/虚拟现实(augmented reality/virtual reality, AR/VR)、工业控制系统、交通运输(如无人驾驶)、智能电网和智能家居的管理、交互式的远程医疗诊断等<sup>[9]</sup>。本文主要针对uRLLC场景进行技术方案分析与探讨。

## 1 国际标准uRLLC技术方案分析

### 1.1 低时延技术方案

对于低时延需求的网络关键技术,主要通过以下两种方式进行解决。

方式1: UPF网元分层级设置。对于低时延要求较高的客户,用户面下沉至客户侧机房设置,使媒体面路由疏通最优、路径最短、时延最低。

方式2: 增强无线侧至核心网侧的空口能力。通过优化基站到核心网的空口调度算法,降低平均时延,同时进一步优化时延指标、提升多用户并发支持能力。

### 1.2 高可靠技术方案

在工业生产场景中,移动通信网络相较于有线网络,其故障更易出现在无线空口链路或由UE节点故障引发,因此,空口和UE的可靠传输



是关键。

当前，uRLLC技术的主要思路是通过系统级双路冗余传输方案来实现，用户数据包经由两个不相交的路径重复且同时传输给接收方，接收侧对冗余数据包进行消除处理，下行则按照反向流程进行重复发送和冗余消除处理。采用上述冗余传输方案，即使其中一条路径的数据包传输偶尔会失败或超出时延的要求，业务仍然可以避免服务故障。

在国际标准中，目前存在3种系统级双路冗余传输标准方案，用于实现移动通信网络的高可靠传输，分别为双连接冗余传输方案、双N3/N9隧道冗余方案，以及双连接冗余增强方案。

### 1.2.1 双连接冗余传输方案

双连接冗余传输方案为3GPP标准Rel-16方案<sup>[10]</sup>，该方案主要在UE与DN之间构建了双连接冗余路径，且UE可以感知到该冗余路径的存在。双连接冗余传输方案示意图如图1所示。

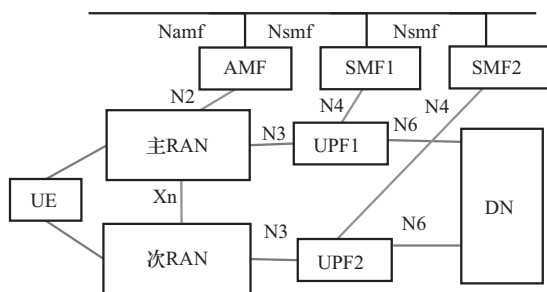


图1 双连接冗余传输方案示意图

本方案的技术要点如下<sup>[11]</sup>。

(1) 在UE和外部DN之间建立两个独立的协议数据单元(protocol data unit, PDU)会话，UE在创建会话请求时会携带冗余序列号(redundancy sequence number, RSN)，以此标识两条冗余会话。

(2) 无线接入网(radio access network, RAN)侧的覆盖范围要满足冗余需求，能够依据RSN支持创建双连接。

(3) SMF根据RSN选择不同的UPF，UPF的

部署需要支持冗余用户面路径。

(4) UE和DN中的应用层需要支持包复制和包去重能力。

(5) RAN和UPF之间的传输网络支持冗余路径(此项为可选)。

### 1.2.2 双N3/N9隧道冗余方案

双N3/N9隧道冗余方案同样是3GPP标准Rel-16方案<sup>[10]</sup>，该方案主要是在核心网与基站之间建立双连接冗余路径，且UE无法感知到该冗余路径。双N3/N9隧道冗余方案示意图如图2所示。

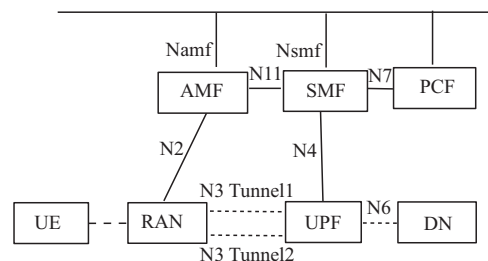


图2 双N3/N9隧道冗余方案示意图

本方案的技术要点如下。

(1) 在基站与UPF之间针对同一个PDU会话建立两条独立的N3隧道，或同时建立两条独立的N3隧道和N9隧道。

(2) UPF和RAN侧在隧道信息中提供不同的路由信息，以确保两条N3隧道使用不同的传输层路径。

(3) UPF负责执行包复制和包去重操作。

### 1.2.3 双连接冗余增强方案

双连接冗余增强方案为3GPP标准Rel-17方案<sup>[12]</sup>，该方案主要新增了PDU会话对ID来增强用户面冗余的灵活性和高效性。双连接冗余增强方案示意图如图3所示。

本方案的技术要点如下。

(1) UE根据本地机制或匹配的UE路由选择策略(UE route selection policy, URSP)规则，生成PDU会话对ID或RSN，或同时携带PDU会话对ID和RSN。

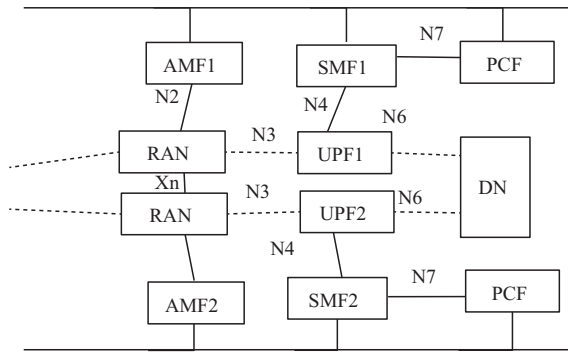


图3 双连接冗余增强方案示意图

(2) 当 UE 建立冗余 PDU 会话时，可在每个 PDU 会话建立请求中包含 PDU 会话对 ID 或 RSN，或同时包含 PDU 会话对 ID 和 RSN。

(3) 基站与 UPF 之间建立同一个 PDU 会话的两个独立的 N3 隧道，或两个独立的 N3 隧道和 N9 隧道；UPF 和 RAN 侧在隧道信息中提供不同的路由信息，使两个 N3 隧道使用不同的传输层路径。

(4) UPF 执行包复制和包去重功能。

上述 3 种方案中，方案 3 在方案 1 的基础上，优化了冗余会话处理机制，可靠性能最佳，但端到端 (end-to-end, E2E) 双连接对芯片/终端要求极高；方案 2 的可靠性提升效果较差，仅适用于 N3 或 N3/N9 故障时的业务保障，对于 RAN 和 UPF 之间回传网传输质量较高的运营商而言，部署意义不大。综上所述，方案 3 为最佳方案，但需要进一步推进上下游产业成熟，推进标准方案落地部署。高可靠技术方案分析对比见表 1。

## 2 运营商定制“双发选收”关键技术与策略分析

### 2.1 定制“双发选收”技术方案

2020 年以后，国内运营商正式步入 5G 商用

时代，启动了 5G 专网建设，主要应用于园区数采、视频回传、仓储管理等辅助生产环节，采用常规 5G 组网方式即可满足场景要求。然而，对于部分特殊场景，现有 5G 组网方式不能满足需求，尤其是工业制造的核心生产场景需求极为迫切，具体体现为以下两大需求。

第一，工业产线调整频繁，有线接入需要解决调整周期过长、成本过高的问题<sup>[13]</sup>，需要引入 5G 局域网 (local area network, LAN) 能力，具备工业产线终端内部互通、IP 地址灵活分配、终端配对自由调整等技术优势，可满足产线快速调整的需求，该功能为既有成熟 5G 方案。

第二，工业产线对业务连续性要求高，网络需要支持高可靠能力，为工业产线终端提供稳定服务<sup>[14]</sup>，但基于本文 1.2 节的分析，标准 5G 高可靠方案对终端芯片要求高，当前无可用终端产品，且对控制面 SMF、UDM 均有较大的功能改造要求，运营商网络目前不支持。

基于上述需求场景，运营商定制了“双发选收”解决方案，仅在 UPF 侧进行了功能改造以支持报文的冗余处理，提高了网络的可靠性能力，同时又兼容现有的 5G LAN 标准能力，与工业制造核心场景完美契合。该方案涉及功能定制改造的移动通信类网元只有 UPF，不需要终端芯片升级改造即可支持，技术要点如下。

#### 2.1.1 双 UE/模组产生双会话

由前文分析可知，标准方案对于 5G 终端芯片要求较高，产业成熟度差，具体表现为：一方面，5G 终端需要具备产生双会话、处理冗余会话的能力；另一方面，需要通过 N1、N2 的空口

表 1 高可靠技术方案分析对比

对比项	方案 1: 双连接冗余传输方案	方案 2: 双 N3/N9 隧道冗余方案	方案 3: 双连接冗余增强方案
可靠性提升效果	优: 标准待完善	较差: 存在空口-UPF 单点故障	最佳: 可靠性最高
资源需求	高: 无线、UPF、SMF 翻倍	中: N3/N9 相关资源翻倍	最高: E2E 翻倍
网络改造范围	中: 终端、RAN 侧、核心网控制面及用户面需要改造	小: 终端无要求, RAN 侧、核心网用户面需要改造	大: RAN 侧无要求, 终端、核心网控制面及用户面需要改造



传递结对会话标签，如方案1需要通过空口传递RSN，方案3需要传递PDU会话对ID或RSN、或同时携带PDU会话对ID和RSN，方案2可靠性较差，不推荐。

在定制“双发选收”方案中，工业产线终端可通过两种方式接入基站：一是接入工业网关内置的双5G模组；二是采用帧复制与消除冗余（frame replication and elimination for redundancy, FRER）交换机+双5G UE的方式（具体详见3.1节）。工业网关内置的双模组或FRER交换机后端的双UE在接入基站前，会产生两个会话，并携带“双发选收”标签至5G基站（generation NodeB, gNB），发起注册和接入网络申请，同时建立移动通信会话。综上所述，该方案解决了终端芯片改造难度大的问题。

### 2.1.2 网络功能裁剪与定制

标准方案的网元改造范围大，网络改造成本高，业务流程及方案复杂。在定制“双发选收”方案中，基站以及控制面网元AMF、SMF均不进行改造，不解析“双发选收”标签，将工业网关内置的双模组或FRER交换机后端的双UE产生的会话请求等同为两个不同的会话进行处理，仅基于用户签约的数据网络名称（data network name, DNN）为两个会话选择同一套UPF，并将该UPF的ID及隧道信息通过基站发送至UE侧。

工业网关内置的双模组或FRER交换机后端的双UE分别获取目标UPF的ID及隧道信息后，建立与UPF的媒体面会话。UPF进行功能改造，基于“双发选收”标签对双会话进行冗余数据包

的处理，即对携带同一对“双发选收”标签的会话执行上行报文去重并与应用侧互通，同时进行下行报文复制，之后再分别转发至双模组或双UE。

综上所述，该方案实现了减少移动通信网络的网元改造范围、降低网络改造成本、简化业务流程、降低方案实现复杂度的目的。

运营商定制“双发选收”技术方案示意图如图4所示。

## 2.2 “双发选收”方案协议分析

“双发选收”方案的核心是对报文的冗余处理，如何针对冗余报文进行复制和去重，3GPP标准并未做具体定义，因此，可以依靠上层协议定义。目前比较流行的有并行冗余协议（parallel redundancy protocol, PRP）、高可用无缝冗余（high-availability seamless redundancy, HSR）协议、FRER协议等。冗余报文处理协议对比分析见表2。

由表2可知，FRER协议具有诸多优势：对组网要求较低、能够有效降低网络抖动；适用网络范围广、处理效率高；可对业务流进行精细化控制，支持多种时钟同步协议，且具备在工业4.0架构中推广应用的潜力。在网络部署“双发选收”功能时，均采用FRER协议，而对于非FRER协议报文，网络侧可沿用现有的5G会话处理方式开展业务处理，不进行报文的冗余识别与处理，以实现兼容所有业务流的目的，避免造成非FRER协议的业务流中断。

## 2.3 “双发选收”方案业务流程

对于FRER协议，上行工业网关发送的FRER报文、下行UPF发送的报文均需要携带相

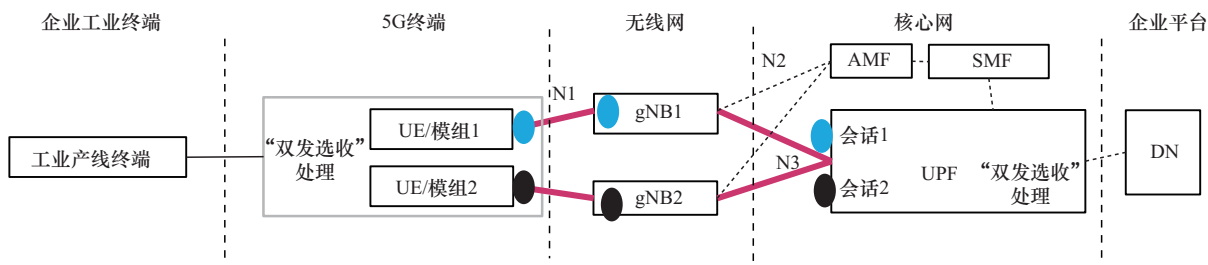


图4 运营商定制“双发选收”技术方案示意图

表2 冗余报文处理协议对比分析

对比项	FRER	PRP	HSR
中间转发网络要求	低（优）：端侧节点需要启用，中间节点选择性启用	一般：双物理隔离以太网，两端需要启用	严格（差）：以太网环路组网，全部启用
路径时延改善	优：双路径时延可选择性控制	优：双路径时延基本相当	差：双路径时延存在长短偏差
网络拓扑支持程度	优：支持星形、树形、令牌环拓扑		差：支持令牌环拓扑
帧转发处理效率	优：头部封装/字段少，效率高	差：尾部封装，效率低	优：头部封装/字段少，效率高
流转发和路径：管理能力	优：灵活，可通过规则编排	差：按节点开启路径，不可控	一般：路径固定
协议兼容性	优：支持兼容本协议数据与非本协议数据的同时处理		差：仅支持本协议数据处理
时钟同步协议	中：兼容 802.1AS、1588v2 Peer-to-Peer 等模式	优：无限制	差：仅支持 1588v2 Peer-to-Peer L2 模式
架构推广性	优：使用工业 4.0 架构，可吸纳为通用底层网络架构	差：2008 年制定，主要应用在能源和电力系统中	

应“双发选收”标签（TAG）字段。网络侧基于 UPF 双发选收功能来实现 UE 的结对。其中，UPF 需要进行功能增强，通过检测 FRER 报文中的 R-TAG 序列号进行“双发选收”处理。以工业网关为例，运营商定制“双发选收”业务流程示意图如图 5 所示。

(1) 上行业务流程为：工业产线终端发出报文经过工业网关，工业网关封装 FRER R-TAG 编码，通过 2 条传输路径送给 UPF；UPF 根据两路 UE 会话中的 R-TAG 序列号去重，并删除 R-TAG 头消息发送报文。

(2) 下行业务流程为：企业平台收到终端的报文后，向终端发送下行报文，UPF 识别该报文为双发选收报文，将 1 个会话复制为 2 个会话，并对 2 个会话进行 R-TAG 序列号编码，分别发送给工业网关的 2 个 UE；工业网关根据收到的 R-TAG 序列号去重，并删除 R-TAG 头消息发送给工业产线终端。

### 3 “双发选收”方案端到端部署方案

#### 3.1 工业产线终端侧部署方案

对于运营商定制“双发选收”方案，双 UE 配置需要通过如下两种部署模式实现。

模式 1：工业产线终端通过支持“双发选收”FRER 协议的交换机接入双 UE。

模式 2：工业网关内置双 5G 模组和双发选收的 FRER 功能。

上述两种模式为当前必选组网模式，工业产线终端部署方案示意图如图 6 所示。

模式 1 的业务流程如下。

(1) 上行业务流程为：工业产线终端发出报文经过 FRER 交换机，FRER 交换机封装 FRER R-TAG 编码，将报文复制为 2 条报文，分别发送至 2 个不同的 UE，每个 UE 分别通过 2 条传输路径送给 UPF；UPF 根据两路 UE 会话中的 R-TAG 序列号去重，并删除 R-TAG 头消息发送报文。

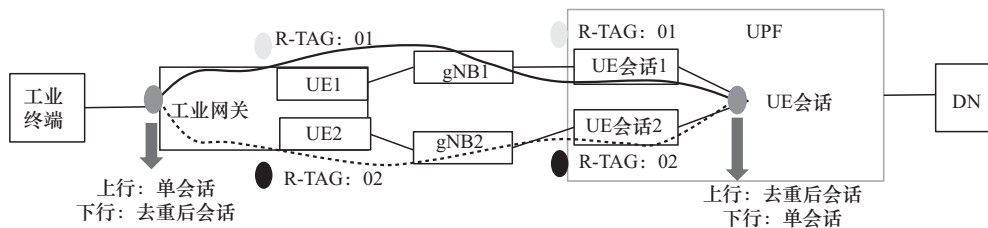


图 5 运营商定制“双发选收”业务流程示意图

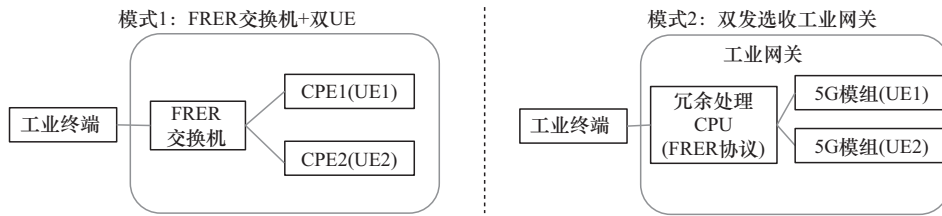


图6 工业产线终端部署方案示意图

(2) 下行业务流程为: 企业平台收到终端的报文后, 向终端发送下行报文, UPF 识别该报文为“双发选收”报文, 将1个会话复制为2个会话, 并对2个会话进行R-TAG序列号编码, 分别发送给2个UE; 2个UE将携带R-TAG序列号编码的报文发送至FRER交换机, FRER交换机根据收到的R-TAG序列号去重, 并删除R-TAG头消息发送给工业产线终端。

模式2的业务流程如下。

(1) 上行业务流程为: 工业产线终端发出报文经过工业网关, 工业网关封装FRER R-TAG编码, 将报文复制为2条报文, 分别发送至2个不同的5G模组, 每个5G模组分别通过2条传输路径发送至UPF; UPF根据两路5G模组发送的会话中的R-TAG序列号去重, 并删除R-TAG头消息发送报文。

(2) 下行业务流程为: 企业平台收到终端的报文后, 向终端发送下行报文, UPF 识别该报文为“双发选收”报文, 将1个会话复制为2个会话, 并对2个会话进行R-TAG序列号编码, 分别发送给2个5G模组; 工业网关将2个5G模组携带R-TAG序列号编码的报文进行处理, 根据收到的R-TAG序列号去重, 并删除R-TAG头消息发送给工业产线终端。

考虑模式2成本相对较低, 工业网关产品成熟, 同时组网方便, 不需要考虑FRER交换机与UE之间的组网部署方案, 本文建议采用模式2进行部署。工业产线终端部署方案对比见表3。

### 3.2 基站部署方案

双发选收的基站侧部署方案主要分为异频+不同基站、异频+共用基站、同频+共用基站、同频+不同基站4种方式。基站接入方式示意图如图7

表3 工业产线终端部署方案对比

对比项	模式1: FRER交换机+双UE	模式2: 双发选收工业网关内置双模组
部署成本	高: FRER交换机约5000元, 另需要额外配置客户前置设备(customer premise equipment, CPE)/UE	低: 工业网关约3000~4000元, 且支持CPE能力
产品成熟度	低: 仅东土科技、浪潮等部分工业交换机支持	高: 宏电x2、中兴SE6100等均支持商用
方案复杂度	复杂: 增加FRER交换机节点, 组网复杂	简单: 工业网关一体化配置, 组网简单

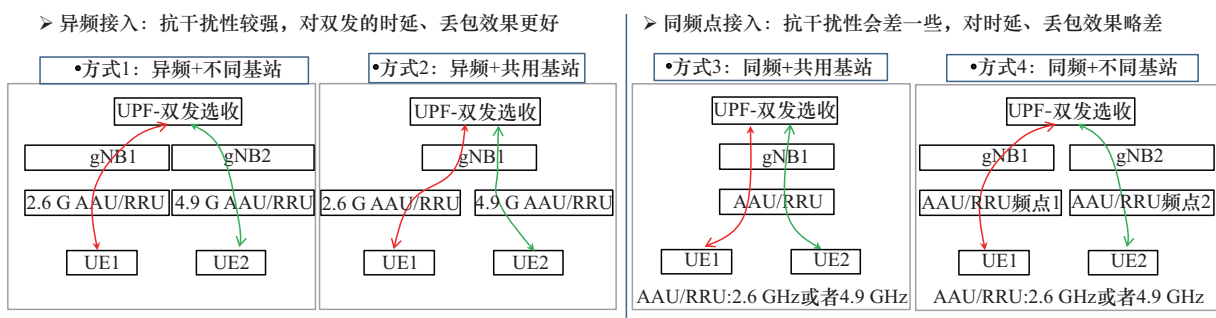


图7 基站接入方式示意图

所示，双发选收的接入对频段与频点无特殊要求，但异频接入的抗干扰性较强，对双发选收在时延、丢包等方面的指标效果更好；同频点接入，抗干扰性会差一些，对时延、丢包等方面的指标效果略差，因此，如果考虑可靠性效果最佳，本文建议终端接入时使用不同频率且通过不同基站接入的方式进行部署。

### 3.3 终端选频方案

双发选收采用异频方式部署的可靠性效果最佳。终端选频技术方案主要分为终端锁频方案和网络侧下发无线接入技术/频率选择优先级（radio access technology/frequency selection priority, RFSP）方案。终端锁频方案主要依赖于终端支持保存接入频率优先级列表，从而使终端从不同频点接入网络。该方案主要依赖终端自身的功能实现。

对于网络侧下发RFSP方案，可以通过AMF静态配置、UDM签约或接入管理-策略控制功能（access management-policy control function, AM-PCF）授权3种途径下发至AMF。其中，AMF为RFSP的决策点，将判定使用的RFSP下发给下一代无线接入网（next generation radio access network, NG-RAN）。NG-RAN侧可以通过

RFSP实施无线资源管理策略，灵活控制终端的行为策略，如指定终端驻留和切换频段的优先级等。如果三者同时存在，AMF网元则会根据协商策略，决策优先使用哪个。通常情况下，PCF下发的优先级高于AMF本地配置的优先级，AMF本地配置的优先级高于UDM签约的优先级。

终端选频方案对比见表4。

### 3.4 核心网侧部署方案

对于不存在核心网控制面专用业务需求的场景，可复用现有AMF、SMF、UDM和PCF等网元功能，完成双UE的接入控制、注册与鉴权、策略与计费控制（policy and charging control, PCC）策略下发以及会话建立等操作，无额外功能改造要求。若客户要求控制面专网专用，则可通过部署定制化的下沉核心网来实现。

用户面可结合客户的时延需求选择UPF的部署位置，对于时延要求高的业务，为满足用户体验，建议在客户机房部署边缘UPF，且原则上UPF不少于2套；对于时延要求不高的业务，为充分利用现有网络资源，建议与现有地市共享UPF或复用省级专线UPF。

表4 终端选频方案对比

对比项	终端锁频方案	网络侧下发RFSP方案		
		UDM签约	AMF本地配置	AM-PCF授权
标准情况	遵从国际标准 <sup>[7]</sup>	遵从国际标准 <sup>[7]</sup>	私有方案	遵从国际标准 <sup>[7]</sup>
改造要求	需要定制终端；对网络侧无要求	终端：支持识别和保存RFSP相关参数 无线：软件增强 核心网：UDM软件增强	终端：支持识别和保存RFSP相关参数 无线：软件增强 核心网：AMF软件增强、配置改造	终端：支持识别和保存RFSP相关参数 无线：软件增强 核心网：部署AM-PCF
产业成熟度	已支持	已支持	已支持	已支持
方案优势	单点定制，终端本地实现；不需要网络侧通过RFSP为终端选频	运营商全网统一规划；支持广域场景；可基于用户号段签约	可针对特定用户基于号段/切片做特殊控制；适合局域场景、支持对漫入用户进行控制；不需要网络进行签约或授权	可基于单用户特定区域范围进行控制，支持漫入地下发参数
局限性	无法批量化；终端需要手动进行频点配置	无法根据特定区域特定场景灵活调整；漫入地无法针对本地场景对漫入用户进行RFSP签约	如果号段离散，则AMF配置复杂；无法根据场景动态变化	动网范围大（需要支持AM-PCF）、成本略高



### 3.5 网络安全容灾方案

移动通信系统出于网络安全考虑，在组网部署阶段，均会对网元的容灾方案进行规划<sup>[15]</sup>。本文使用的“双发选收”方案，主要分为核心网控制面与核心网用户面两部分。

(1) 核心网控制面：当控制面网元均复用运营商现有大网网元时，则容灾及备份方案应遵循现有5G网络容灾原则，可根据网元特点采用1+1备份、组POOL等容灾备份方式。例如，客户采用了定制化下沉核心网（下沉5G小CORE）进行网络部署，容灾及备份方案可通过单套5G小CORE内部容灾、多套5G小CORE间容灾等形式实现。同时，为满足运营商大网与5G小CORE的隔离防护要求，5G小CORE需要进行业务隔离，采用虚拟专用网络（virtual private network, VPN），所有数据通过信令安全网关进行拓扑隐藏、安全防护等。

(2) 核心网用户面UPF：由于核心网控制面不感知双发选收的会话策略，同一对UE产生的冗余会话必须由同一套具备双发选收的UPF进行处理，因此，要求UPF设备针对运营商定制双发选收业务必须设置为1+1主备容灾方式，或两套UPF之间采用热备方式，实时同步所有会话。

### 3.6 测试数据分析

基于本文提出的“双发选收”方案，2023年运营商联合主流核心网设备厂家面向低时延高可靠的设备控制场景开展了实验室及外场测试，搭建了端到端“双发选收”方案测试场景，终端侧采用支持FRER协议的工业网关内置5G双模组方式接入工业产线终端，具体数据如下。

(1) 可靠性测试方面：通过空载环境、大流量环境、双频环境（2.6 GHz+4.9 GHz）、单频环境（2.6 GHz）4种环境进行了方案验证，在每10万次发包测试中，丢包数均不超过4个，基本实现了“0”丢包，验证了端到端可靠性（无丢包）。

(2) 性能测试方面：通过UPF下沉至工业产线终端侧部署的方式，减少了抖动，将业务时延降低44%，至20 ms以下。

基于上述测试验证结果，“双发选收”方案基本具备可行性，保证了业务在单路故障下的业务连续性，实现了工业生产对网络故障的“0”感知。

## 4 结束语

面向高可靠行业需求，标准uRLLC方案的双连接要求对芯片/终端要求高，其发展受制于终端模组，需要进一步优化方案，推动产业成熟。面向运营商定制的“双发选收”方案可满足当前业务需求，短期内可考虑进一步降低周边配套（如支持FRER协议的工业网关）的成本，推动上下游产业成熟，促进产品规模化发展。

面向网络长远规划，则可以考虑向标准方案演进，推动终端芯片支持原生双发选收，使得网络对于双发选收业务更智能、更灵活，或对运营商定制的双发选收方案进一步优化增强，实现控制面对业务的感知和处理，与UPF的1+1主备或热备容灾方式解耦，提高设备使用效率，降本增效，实现真正意义上的绿色、可靠、智能网络。同时，考虑工业协议极其复杂，行业壁垒高，通信行业融入难度大，本文建议在定义协议标准前，广泛征集行业意见，深入挖掘企业难点需求，降低产业链上下游适配的复杂度。

### 参考文献：

- [1] Maghsoudnia A, Vlad E, Gong A Y, et al. Ultra-reliable low-latency in 5G: a close reality or a distant goal? [C]//Proceedings of the 23rd ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM Press, 2024: 111-120.
- [2] Yang B, Wei F, She X, et al. Intelligent random access for massive-machine type communications in sliced mobile net-

- works[J]. Electronics, 2023, 12(2): 329.
- [3] Al-Ali M, Yaacoub E. Resource allocation scheme for eMBB and uRLLC coexistence in 6G networks[J]. Wireless Networks, 2023, 29(6): 2519-2538.
- [4] Deshpande Y, Diederich P, Luthfi M, et al. Integrating deterministic networking with 5G[C]//Proceedings of the 2024 20th International Conference on Network and Service Management (CNSM). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-3.
- [5] Dang F, Sun X K, Liu K B, et al. A survey on clock synchronization in the industrial Internet[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2023, 38(1): 146-165.
- [6] Tian W B, Gu C J, Guo M, et al. Large-scale deterministic networks: architecture, enabling technologies, case study, and future directions[J]. IEEE Network, 2024, 38(4): 284-291.
- [7] 3GPP TS 23.501 (V15.3.0) Technical specification group services and system aspects; system architecture for the 5G system (5GS) stage 2 (Release 15)[S].
- [8] 中国信息通信研究院. 面向行业的5G网络SLA定义及需求白皮书[R]. 2022.  
China Academy of Information and Communications Technology. White paper on 5G network SLA definition and requirements for industries[R]. 2022.
- [9] 3GPP TS 23.501 (V18.3.0) Technical Specification Group Services and system Aspects; System architecture for the 5G system (5GS) stage 2 (Release 18)[S]. 2023.
- [10] 3GPP TS 23.501 (V16.20.0) Technical Specification Group Services and System Aspects; System architecture for the 5G System (5GS) Stage 2 (Release 16)[S].
- [11] 3GPP TS 23.502 (V18.3.0) Technical specification group services and system aspects; procedures for the 5G system (5GS) stage 2 (Release 18)[S].
- [12] 3GPP TS 23.501 (V17.14.0) Technical specification group services and system aspects; system architecture for the 5G system (5GS) stage 2 (Release 17)[S].
- [13] Gundall M, Schneider J, Schotten H D, et al. 5G as enabler for industrie 4.0 use cases: challenges and concepts[PP]. (2024-10-11) [2025-02-10]arXiv: 2410.08726.
- [14] GSMA. 5G deterministic networks for industries white paper[R]. 2024.
- [15] WL-HX-1-021-LYYZ-2022. 物联网核心网(分组域)路由组织原则分册[S].

WL-HX-1-021-LYYZ-2022. Routing organization principles for core networks (packet domains) of the Internet of things volume[S].

#### [作者简介]



孙逊 (1985-), 女, 中国移动通信集团设计院有限公司通信高级工程师, 主要研究方向为移动通信核心网、5G专网。



宋旭光 (1997-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司工程师, 主要研究方向为移动通信核心网。



马洪源 (1984-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司通信高级工程师, 主要研究方向为移动通信核心网。



冯志强 (1981-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司工程师, 主要研究方向为移动通信核心网。



卢友伟 (1998-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司工程师, 主要研究方向为移动通信核心网。