

面向 Critical MTC 的无连接传输



Connection-Free Transmission for Critical MTC

李志岗/LI Zhigang^{1,2}, 袁志锋/YUAN Zhifeng^{1,2},
董展谊/DONG Zhanyi^{1,2}, 李文斌/LI Wenbin^{1,2},
梁楚龙/LIANG Chulong^{1,2}

(1. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;
2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518055)
(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202401011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240227.1009.004.html>

网络出版日期: 2024-02-27

收稿日期: 2024-01-10

摘要: 关键机器类通信 (Critical MTC) 对时延和可靠性都有极高的要求。支持海量 Critical MTC 的终端是一个巨大挑战。提出了一种面向海量 Critical MTC 终端的无连接传输方案。为了降低时延, 提出了基于竞争的无连接单次传输方案; 为了实现高可靠性, 设计了具有极低导频碰撞概率的稀疏正交多导频。进一步利用大规模多输入多输出 (MIMO) 的增益来提高可靠性以及在空域复用大量用户。仿真结果表明, 提出的方案可以支持海量 Critical MTC 终端, 同时满足低时延和高可靠的严格要求。

关键词: 无连接传输; Critical MTC; 低时延高可靠; 导频碰撞; 稀疏正交导频

Abstract: Critical machine-type communication (Critical MTC) has extremely high requirements for latency and reliability. Supporting massive critical MTC terminals simultaneously is a huge challenge. A connection-free transmission scheme for critical MTC is proposed. To reduce latency, a contention-based connection-free one-shot transmission scheme is proposed. To achieve ultra-reliability, multiple sparse orthogonal pilots with extremely low probability of pilot collision are designed. Furthermore, the gain of massive multiple-input multiple-output (MIMO) is used to improve reliability and multiplex a large number of users in the spatial domain. The simulation results show that the proposed scheme can support a large number of critical MTC terminals while meeting the stringent requirements of low latency and ultra-reliability.

Keywords: connection-free transmission; Critical MTC; ultra reliable low latency; pilot collision; sparse orthogonal pilot

引用格式: 李志岗, 袁志锋, 董展谊, 等. 面向 Critical MTC 的无连接传输 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 60-67. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401011

Citation: LI Z G, YUAN Z F, DONG Z Y, et al. Connection-free transmission for critical MTC [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(1): 60-67. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401011

国际电信联盟 (ITU) 在 2023 年 6 月完成了《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》^[1]。该建议书提出了 6G^[2-5] 六大典型应用场景。这些场景不仅包括 5G 三大典型应用场景的扩展: 增强移动宽带 (eMBB) 扩展到沉浸式通信、大规模机器类通信 (mMTC) 扩展到海量通信、超可靠低时延通信 (URLLC) 扩展到极可靠低时延通信 (HURLLC), 还包括新的三大应用场景: 通智融合、通感一体和泛在连接。其中, mMTC/海量通信旨在支持大规模的物联网设备连接, 满足海量低成本、低功耗设备的连接需

求, 极可靠低时延通信则是为了满足低时延和高可靠性通信的需求, 以确保实时和关键性应用的可靠性和稳定性。

机器类通信 (MTC) 作为 5G 重要的应用场景之一^[6-8], 按需求可以分为两类: mMTC 和关键机器类通信 (Critical MTC)。其中, Critical MTC 可以认为是极可靠低时延通信和海量通信的融合^[9-10]。Critical MTC 对可靠性和时延都有严格的要求, 未来对终端数量也有较高的需求。Critical MTC 可以应用在工业物联网 (IIoT)、智慧交通、远程医疗等领域^[11]。据白皮书预测, Critical MTC 将是 6G 的一个重要应用场, 高效支持海量 Critical MTC 终端是一个巨大挑战^[12]。

1 Critical MTC 能力指标与关键技术

Critical MTC 除了对可靠性和时延具有严格的要求外,

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB1807202); 广东省重点领域研发计划 (2019B010157002)

对终端连接数量也有较高的需求。本节首先介绍 Critical MTC 的关键能力指标, 然后介绍满足这些指标所涉及的关键技术以及存在的问题。

1.1 Critical MTC 能力指标

Critical MTC 主要涉及可靠性、时延以及连接密度 3 个能力指标。在 5G 新空口 (NR) 中, URLLC 可以支持少量的高可靠和低时延终端, 其指标要求为: 对于 32 字节的数据包, 用户面时延 1 ms, 一次传输的可靠性为 $1-10^{-5}$ (99.999%)^[13]。此外, 建议书明确了 6G 的 15 个能力指标, 包括 9 个 6G 增强能力和 6 个 6G 的新能力。具体来说, 可靠性指标从 5G 的 $1-10^{-5}$ 提升至 $1-10^{-5} \sim 1-10^{-7}$, 时延指标从 5G 的空口时延 1 ms 降至 0.1~1 ms, 6G 的连接密度从 5G 的 10^6 个设备/平方公里增加至 $10^6 \sim 10^8$ 个设备/平方公里。根据上述分析, Critical MTC 场景至少要实现 $1-10^{-5}$ 可靠性要求和 1 ms 的空口时延。随着技术的发展以及在不同领域的广泛部署, Critical MTC 业务的比重将进一步加大, 因此, 还要具备支持海量 Critical MTC 终端的能力。

1.2 Critical MTC 关键技术

为了满足 Critical MTC 对高可靠、低时延以及连接数量的要求, 第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) R15 支持多项物理层 (PHY) 和媒体接入控制层 (MAC) 的关键技术, 并在 R16 和 R17 得到了进一步增强。本小节将介绍相关的关键技术和规范, 包括灵活的帧结构、免调度传输、重传以及大规模多输入多输出 (MIMO) 等。

1) 低时延关键技术

传输和调度时间是影响时延的两个重要因素。为了降低传输时延, 5G 支持更灵活的帧结构, 以及更灵活的调度单位^[14]。5G Sub-6 GHz 支持 15/30/60 kHz 子载波间隔。更大的子载波间隔可以降低正交频分复用 (OFDM) 符号的时间, 进而减少时隙 (slot) 的时间。此外, 5G 还支持由 1~13 个 OFDM 符号构成的 Mini-slot, 可以进一步降低传输时延。

免调度传输可以显著降低调度与传输时延^[15-16]。免调度传输允许用户设备 (UE) 直接进行数据传输, 而不用事先发送调度请求和等待动态调度, 因此可以降低时延, 节省信令开销。免调度传输分为预配置免调度与竞争免调度。在预配置免调度传输中, 基站为用户预配置周期性的传输资源, 包括时频资源、导频等, 此时用户之间不会发生资源碰撞, 可以认为是非竞争的。因此, 预配置免调度适合周期性的业务。而在竞争免调度传输中, 用户自主地发起信息传输, 无须请求基站分配上行传输资源。竞争免调度传输适合事件/

业务触发的零星、非周期业务, 且资源利用更加灵活和高效。

竞争免调度传输作为一种极简的传输方案, 也存在一些问题。一方面, 在竞争免调度传输中, 用户和基站之间缺少严格的同步, 导致基站接收的用户数据经历较大的时频偏, 这会进一步增加数据符号的畸变, 使信道估计和解调更加困难^[17]; 另一方面, 由于没有基站的调度和协调, 用户的导频信号是自主确定的, 会产生导频碰撞。当用户较多时, 导频碰撞会更加严重, 这会降低传输可靠性。文献[18-20]提出了多种导频设计来降低导频碰撞, 如非正交导频、多导频等。因此, 在存在不受控的导频碰撞、严重的多用户干扰以及时频偏的情况下, 利用竞争免调度传输支持大规模 Critical MTC 设备依然存在很大的挑战性。

2) 高可靠关键技术

重传作为一种提高系统可靠性的技术, 也在不断演进。传统的混合自动重传请求 (HARQ) 方案使用停等协议来发送数据。当设备发送一个数据包后, 需要等待基站反馈确认信息, 若接收正确则返回肯定 (ACK), 错误则返回否定 (NACK)。当设备收到 NACK 后, 就重新发送上次传输的数据包。传统的重传方案会增加延迟, 而延迟约束下会限制重传的次数, 从而限制可靠性的提高。在此基础上, 文献[21-23]提出了 K 次重复 (K -repetition)、主动 HARQ (Proactive HARQ) 等多种重传方案。 K 次重复可以连续重复传输初始数据包 K 次, 然后再接收基站的反馈信息。主动 HARQ 允许用户在连续重传过程中接收基站的反馈信息, 一旦收到 ACK, 就可以让重传提前终止, 从而降低传输时延。基站通常需要对重传的数据包进行软合并来提升解调性能, 但这会增加数据处理的复杂度。文献[24]提出了基于串行干扰消除 (SIC) 的 K 次重复来支持多个 Critical MTC 设备。但是, 干扰消除过程会增加接收机的数据处理时延。此外, 重传也会增加设备的功耗。

大规模 MIMO 也称大规模天线阵列技术, 是 5G 的核心技术。利用大规模 MIMO 的分集增益和空间复用增益, 可以显著提高系统谱效和可靠性, 以及在空域复用大量用户^[14,25]。因此, 免调度传输结合 Massive MIMO, 非常适合对时延以及可靠性敏感的海量连接场景。

针对上述竞争免调度传输带来的导频碰撞、时频偏问题, 以及复杂的重传过程, 亟待提出一种简单高效的数据传输方法来支持海量的 Critical MTC 终端。

2 面向 Critical MTC 的无连接传输方案

基于第 1 节针对 Critical MTC 关键能力与关键技术的介

绍, 以及存在的问题, 我们提出了面向 Critical MTC 的无连接传输方案。该方案可以满足 $1-10^{-5}$ 可靠性和 1 ms 时延的严格要求, 并且可以同时支持海量的 Critical MTC 设备。无连接传输可以省去随机接入与资源调度等过程, 显著降低时延和信令开销。此外, 我们提出了时隙级的一次 (One-shot) 传输方案, 采用更大的子载波间隔。该方案不使用重传, 可以进一步降低传输时延, 实现 1 ms 的空口时延。为了满足 $1-10^{-5}$ 高可靠的要求, 我们设计了极稀疏独立正交多导频, 在无须进行导频信号干扰消除的情况下, 可以将导频碰撞概率降至 10^{-5} 以下。同时, 利用大规模 MIMO 的分集增益以及空域复用能力, 在提升可靠性的同时, 可以复用更多的用户, 支持海量 Critical MTC 终端。极低的导频碰撞概率和大规模 MIMO 提供的更高可靠性, 使得基站只需进行并行的多用户检测, 无需干扰消除和迭代检测等复杂耗时的处理流程, 就可以降低基站数据处理时延。此外, 本方案也考虑了无连接传输中由于终端和基站之间的不严格同步带来的时频偏对用户解调的影响。

本节首先介绍提出的基于竞争的无连接传输方案以及系统模型, 然后介绍具有极低导频碰撞概率的极稀疏正交多导频设计方法以及相应的导频碰撞概率, 最后介绍接收机的数据处理流程。

2.1 无连接传输方案

对于低成本和低功耗的物联网终端来说, 为了省电, 终端在没有业务时, 通常处于空闲态 (RRC_IDLE), 也可以称为无连接态 (Connection-free 或 Non RRC_CONNECTED)。处于空闲态或无连接态的终端为了传输信息, 需要先通过随机接入进入连接态 (RRC_CONNECTED)。而随机接入过程需要终端与基站进行多次交互, 这无疑会增加传输的功耗、信令开销以及时延。R13 规范中引入了去激活态 (RRC_INACTIVE)。相比于从空闲态跃迁到连接态, 从去激活态跃迁到连接态, 可以节省信令开销和时延。此外, 处于连接态的终端通常没有专用的上行传输资源, 每次传输信息前需要先向基站申请上行传输资源, 获得基站的上行资源授权后, 才能在基站授权的时频资源上传输信息。可见, 对于小包的物联网终端来说, 传统上行信息传输变得非常低效。

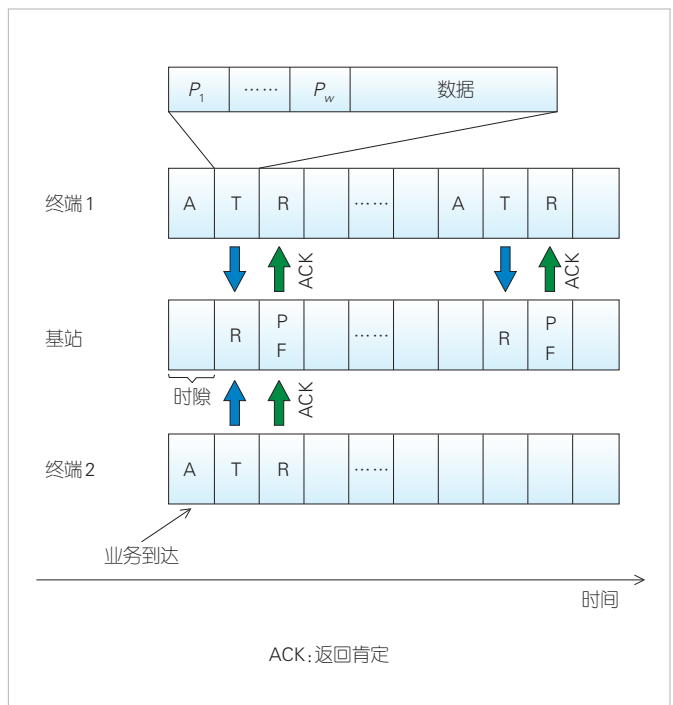
为了降低传输的功耗、信令开销以及时延, 我们提出基于竞争的无连接传输: 即处于空闲态或无连接状态的终端可以无须事先建立与系统的连接, 也无须请求基站分配上行传输资源, 而是自主地直接发起信息传输; 传输完成后, 终端无须释放连接。基站只需配置一个公共的信道, 广播通知所

有终端可用的传输资源。基站只需要从这个公共信道的接收信号中, 通过多用户检测解码出各个终端的传输信息。可见, 这种极简的无连接信息传输, 可以极大地降低传输的功耗、信令开销以及时延。

图 1 为我们提出的基于竞争的无连接传输方案。当业务到达时, 终端将自主选择的 W 个导频和数据一起通过最近的可用时隙进行传输, 不需要进行重传。基站在下一个时隙会完成多用户检测, 并且向用户发送反馈信息。为了确保毫秒级的往返时间, 可以采用较大的子载波间隔以减少时隙的持续时间。例如, 30 kHz 子载波间隔对应的时隙持续时间为 0.5 ms, 可以确保往返时间在 1ms, 满足低时延的要求。

2.2 系统模型

考虑大规模 MIMO 网络, 基站配置 M 个天线, 服务大量单天线设备。假设 J 个活跃用户同时通过相同的时频资源进行竞争无连接传输。用户从导频序列集合 \mathbf{P} 中自主选择导频序列, 与数据一起发送。导频序列集合 \mathbf{P} 由 L 条长度为 L 的正交导频序列构成, 即 $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_L], p_l \in C^{1 \times L}, l = 1, 2, \dots, L$ 。考虑块衰落信道模型, 用户和基站间的信道系数可以表示为 $h_j \in C^{M \times 1}, j = 1, 2, \dots, J$ 。基站接收到的多用户叠加的导频符号为:



▲图1 基于竞争的无连接传输方案

$$y_p = \sum_{j=1}^J h_j p_j + n_p, \tag{1}$$

其中, $p_j, y_p \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 、 $n_p \in \mathbb{C}^{M \times L} \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$ 分别表示第 j 个用户选择的导频序列、基站接收到的多用户叠加的导频符号、均值为0方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

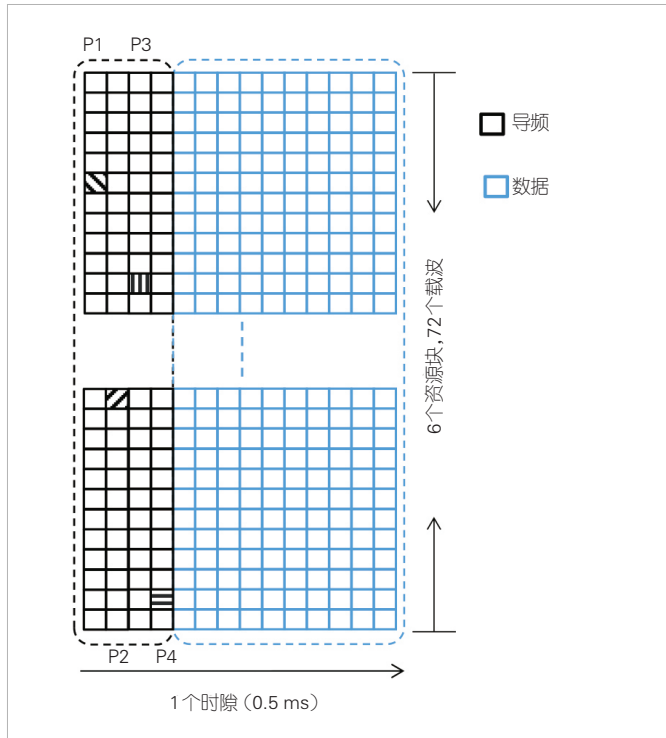
基站接收到的多用户叠加的数据符号为:

$$y_d = \sum_{j=1}^J h_j s_j + n_d, \tag{2}$$

其中, $s_j \in \mathbb{C}^{1 \times S}$ 、 $y_d \in \mathbb{C}^{M \times S}$ 、 $n_d \in \mathbb{C}^{M \times S} \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$ 分别表示第 j 个用户发送的数据符号、基站接收到的多用户叠加的数据符号、均值为0方差为 σ^2 的加性高斯白噪声, S 表示数据符号的长度。

2.3 极稀疏独立多导频设计

在无连接传输方案中, 由于导频是用户自主选择的, 所以不同用户可能会选择相同的导频, 即产生导频碰撞。而高过载即用户很多时, 出现导频碰撞的概率非常高。一旦导频发生碰撞, 基站很难通过导频分离出碰撞用户的信息, 这会显著降低传输的可靠性。为了降低导频碰撞概率, 我们设计了极稀疏独立正交多导频, 如图2所示。传输资源为频域6个资源块 (RB), 时域1个时隙 (包含14个OFDM符号, 每



▲图2 极稀疏独立正交多导频设计

个OFDM符号72个子载波)。以4个导频 ($W=4$) 为例, 4个独立的导频 (每个长度 L 为72) 以时分复用方式映射到时隙的前4个OFDM符号, 即1个导频映射到一个OFDM符号, 导频开销为 $2/7$ 。导频前置的好处是, 基站可以在接收数据的同时, 对导频进行检测, 完成活跃用户识别与信道估计, 降低接收机处理时延。每个72长的导频只有1个非零元素, 该非零元素占一个资源元素 (RE)。这相当于导频集合包含72条稀疏正交导频序列。稀疏正交导频序列集合 P 可以表示为:

$$P = \begin{bmatrix} \sqrt{L} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sqrt{L} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sqrt{L} \end{bmatrix}_{L \times L}, \tag{3}$$

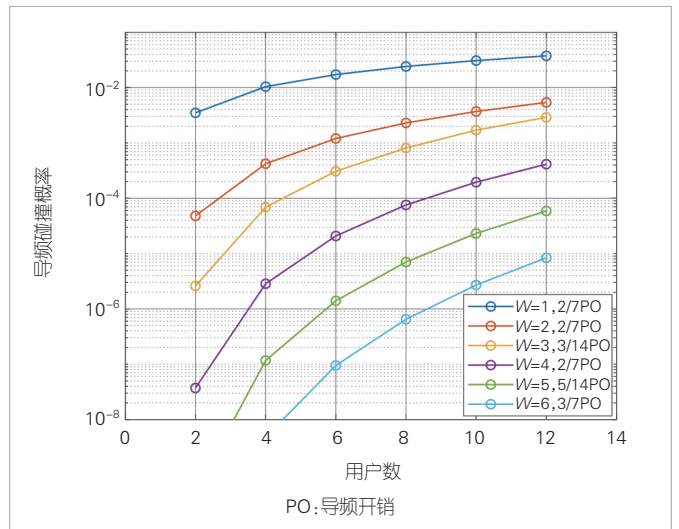
其中 $L=72$, 每一行表示一条稀疏正交导频序列。图2是一种最稀疏的正交导频序列设计, 可以获得数量最多的正交导频序列。当有业务到达时, 用户可以从导频序列集合 P 中随机选择 W 条序列映射到导频传输资源与数据一起发送。

2.4 导频碰撞概率

极稀疏独立多导频可以显著降低导频碰撞概率。结合大规模MIMO对可靠性的提升, 基站只需要进行一轮多用户检测, 无须复杂耗时的干扰消除和迭代检测过程。在没有干扰消除的情况下, 导频碰撞概率可以表示为^[4]:

$$P_c = (1 - (1 - 1/L)^{J-1})^W. \tag{4}$$

以图2中的时频资源以及导频映射方式为例, 不同导频数量 W 以及不同导频开销 (PO) 下的导频碰撞概率如图3



▲图3 不同导频数量和导频开销下的导频碰撞概率

所示。从图中可以看出，导频碰撞概率达到 10^{-5} 量级时，4 个独立导频（2/7 导频开销）可以支持 8 个用户，6 个独立导频（3/7 导频开销）可以支持 12 个用户。

2.5 接收机设计

接收机数据处理流程如图 4 所示，多个独立的导频可以并行处理，这里以其中一个导频的处理流程为例。在无连接传输中，导频可以用于活跃用户检测与信道估计。

由于导频是正交的，可以简单地将接收到的导频符号与导频序列集合 P 中的每一条导频序列进行相关，得到空域信道估计

$$\hat{h}_l = h_l + \frac{n_p P_l^*}{P_l P_l^*}, l = 1, \dots, L. \quad (5)$$

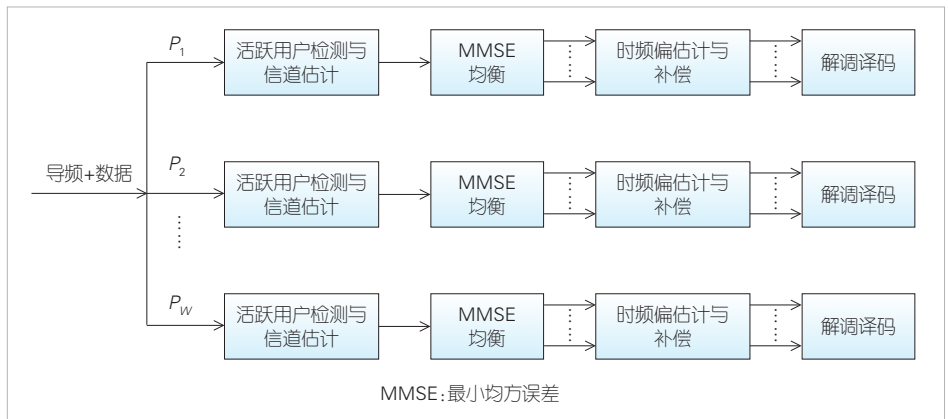
为了识别活跃用户，可以将 $|\hat{h}_l|^2$ 与阈值 T 进行比较。 $|\hat{h}_l|^2 > T$ 即可认为是活跃用户。阈值 T 的大小需要综合考虑漏检和虚警。假设 Q 个活跃用户，信道估计可以表示为 $\hat{H} = [\hat{h}_1, \hat{h}_2, \dots, \hat{h}_Q]$ 。最小均方误差（MMSE）均衡后的数据符号可以表示为：

$$\hat{s}_q = \hat{h}_q^* (\hat{H}\hat{H}^* + \sigma^2 I)^{-1} y_d, q = 1, 2, \dots, Q, \quad (6)$$

其中， \hat{s}_q 表示第 q 个活跃用户的数据符号。对于 Q 个活跃用户，后续处理流程也可以并行进行，即整个接收机处理流程可以认为是两级并行的。这样可以进一步降低接收机处理时延。

为了降低导频碰撞概率，在我们提出的极稀疏正交导频设计中，每个导频只映射到一个 RE。导频所在子载波以及附近子载波的信道估计是准确的。对于远离导频的子载波，导频信道估计存在一定偏差。因此公式（6）使用导频信道估计对数据符号进行均衡并不是最优的选择。同时，极简的无连接传输流程也会导致用户和基站之间存在时频偏。也就是说，无线信道以及时频偏会对数据符号 \hat{s}_q 造成畸变，而估计无线信道和时频偏造成的符号畸变超出了稀疏导频的能力范围。

对于小包传输场景，可以采用低阶调制方式，如二进制相移键控（BPSK）、正交相移键控（QPSK）。因此，可以利用低阶调制符号的几何与统计特征来估计无线信道以及时频

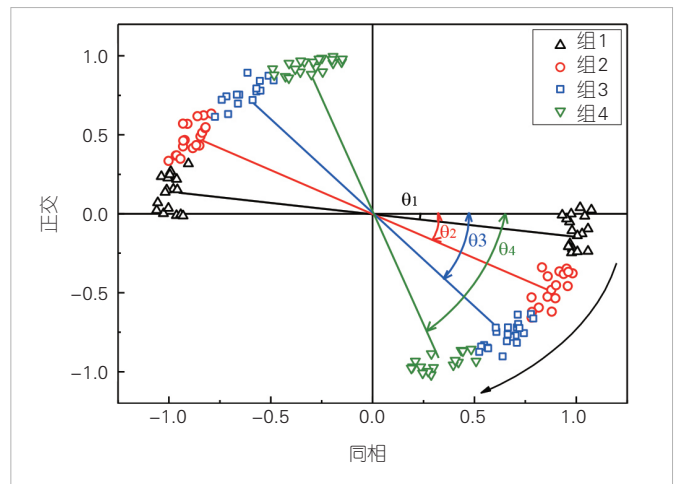


▲图4 接收机数据处理流程

偏。基于此，我们提出了分区匹配（PM）法^[26]。这里以时偏估计为例介绍分区匹配法，考虑正交频分复用系统以及循环前缀（CP）内的时偏。时偏会引起调制数据符号在频域旋转，但是调制数据符号 \hat{s}_q 的几何特征仍然得到保留，如图 5 所示。为了估计时偏，将传输带宽内的子载波分组，每组中的调制数据符号的平均旋转角度 θ 可通过分区匹配法获得。将这些平均旋转角度进行差分，得到差分角度： $\theta_2 - \theta_1, \theta_3 - \theta_2, \theta_4 - \theta_3, \dots$ 。对差分角度取平均得到 θ_{avg} ，除以分组的子载波数，即可得到两个相邻子载波之间由时偏引起的相位旋转角度。最后，在频域上进行时偏补偿。稀疏导频所在子载波无须进行补偿，并且可以作为其他子载波补偿的参考点。补偿后的数据符号被送到解调器和译码器，通过循环冗余校验（CRC）判断译码是否正确。基站通过译码后的数据即可确定用户身份，并获取业务信息。

3 链路仿真与分析

本节基于 MATLAB 平台，通过链路仿真验证我们提出



▲图5 分区匹配法估计时偏

的无连接传输方案能够支持海量Critical MTC终端，并满足 $1-10^{-5}$ 可靠性和1 ms时延的指标要求。为确保仿真结果可靠性，我们进行了 3×10^5 次蒙特卡罗仿真。考虑多用户仿真，等效仿真的数据包传输达到 10^6 量级。仿真参数如表1所示。传输资源与图2一致，即频域6个资源块，时域1个时隙。子载波间隔为30 kHz，一个时隙的时间为0.5 ms。导频数量 W 为4~6个，对应导频开销 $2/7\sim 3/7$ 。基站配置 $M=16$ 或32个阵列天线，用户配置单天线。数据包大小为32字节，载频为5 GHz，信道模型为抽头延时线（TDL-D）模型，时延扩展为30 ns。用户的时偏设置为服从 $[0, CP]$ 独立均匀分布，其中 $CP \approx 2.35 \mu s$ 。用户的频偏设置为服从 $[-250 \text{ Hz}, 250 \text{ Hz}]$ 独立均匀分布。鉴于极稀疏独立多导频可以保证 10^{-5} 量级的导频碰撞概率，加上大规模MIMO可以进一步提升可靠性，因此，我们提出的方案可以只进行单次传输，无须重传，即可满足低时延高可靠的要求。同时接收机只需要进行一轮多用户检测，无需复杂和耗时的干扰消除和迭代检测。

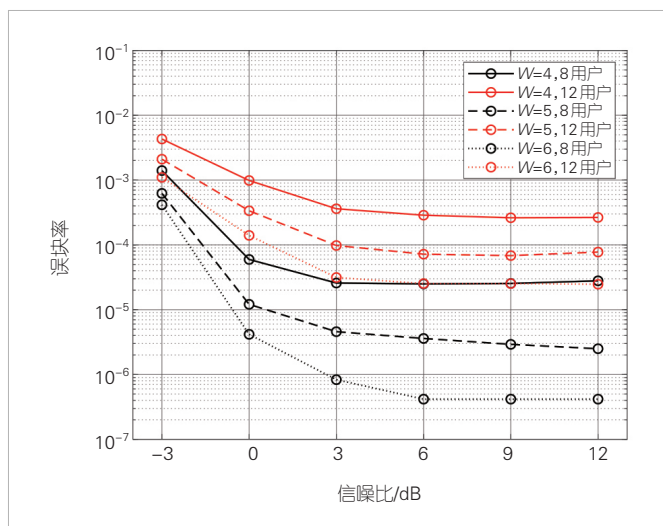
图6为 $M=16$ 时，不同导频开销和导频数量的误块率（BLER）性能。从图中可以看出，在目标BLER= 10^{-5} （可靠性 $1-10^{-5}$ ）时，5个或6个独立稀疏导频都可以支持8个用户。对于6个独立稀疏导频，12用户的BLER并没有降到 10^{-5} ，这与图3中的理想性能还有一定差距。主要原因在于，接收天线数量 M 只有16，规模还不够大。

图7为 $M=32$ 时，不同导频开销和导频数量的BLER性能。6个独立稀疏导频可以支持12个用户，满足BLER= 10^{-5} ，这与图3一致。仿真结果同时表明，我们提出的方案

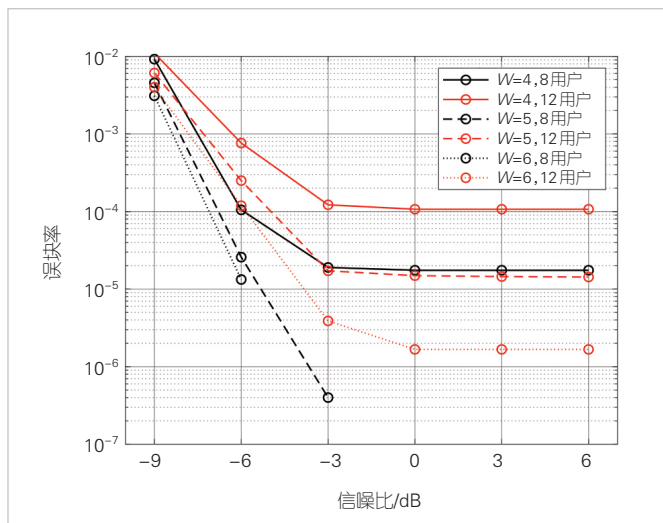
▼表1 仿真参数配置

参数	配置
载频	5 GHz
子载波间隔	30 kHz
传输资源	频域6个资源块,时域1个时隙
用户数	8、12
编码调制方案	BPSK、LDPC
数据包大小	32字节
CRC长度	16比特
导频数量	4、5、6
基站天线配置	16/32 天线阵列
信道模型	TDL-D 30 ns
移动速度	3 km/h
时偏	$[0, CP]$ 均匀分布
频偏	$[-250 \text{ Hz}, 250 \text{ Hz}]$ 均匀分布
接收机算法	MMSE、无干扰消除

BPSK: 二进制相移键控
 CP: 循环前缀
 CRC: 循环冗余校验
 LDPC: 低密度奇偶校验
 MMSE: 最小均方误差
 TDL-D: 抽头延迟线信道模型



▲图6 $M=16$ 时,不同导频数量和导频开销下的误块率性能



▲图7 $M=32$ 时,不同导频数量和导频开销下的误块率性能

在时频偏场景中依然适用。

图7通过仿真验证了我们提出的方案可以同时支持12个用户满足 $1-10^{-5}$ 可靠性指标的要求。而时延指标主要包括资源调度时延、数据传输时延以及基站数据处理时延。基于竞争的无连接传输，采用更大子载波间隔的时隙级单次传输，可以显著降低资源调度和数据传输时延。基站只需要进行一轮并行的多用户检测，就可以利用图形处理器（GPU）的并行处理能力，降低接收机的数据处理时延。综合以上降低时延的方法可以将空口时延降低至1 ms。

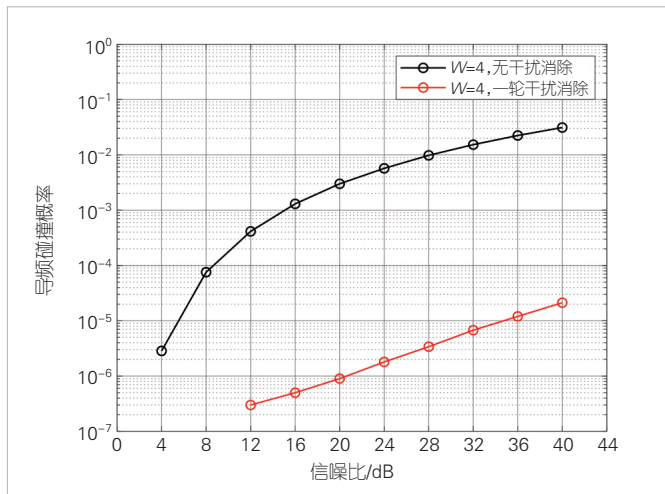
一些Critical MTC应用场景要求海量终端能够进行高可靠传输，但对时延的要求比较宽松（ $>1 \text{ ms}$ ）。基站可以进行干扰消除，通过迭代检测，支持更多用户同时传输。干扰消除不仅针对数据符号，还可以针对导频符号进行，这样可以

进一步降低导频碰撞概率。图8对比了4个独立稀疏正交导频在进行一轮干扰消除和无干扰消除时的导频碰撞概率。从图中可以看出,进行一轮干扰消除,同时接入的用户数超过32时,导频碰撞概率依然可以达到 10^{-5} ;而不进行干扰消除且导频碰撞概率为 10^{-5} 时,4个独立稀疏正交导频仅可以支持6个用户接入。可见导频信号的干扰消除可以显著降低导频碰撞概率,增加同时接入的用户数。

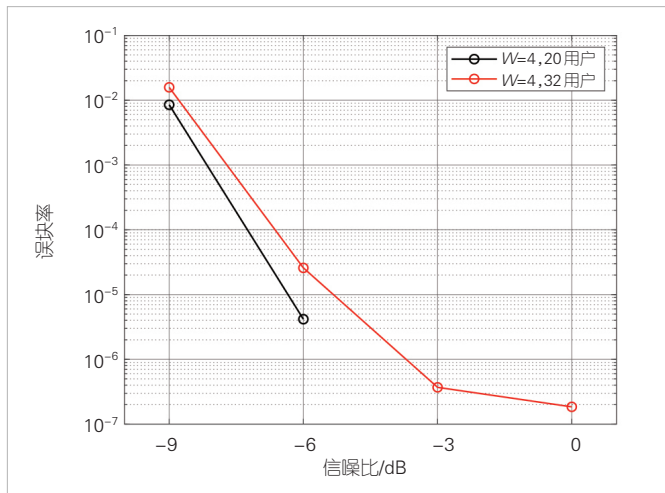
图9对4个独立稀疏正交导频,基站进行一轮干扰消除,不同用户的BLER进行了仿真。其中,基站配置 $M=32$ 天线,信道模型为瑞利衰落信道模型。从图中可以看出,进行一轮干扰消除,可以满足36个用户同时接入,且BLER低于 10^{-5} 。

4 结束语

Critical MTC作为6G的一个重要应用场景,对时延、可



▲图8 无干扰消除与进行一轮干扰消除的导频碰撞概率对比



▲图9 $M=32$ 时,进行一轮干扰消除时不同用户的误块率(BLER)

靠性和连接数量有很高的要求。本文中我们介绍了Critical MTC的关键能力指标、所涉及的关键技术以及存在的问题,提出了面向Critical MTC的无连接传输方案,并进行了仿真。仿真结果表明,本文提出的方案可以支持海量Critical MTC终端,同时满足低时延和高可靠的严格要求,在未来通信系统中具有潜在的应用前景。

致谢

感谢中兴通讯股份有限公司马一华、徐晓景工程师对本论文做出的贡献!

参考文献

- [1] ITU. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond [EB/OL]. [2023-06-22]. <https://www.itu.int/md/R19-SG05-C-0131>
- [2] 方敏, 段向阳, 胡留军. 6G技术挑战、创新与展望 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(3): 61-70. DOI: 10.12142/ZTETJ.202003012
- [3] 谢峰. 6G网络架构研究进展及建议 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(5): 28-37. DOI: 10.12142/ZTETJ.202305006
- [4] 韩书君, 董晴, 许晓东. 面向6G全场景的多频段协同覆盖扩展技术 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(4): 31-35. DOI: 10.12142/ZTETJ.202204007
- [5] 李福昌, 郭希蕊. 6G绿色网络发展趋势和关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(6): 54-59. DOI:10.12142/ZTETJ.202306009
- [6] 宫诗寻, 陶小峰. 5G大规模机器类通信中的传输技术 [J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(3): 20-23. DOI: 10.3969/j. issn. 1009-6868.2017.03.005
- [7] 陆平, 李建华, 赵维铎. 5G在垂直行业中的应用 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(1): 67-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.201901011
- [8] 陆平, 欧阳新志, 高雯雯. 5G行业虚拟专网能力提升与实践 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(2): 68-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.202202011
- [9] ABDELSEDEK M Y, GADALLAH Y, AHMED M H. A critical MTC resource allocation approach for LTE networks with finite blocklength codes [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(5): 5598-5609. DOI: 10.1109/TVT.2020.2982391
- [10] POKHREL S R, DING J, PARK J, et al. Towards enabling critical mMTC: a review of URLLC within mMTC [J]. IEEE access, 2020, 8: 131796-131813. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010271
- [11] MAHMOOD N H, BÖCKER S, MOERMAN I, et al. Machine type communications: key drivers and enablers towards the 6G era [J]. EURASIP journal on wireless communications and networking, 2021, 2021(1): 134. DOI: 10.1186/s13638-021-02010-5
- [12] MAHMOOD N H, BÖCKER S, MUNARI A, et al. White paper on critical and massive machine type communication towards 6G [EB/OL]. [2020-04-29]. <http://arxiv.org/abs/2004.14146.pdf>
- [13] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (release 14): 3GPP TR 38.913 [S]. 2017
- [14] DING J, NEMATI M, POKHREL S R, et al. Enabling grant-free URLLC: an overview of principle and enhancements by massive MIMO [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(1): 384-400. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3107242
- [15] JACOBSEN T, ABREU R, BERARDINELLI G, et al. System level analysis of uplink grant-free transmission for URLLC [C]// Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2017: 1-6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2017.8269137

- [16] XING S S, XU X Q, CHEN Y, et al. Advanced grant-free transmission for small packets URLLC services [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2019: 1–5. DOI: 10.1109/ICCW.2019.8757186
- [17] YUAN Z F, LI Z G, LI W M, et al. Contention-based grant-free transmission with extremely sparse orthogonal pilot scheme [C]//Proceedings of IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall). IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625265
- [18] KE M L, GAO Z, WU Y P, et al. Compressive sensing-based adaptive active user detection and channel estimation: massive access meets massive MIMO [J]. IEEE transactions on signal processing, 1809, 68: 764–779. DOI: 10.1109/TSP.2020.2967175
- [19] JIANG H, QU D M, DING J, et al. Multiple preambles for high success rate of grant-free random access with massive MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18 (10): 4779–4789. DOI: 10.1109/TWC.2019.2929126
- [20] YUAN Z F, LI W M, LI Z G, et al. Contention-based grant-free transmission with independent multi-pilot scheme [C]//Proceedings of IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall). IEEE, 2020: 1–7. DOI: 10.1109/VTC2020-Fall49728.2020.9348828
- [21] MAHMOOD N H, ABREU R, BÖHNKE R, et al. Uplink Grant-Free Access Solutions for URLLC services in 5G New Radio [C]//Proceedings of 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). IEEE, 2019: 607–612. DOI: 10.1109/ISWCS.2019.8877253
- [22] LIU Y, DENG Y S, ELKASHLAN M, et al. Analyzing grant-free access for URLLC service [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2021, 39(3): 741–755. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3018822
- [23] WANG C, CHEN Y, WU Y Q, et al. Performance evaluation of grant-free transmission for uplink URLLC services [C]//Proceedings of IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2017: 1–6. DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108593
- [24] DING J, CHOI J. SIC aided K-repetition for mission-critical MTC in cell-free massive MIMO [C]//Proceedings of IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). IEEE, 2021: 167–173. DOI: 10.1109/CSCN53733.2021.9686139
- [25] LI W M, YUAN Z F, MA Y H, et al. Grant-free data-only transmission with correlated antenna array [C]//Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2021: 1–7. DOI: 10.1109/GCWkshps52748.2021.9681993
- [26] YUAN Z F, HU Y Z, LI W M, et al. Blind multi-user detection for autonomous grant-free high-overloading multiple-access without reference signal [C]//Proceedings of IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2018: 1–7. DOI: 10.1109/VTCSpring.2018.8417836

作者简介



李志岗，中兴通讯股份有限公司技术预研无线高级工程师；主要研究方向为新型多址接入技术、无连接传输。



袁志锋 (通信作者)，中兴通讯股份有限公司无线算法预研工程师；研究领域涉及信息论、多址、纠错码、自适应算法、MIMO系统和高速软硬件算法。



董展谊，中兴通讯股份有限公司技术预研无线资深专家；主要从事6G预研工作；带领团队完成业务网络架构及相关协议的原型开发工作，并作为首席设计者，开发了验证平台通用驱动程序软件框架和通用eCpri程序软件框架。



李文斌，中兴通讯股份有限公司技术预研无线高级系统工程师；主要从事5G/6G关键技术原型验证相关工作。



梁楚龙，中兴通讯股份有限公司算法部预研工程师；研究方向为信道编码及其在通信系统中的应用；发表论文近40篇。