

5G 双连接场景下的低传输时延切换机制

裴旭明¹, 贾建鑫^{1,2}, 钱骅¹, 朱正航¹, 唐振宇¹, 康凯¹

(1. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210; 2. 上海海事大学信息工程学院, 上海 210306)

摘要: 针对 5G 双连接切换中辅基站不变的场景, 提出了一种新型切换机制。利用辅基站在切换过程中传输数据, 以降低传统切换方式中因完全断开双连接导致数据传输中断所引起的时延。首先, 对传统切换机制进行分析并进行问题定位; 其次, 提出并详细阐述新型切换机制的信令交互流程, 并分别建立新型切换机制与传统切换机制中数据传输时序模型; 最后, 基于数据传输时序模型, 用数学推导和仿真的方法对新型机制与传统机制进行对比评估, 相关结果显示新型机制在单个数据分组传输时延、数据分组平均传输时延和数据分组总传输时延三方面的优势。

关键词: 双连接切换; 传输时延; 信令交互

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019090

Low latency handover scheme for 5G dual-connectivity scenario

PEI Xuming¹, JIA Jianxin^{1,2}, QIAN Hua¹, ZHU Zhenghang¹, TANG Zhenyu¹, KANG Kai¹

1. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China

2. College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

Abstract: A novel handover scheme was proposed for the secondary node (SN) unchanged 5G dual-connectivity scenarios. In the proposed novel scheme, the SN connection was maintained for data packet transmission during the handover, however, both the main node (MN) and the SN were completely disconnected in the legacy scheme. The transmission delay during handover was decreased greatly by the proposed scheme. Firstly, the legacy handover scheme was analyzed and its deficiency was figured out. Then, the novel mechanism's signaling interaction was elaborated and the time sequence models for the novel scheme and the legacy scheme were further established. Finally, based on the time sequence model, the performance evaluation processes were carried out in terms of mathematical modeling and experimental simulations. The analysis results demonstrate that the proposed novel scheme reduces the single packet transmission delay, the average transmission delay and the total transmission delay, and has good performance advantages.

Key words: dual-connectivity handover, transmission delay, signaling interaction

1 引言

各种新型业务的不断涌现使移动数据流量呈指数级增长, 蜂窝网正承受前所未有的流量负载压力。为更好地应对急剧增长的数据流量, 有效提升用户的网络体验, 3GPP 在 Release 12^[1]中引入了双连接的概念, 即终端可在 RRC(radio resource control)

连接状态下同时利用主基站(MN, main node)与辅基站(SN, secondary node)的物理信道进行并行传输, 双连接扩展了载波聚合的应用, 其可以有效提升频谱效率并实现负载均衡^[2-3]。

基于 Release12, 3GPP 在 Release14 中进一步提出了 LTE-NR 双连接技术^[4], 其定义了 4G、5G 紧密互操作的技术规范, 开创性地将 RAT(radio

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-03-01

通信作者: 康凯, kangk@sari.ac.cn

基金项目: 国家科技重大专项课题基金资助项目 (No.2017ZX03001019); 国家自然科学基金资助项目 (No.61671436)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project of China (No.2017ZX03001019), The National Natural Science Foundation of China (No.61671436)

access technology)间的互操作过程下沉至网络边缘。对于 5G 而言, 基于 LTE-NR 双连接技术的非独立组网模式可使 5G 核心网与接入网分步部署, 有利于 5G 的快速部署与应用。随后, 在 R2-1811712^[4]中, 3GPP TS 37.340^[5]又将 NR-NR 双连接(5G 双连接)场景加入其中。

针对 5G 双连接的关键问题研究, 业界可谓百家争鸣, 例如针对 5G 双连接场景的 RRC 信令设计问题^[6-8]、针对 5G 双连接场景的测量配置问题^[9-16], 以及针对双连接场景终端切换后的数据按序交付问题^[17-20]。切换是 5G 双连接的一个重要功能, 而针对 5G 双连接场景的切换时延问题却少有讨论。

在 5G 双连接场景中, 一种称为终止于主基站的分离承载(MN terminated split bearer)的双连接形式如图 1 所示。UE(user equipment)同时具有到 MN 与 SN 的传输链路, UE 发送的上行数据可以被分别发送至 MN 与 SN, SN 将上行数据通过 Xn-U 接口转发至 MN, MN 将 2 路数据合并后通过 NG-U 接口传输至用户面功能模块 (UPF, user plane function)。UPF 发送的下行数据, 先通过 NG-U 接口被发送至 MN, MN 将其分成 2 路, 一路直接通过 MN 的空口发送至 UE, 另一路则首先通过 Xn-U 接口转发至 SN, 再由 SN 通过空口发送至 UE。网络侧的 PDCP(packet data convergence protocol)实体位于 MN, 其向下分别对接位于 MN 的 RLC(radio link control)实体和位于 SN 的 RLC 实体。UE 侧的 PDCP 实体向下分别对接 2 个 RLC 实体, RLC 实体向下分别对接各自的 MAC(media access control)实体与 PHY(physical)实体。

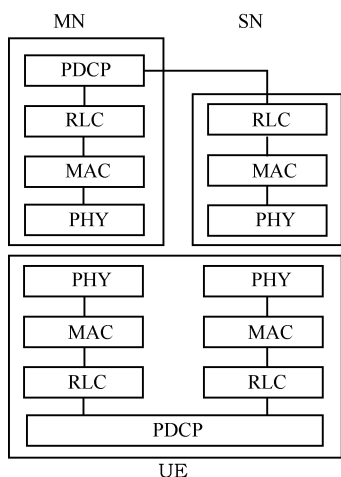


图1 终止于主基站的分离承载双连接的协议栈

一个典型的双连接切换场景如下: UE 与源 MN 及源 SN 已经建立双连接, 此时触发切换, UE 由源 MN 及源 SN 切换至目标 MN 及目标 SN; 源 MN 与目标 MN 是不同的基站, 但源 SN 与目标 SN 为同一个基站。

针对上述切换场景, 当前 5G 标准^[21]没有对其进行特殊处理, 而是归于源 SN 与目标 SN 为不同的基站来进行处理。现有的处理流程没有利用“SN 在切换过程中未发生改变”这一条件, 未能有效减小该情况下核心网与 UE 间的数据传输时延。鉴于此, 本文提出一种针对 5G 双连接场景的新型切换机制, 本文的主要贡献如下。

1) 针对 5G 双连接切换的场景, 提出了一种能够降低切换过程中数据传输时延的新型切换机制, 并对该机制的信令交互流程进行详细阐述。

2) 基于信令交互流程, 建立了传统切换机制与新型切换机制的数据传输时序模型。

3) 基于数据传输时序模型, 以数学推导与仿真的方式对新型切换机制与传统切换机制进行对比, 其中主要关注的性能指标包括单个数据分组的传输时延、数据分组的平均传输时延及数据分组的总传输时延, 推导结果及仿真结果可显示出新型机制的有效性与优越性。

下文中, 源 SN 与目标 SN 实际为同一设备, 将根据情况用源 SN、目标 SN 及 SN 指代。

2 传统切换机制

传统切换机制的信令流程如图 2 所示, 信令的交互流程的具体解释如下所示。

1) 如图 3(a)场景 1 所示, 切换前, UE 与源 MN 及源 SN 的双连接已经建立。源 MN 向目标 MN 发送信令 handover request 来发起一次切换过程。

2) 目标 MN 向目标 SN 发送信令 SN addition request。

3) 目标 SN 向目标 MN 回复信令 SN addition request ACK, 该信令包含 RRC 信令, 它将经过目标 MN 与源 MN 最终发送给 UE。

4) 目标 MN 向源 MN 发送信令 handover request ACK, 其中包含 RRC 信令。

5) 源 MN 向源 SN 发送信令 SN release request。

6) 源 SN 收到信令 SN release request 后即停止对 UE 的数据服务。此后下行分离承载仅在源 MN 与 UE 间传送。源 SN 向源 MN 回复信令 SN release request ACK。

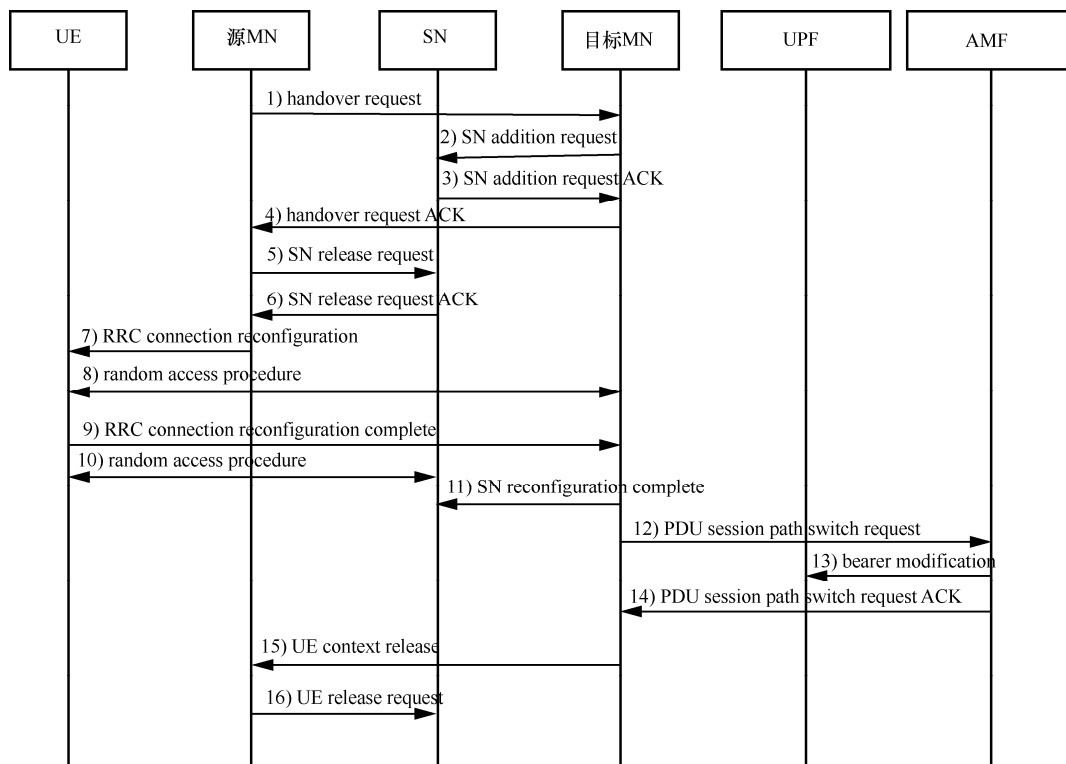


图 2 传统切换机制信令交互流程

7) 源 MN 通过空口向 UE 下发 RRC 信令 RRC connection reconfiguration, 发送成功后即开始将来自 UPF 的下行数据从源 MN 转发至目标 MN。由于此时 UE 还未与目标 MN 建立连接, 并且源 SN 已经停止对 UE 的数据服务, 所以转发的数据需要由目标 MN 暂时缓存而无法发给 UE, 因此引发了下行传输时延的增加。

8) UE 收到 RRC connection reconfiguration 信令后, 首先注销与源 MN 相关的 PDCP 实体及 RLC 实体, 并注销与源 SN 相关的 RLC 实体, 然后断开与源 MN 和源 SN 的连接, 如图 3(b)场景 2 所示。UE 的上行数据开始无法发送, 引发了上行传输时延的增加。之后 UE 向目标 MN 执行随机接入; 成功后, 再根据 RRC connection reconfiguration 信令, 新建与目标 MN 相关的 PDCP 实体与 RLC 实体, 新建与目标 SN 相关的 RLC 实体。

9) UE 向目标 MN 发送对 RRC 信令的响应, 即 RRC connection reconfiguration complete。此后源 MN 转发给目标 MN 的下行数据才能被目标 MN 分流。目标 MN 分流的数据或直接经目标 MN 的空口发给 UE, 或通过 Xn-U 接口发送给目标 SN。UE 产生的上行数据开始可以通过空口发给目标 MN, 再由目标 MN 发给 UPF。

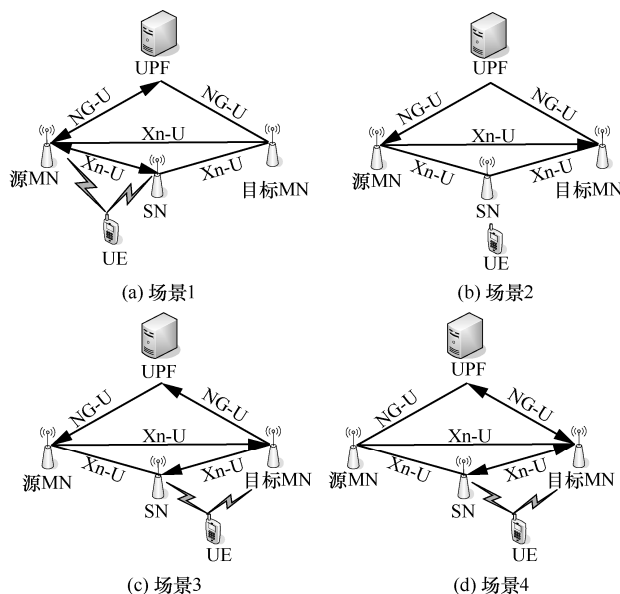


图 3 基于传统切换机制的切换场景

10) UE 向目标 SN 执行随机接入。成功后, 目标 MN 通过 Xn-U 接口发给目标 SN 的数据才能经目标 SN 的空口发给 UE。UE 的上行数据可以由空口发给目标 MN 或目标 SN, 切换后的双连接已经恢复, 如图 3(c)场景 3 所示。

11) 切换成功后, 目标 MN 向目标 SN 发送 SN reconfiguration complete。

12) 目标 MN 向接入与移动功能管理模块 (AMF, access and mobility management function) 发送 PDU session path switch request, 请求 UPF 将下行数据发送给目标 MN。

13) 核心网内的路径切换信令交互过程。

14) AMF 向目标 MN 发送信令 PDU session path switch response ACK。下行数据从由 UPF 发送给源 MN 改为发送给目标 MN。此后, 源 MN 不会再收到来自 UPF 的下行数据, 如图 3(d)场景 4 所示。

15) 目标 MN 向源 MN 发送信令 UE context release。

16) 源 MN 向源 SN 发送 UE release request。
切换流程结束。

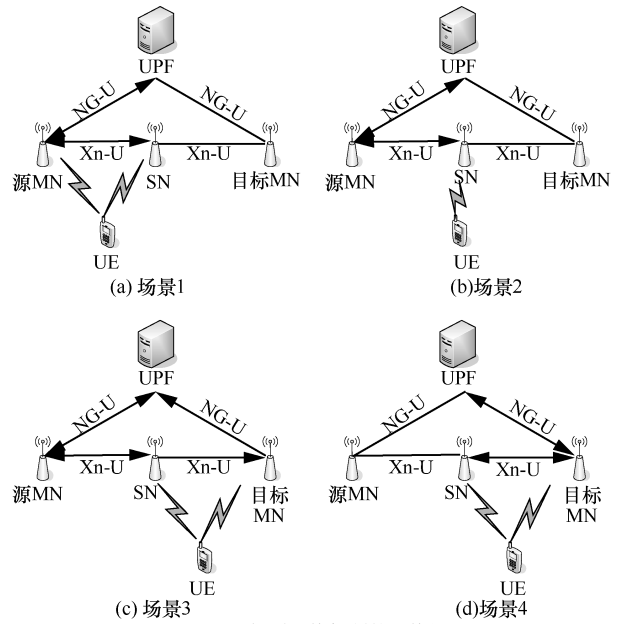


图5 基于新型切换机制的切换场景

3 新型切换机制

新型切换机制的信令流程如图 4 所示, 信令交互流程的具体解释, 如下所示。

1) 切换前, 源 MN、源 SN 和 UE 之间的双连接已经建立, 如图 5(a)场景 1 所示, 空口协议实体对应关系如图 6 所示。

源 MN 向目标 MN 发送信令 handover request, 信令中新增一个标志位 SN static request, 用来建议目标 MN 在本次切换中保持 SN 不变, 即源 SN 与目标 SN 实际为同一基站。信令中还包含有 UE 的空口协议栈实体的当前配置信息, 即 UE 侧的

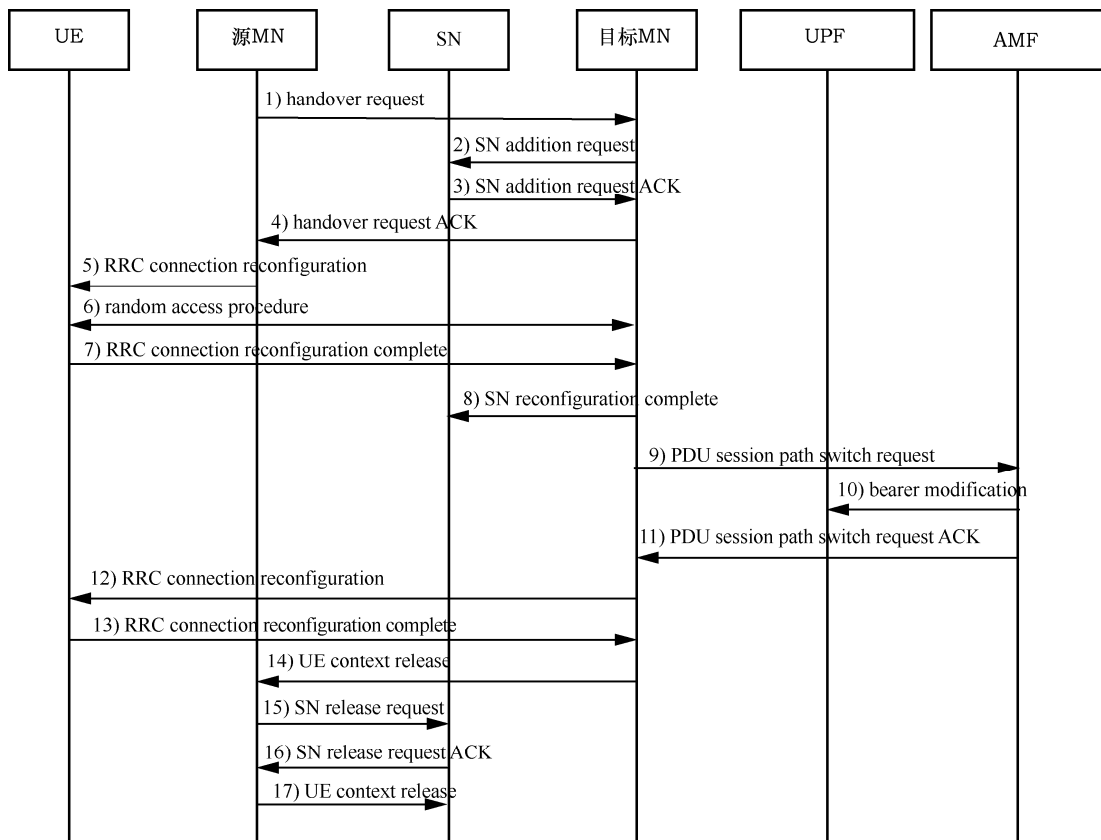


图4 新型切换机制信令交互流程

RLC-source main U、RLC-source-secondary U 和 PDCP-source U。

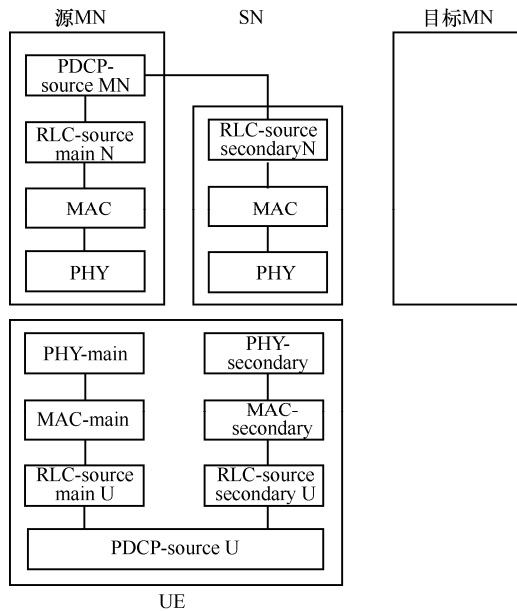


图 6 切换前协议栈对应关系

2) 目标 MN 接受在本次切换中保持 SN 不变。目标 MN 向 SN 发送 SN addition request 信令, 信令中新增一个标志位 SN static request, 指明 UE 在本次切换过程中需要保持 SN 不变。

3) SN 新建一个 RLC 实体 RLC-target secondary N, 并回复信令 SN addition request ACK 给目标 MN, 信令新增一个标志 SN static response, 指明 SN 接受在本次切换中保持 SN 不变。信令中还包含将通过目标 MN、源 MN, 最终发给 UE 的 RRC 信令。RRC 信令请求 UE 在切换过程中不对 SN 执行随机接入, 并请求 UE 新建 RLC 实体 RLC-target secondary U。

4) 目标 MN 新建一个 PDCP 实体 PDCP-target N, 新建一个 RLC 实体 RLC-target main N。目标 MN 向源 MN 发送信令 handover request ACK, 信令新增一个标志 SN static response, 指明目标 MN 接受本次切换中保持 SN 不变, 并将待发送给 UE 的 RRC 信令发送给源 MN。该 RRC 信令包含步骤 3) 中提到的 RRC 信令; 还包含目标 MN 生成的 RRC 信令, 内容为请求 UE 建立新 PDCP 实体 PDCP-target U、新 RLC 实体 RLC-target main U, 并请求 UE 注销 RLC 实体 RLC-source main U。

5) 源 MN 收到信令 handover request ACK 后, 就开始将接收到的来自 UPF 的下行数据, 都通过

RLC-source secondary N 实体经过空口发送给 UE, 而不会通过 Xn-U 接口转发给目标 MN。源 MN 通过空口向 UE 发送 RRC 信令 RRC connection reconfiguration。源 MN 在完成当前正在执行的通过 RLC-source main N 的数据传输后, 注销 RLC-source main N。

UE 在收到 RRC 信令后, 新建 PDCP 实体 PDCP-target U, 新建 RLC 实体 RLC-target main U, 新建 RLC 实体 RLC-target secondary U。UE 注销 RLC 实体 RLC-source main U, 并将通过 RLC-source main U 发送失败的上行数据, 改由 RLC-source secondary U 重新发送。此后分离承载都经过 RLC-source secondary U 传输, 空口协议栈关系如图 7 所示, 虚线框表示实体已经建立, 但由于底层的同步此时并未建立, 所以不能经过这些实体传输数据。该状态下, 从 UPF 发来的下行数据到达源 MN, 源 MN 通过 RLC-source secondary N 发送给 UE。UE 的上行数据通过 PDCP-source U 实体、RLC-source secondary U 实体、RLC-source secondary N 实体和 PDCP-source N 实体, 经过源 MN 发给 UPF, 如图 5(b)场景 2 所示。

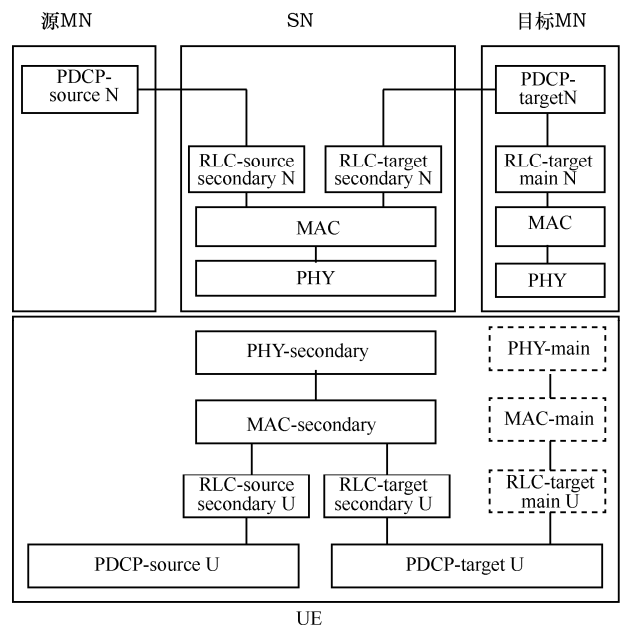


图 7 UE 收到 RRC 信令后协议栈对应关系

6) UE 对目标 MN 执行随机接入, 成功后协议栈对应关系如图 8 所示。

7) UE 向目标 MN 发送信令 RRC connection reconfiguration complete, 此后 UE 的上行数据可以经过 PDCP-target U 实体发送。UE 与目标 MN 和 SN 之间的双连接已经恢复, 如图 5(c)场景 3 所示。

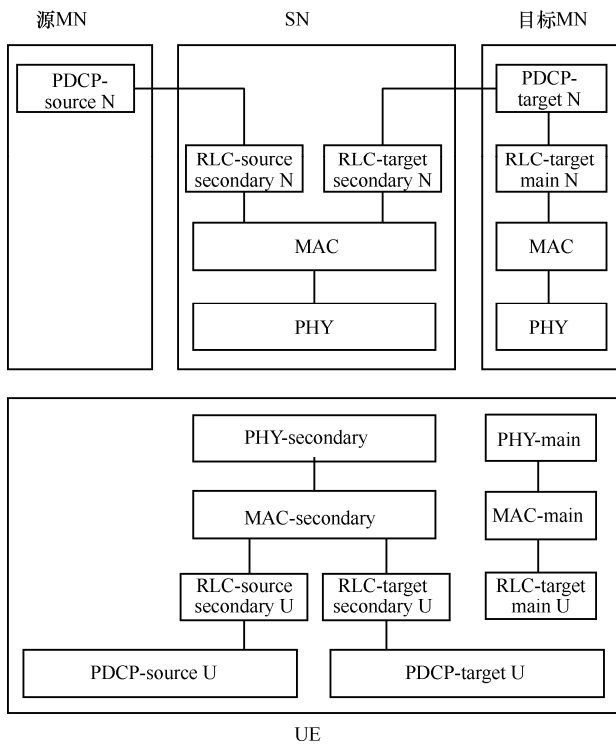


图 8 UE 成功接入目标 MN 后协议栈对应关系

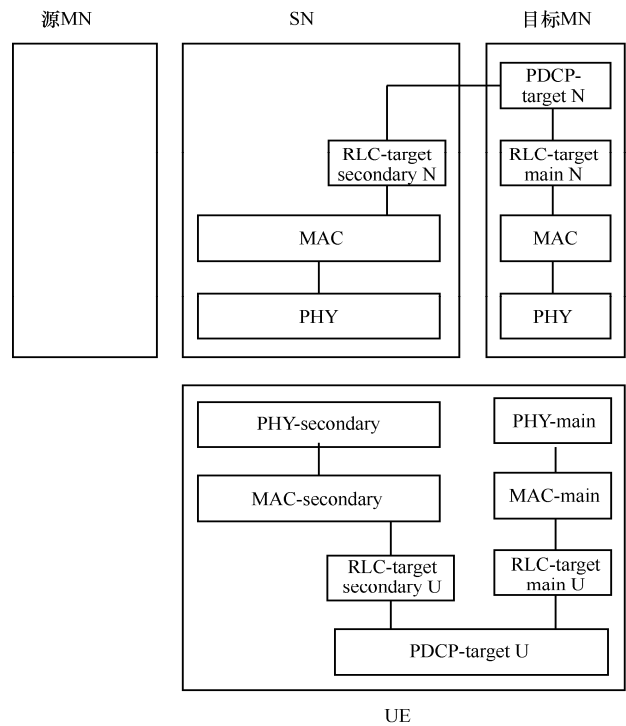


图 9 源 MN 向源 SN 发送 SN release request 后协议栈对应关系

8) 目标 MN 向 SN 发送信令 SN reconfiguration complete。

9) 目标 MN 向 AMF 发送信令 PDU session path switch request，请求切换下行数据路径。

10) 核心网内的路径切换信令交互过程。

11) AMF 向目标 MN 回复信令 PDU session path switch request ACK。UPF 向源 MN 发送一个特殊帧 end marker，之后 UPF 产生的下行数据不再发送给源 MN，全部发送给目标 MN。源 MN 在将 end marker 之前收到的下行数据全部发给 UE 后，将 end marker 发给目标 MN。

12) 目标 MN 收到 PDU session path switch request ACK 和 end marker 后，向 UE 发送 RRC 信令，注销 UE 的 PDCP-source U 和 RLC-source secondary U。

13) UE 向目标 MN 回复信令 RRC connection reconfiguration complete。

14) 目标 MN 向源 MN 发送信令 UE context release。

15) 源 MN 向 SN 发送 SN release request。SN 注销 RLC-source secondary N。源 MN 注销 PDCP-source N。此时空口协议栈状态如图 9 所示，整个系统的数据传输路径如图 5(d)场景 4 所示。

16) SN 向源 MN 回复信令 SN release request ACK。

17) 源 MN 向 SN 发送 UE context release。

切换流程结束。需要补充说明的是，新型切换机制的处理流程由源 MN 发起，通过在信令中附加的标志位，由目标 MN 和 SN 协商决定是否执行新型机制处理流程。如果目标 MN 或 SN 认为不适合执行新型切换机制，可以直接回退到传统切换机制，因此新型切换机制不会对系统造成破坏性影响。

4 性能评估

4.1 数学模型建立

设切换前源 MN 与源 SN 已经与 UE 建立双连接，设双连接空口下行总传输速率为 R ，源 SN 侧下行传输速率为 αR ，源 MN 侧下行传输速率为 $(1-\alpha)R$ ，其中 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。设 T_1 为源 MN 发出信令“RRC connection reconfiguration”到目标 MN 发出信令“SN reconfiguration complete”的时间间隔； T_2 为目标 MN 发出信令“SN reconfiguration complete”到目标 MN 接收信令“PDU session path switch request ACK”的时间间隔。在切换过程中，双连接下行数据发送速率变化如图 10 所示。此外，将一个下行数据分组的传输时延定义为从 UPF 发

出到 UE 完成接收所消耗的时间。

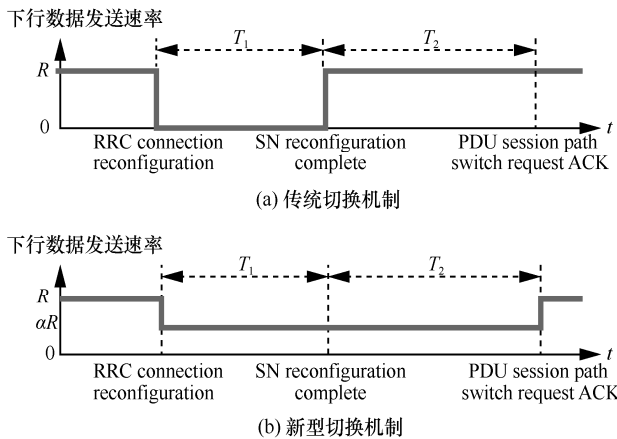


图 10 双连接下行数据发送速率变化

设 UPF 发送的下行数据分组全部等长, 并设 UPF 发送下行数据分组的持续时间为 T_x , $0 \leq T_x \leq T_1 + T_2$ 。设每个数据分组在 NG-U 链路中的传输耗时为 T_p , 且 $T_p \leq T_1$, 则 UPF 发出的下行数据分组总数为

$$N = \frac{T_x}{T_p} \quad (1)$$

设切换前一个数据分组在双连接链路中的传输耗时为 T_w , 设切换前与切换中的 α 保持不变, 则在使用新型切换机制的切换过程中, 一个数据分组在双连接链路中的传输耗时为 $\frac{T_w}{\alpha}$ 。

用于评估数据传输性能的 3 种时延如下。

单个数据分组的传输时延: 假设一个数据分组的长度为若干比特, 单个数据分组的传输时延定义为 UPF 发出该数据分组第一个比特的时间与 UE 接收完成该数据分组最后一个比特的时间的差值。

N 个数据分组的总传输时延: 指 UPF 发出第一个数据分组的第一个比特的时间与 UE 接收完成第 N 个数据分组最后一比特的时间的差值。

N 个数据分组的平均传输时延: 即 N 个数据分组的总传输时延与数据分组个数 N 的比值。

基于上述定义, 本文以 UPF 连续发送 N 个数据分组为例, 来分析下述 3 种情况的数据分组传输时延。

情况 1 未发生切换时, UPF 连续下发 N 个数据分组, UE 与基站及 UPF 间的传输时序如图 11 所示。

根据图 11, 未发生切换时, N 个数据分组的总

传输时延为

$$T_p + NT_w = T_p + \frac{T_x}{T_p} T_w \quad (2)$$

令 SD_i 代表第 i 个数据分组的传输时延, 其中 i 为大于或等于 1 且小于或等于 N 的整数, 则未发生切换时每个数据分组的传输时延为

$$SD_i = iT_w - (i - 2)T_p, \quad i \in \mathcal{N}^+, 1 \leq i \leq N \quad (3)$$

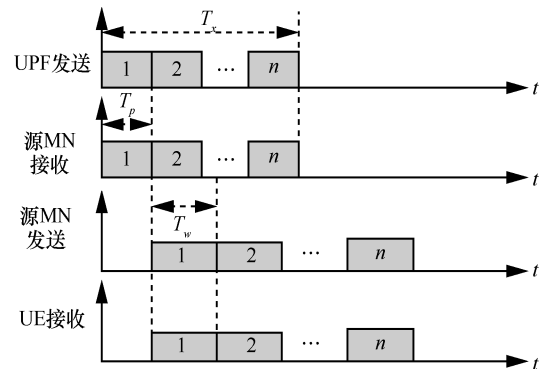


图 11 未发生切换时的传输时序

情况 2 当使用传统切换机制时, UPF 连续下发 N 个数据分组, UE 与基站及 UPF 间的传输时序如图 12 所示, 此时数据分组总传输时延为

$$T_1 + NT_w = T_1 + \frac{T_x}{T_p} T_w \quad (4)$$

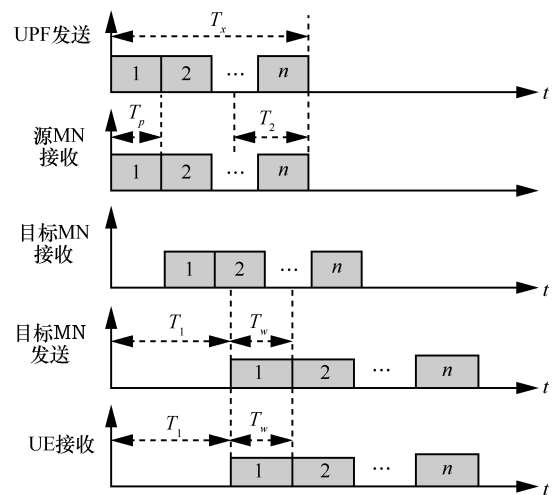


图 12 基于传统切换机制的传输时序

同样的, 令 SD_i 代表第 i 个数据分组的传输时延, 其中 i 为大于或等于 1 且小于或等于 N 的整数, 则基于传统切换机制的每个数据分组的传输时延为

$$SD_i = T_1 + iT_w - (i - 1)T_p, \quad i \in \mathcal{N}^+, 1 \leq i \leq N \quad (5)$$

此外, 令 AD_{legacy} 为基于传统切换机制的数据分组平均传输时延, 则 AD_{legacy} 可由式(6)获得。

$$AD_{\text{legacy}} = \left[\sum_{i=1}^N (T_1 + iT_w - (i-1)T_p) \right] \frac{1}{N} = \left[NT_1 + T_w(1+2+\dots+N) - T_p(1+2+\dots+(N-1)) \right] \frac{1}{N} = \left[NT_1 + T_w \left(N + \frac{N(N-1)}{2} \right) - T_p((N-1) + \frac{(N-1)(N-2)}{2}) \right] \frac{1}{N} = \left[NT_1 + \frac{T_w(N^2+N)}{2} - \frac{T_p(N^2-N)}{2} \right] \frac{1}{N} = T_1 + \frac{T_w(N+1)}{2} - \frac{T_p(N-1)}{2}, N \in \mathcal{N} + \quad (6)$$

情况 3 当使用新型切换机制时, UPF 连续下发 N 个数据分组, UE 与基站及 UPF 间的传输时序如图 13 所示。

由图 13 可得, 基于新型切换机制的数据分组总传输时延为

$$T_p + N \frac{T_w}{\alpha} = T_p + \frac{T_x}{T_p} \frac{T_w}{\alpha} \quad (7)$$

令 SD_i 代表第 i 个数据分组的传输时延, 其中 i 为大于或等于 1 且小于或等于 N 的整数, 则基于新型切换机制的每个数据分组的传输时延为

$$SD_i = i \frac{T_w}{\alpha} - (i-2)T_p, i \in \mathcal{N} +, 1 \leq i \leq N \quad (8)$$

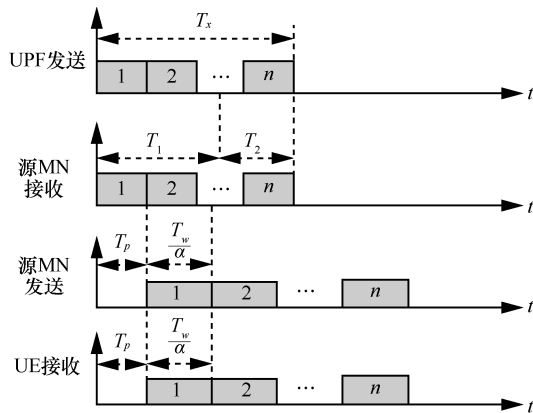


图 13 基于新型切换机制的传输时序

令 AD_{proposed} 为基于新型切换机制的数据分组

平均传输时延, 则 AD_{proposed} 可通过式(9)获得。

$$AD_{\text{proposed}} = \left[\sum_{i=1}^N \left(i \frac{T_w}{\alpha} - (i-2)T_p \right) \right] \frac{1}{N} = \left[\frac{T_w}{\alpha} + 2 \frac{T_w}{\alpha} + \dots + N \frac{T_w}{\alpha} + T_p - T_p(1+2+\dots+(N-2)) \right] \frac{1}{N} = \left[\frac{T_w}{\alpha} \left(N + \frac{N(N-1)}{2} \right) + T_p - T_p \left((N-2) + \frac{(N-2)(N-3)}{2} \right) \right] \frac{1}{N} = \left[\frac{NT_w(N+1)}{2\alpha} + T_p - \frac{T_p(N-2)(N-1)}{2} \right] \frac{1}{N} = \frac{T_w(N+1)}{2\alpha} + \frac{T_p}{N} - \frac{T_p(N-2)(N-1)}{2N} \quad (9)$$

4.2 单个数据分组传输时延评估

设新型切换机制中第 i 个数据分组的传输时延为 $SD_{\text{proposed } i}$, 设传统切换机制中第 i 个数据分组的传输时延为 $SD_{\text{legacy } i}$, 则当第 i 个数据分组的传输时延满足 $SD_{\text{proposed } i} < SD_{\text{legacy } i}$ 时, 第 $i-1$ 个数据分组的传输时延也满足 $SD_{\text{proposed } i-1} < SD_{\text{legacy } i-1}$, 证明过程如式(10)所示。

由此, 在已知其他参数的情况下, 可以通过比较 2 种切换机制的第 N 个分组(即在 T_x 时间内连续发送的最后一个下行数据分组)的传输时延来计算 α 的取值范围, 使新型切换机制的单个数据分组传输时延小于传统切换机制的相同索引的数据分组的传输时延, 如式(11)。

根据式(11)和 $0 < \alpha < 1$, 所以 α 应满足式(12)。

对于 $\forall \alpha, \alpha \in (0,1)$ 和 $\forall i, i \in [2, N]$

若 $SD_{\text{proposed } i} < SD_{\text{legacy } i}$,

则 $SD_{\text{proposed } i-1} < SD_{\text{legacy } i-1}$

证明

$$\because SD_{\text{proposed } i} < SD_{\text{legacy } i}$$

$$\therefore i \frac{T_w}{\alpha} - (i-2)T_p < T_1 + iT_w - (i-1)T_p$$

$$\Rightarrow T_1 + NT_w - (i-1)T_p - \left[i \frac{T_w}{\alpha} - (i-2)T_p \right] > 0$$

$$\Rightarrow T_1 + NT_w \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) - T_p > 0 \quad (\text{推论1})$$

$$\because \alpha \in (0,1), \therefore T_w > 0$$

$$\therefore \frac{1}{\alpha} > 1, \therefore \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) < 0,$$

$$\therefore -T_w(1 - \frac{1}{\alpha}) > 0 \quad (\text{推论2})$$

$$\text{则 } SD_{\text{legacy } i-1} - SD_{\text{proposed } i-1} =$$

$$T_1 + (N-1)T_w(1 - \frac{1}{x}) - T_p =$$

$$T_1 + NT_w(1 - \frac{1}{x}) - T_p - T_w(1 - \frac{1}{x}) =$$

$$[T_1 + NT_w(1 - \frac{1}{x}) - T_p] + [-T_w(1 - \frac{1}{x})] > 0 \quad (10)$$

(应用推论1和推论2)

即 $SD_{\text{proposed } i-1} < SD_{\text{legacy } i-1}$ 证毕。

$$SD_{\text{proposed } N} < SD_{\text{legacy } N}$$

$$\Rightarrow N \frac{T_w}{\alpha} - (N-2)T_p < T_1 + NT_w - (N-1)T_p$$

$$\Rightarrow N \frac{T_w}{\alpha} < T_1 - T_p + NT_w$$

$$\Rightarrow \alpha > \frac{NT_w}{T_1 - T_p + NT_w} \quad (11)$$

$$\Rightarrow \alpha > \frac{T_x T_w}{T_1 T_p - (T_p)^2 + T_x T_w} \quad (11)$$

$$\alpha \in (\frac{T_x T_w}{T_1 T_p - (T_p)^2 + T_x T_w}, 1) \quad (12)$$

为观察 α 对将单个数据分组的传输时延的影响, 取图 14 所示的特殊值并通过计算得到所示实验结果, 切换过程中发送的数据分组总数 N 是根据式(1)求出的, 即数据分组索引可以取的最大值, 在本文为 15。图 14 中 “+” 代表基于传统切换机制的每个数据分组的传输时延, 其他 9 条曲线代表当 α 分别取 0.1~0.9 时基于新型切换机制的每个数据

分组的传输时延。

为更清楚地体现 α 取 0.6~0.9 时新型机制的性能, 对图 14 中当 α 取 0.6~0.9 时代表新型切换机制的 4 条曲线与传统切换机制的时延对比进行了放大显示, 如图 15 所示。当 α 的取值落在式(12)给出的范围内时, 对不超过 N 的任意一个数据分组索引 i , 能保证基于新型切换机制的切换过程中第 i 个数据分组的传输时延小于基于传统切换机制切换过程中第 i 个数据分组的传输时延。例如, 当 α 的取值为 0.8 时 (图 15 中 “ \triangleleft ” 所示), 基于新型切换机制的第 15 个数据分组的传输时延小于基于传统切换机制的第 15 个数据分组的传输时延, 新型切换机制第 14 个分组也小于传统切换机制第 14 个分组的时延, 依此类推。

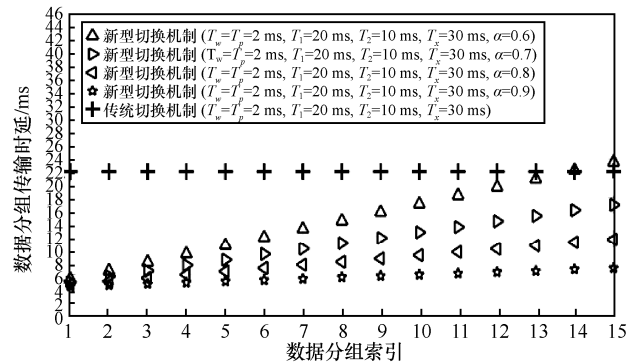


图 15 对图 14 中 α 取 0.6~0.9 时与传统机制时延对比的放大显示

4.3 数据平均传输时延评估

根据式(6)与式(9), 在已知其他参数的情况下, 计算 α 的取值范围, 使新型切换机制的平均传输时延小于传统切换机制的平均传输时延, 如式(13)所示。

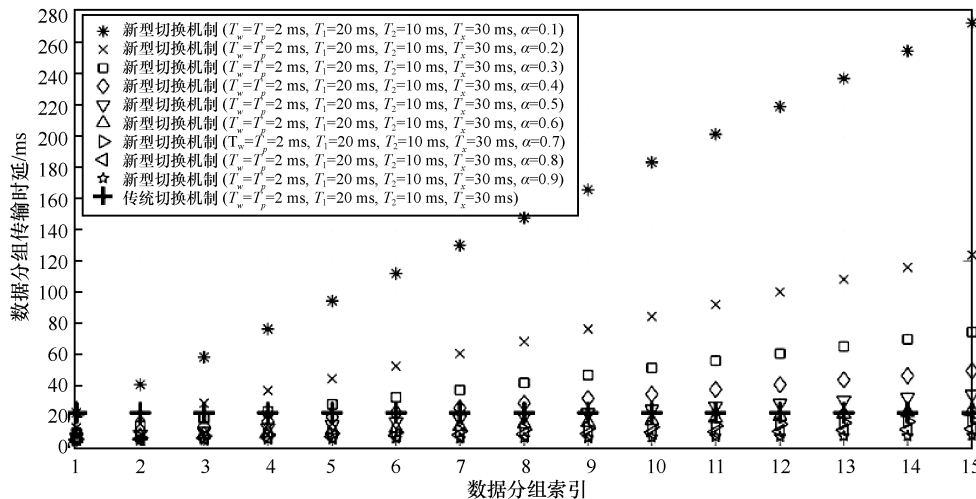


图 14 α 的值对单个数据分组传输时延的影响

$$\begin{aligned}
 &AD_{\text{proposed}} < AD_{\text{legacy}} \\
 &\Rightarrow SE_1 < SE_2 \\
 &SE_1 = \frac{T_w(N+1)}{2\alpha} + \frac{T_p}{N} - \frac{T_p(N-2)(N-1)}{2N} \\
 &SE_2 = T_1 + \frac{T_w(N+1)}{2} - \frac{T_p(N-1)}{2} \Rightarrow SE_3 < SE_4 \\
 &SE_3 = \frac{NT_w(N+1) + 2\alpha T_p - \alpha T_p(N-2)(N-1)}{2\alpha N} \\
 &SE_4 = \frac{2T_1 + T_w(N+1) - T_p(N-1)}{2} \Rightarrow SE_5 < SE_6 \\
 &SE_5 = \frac{NT_w(N+1) + 2\alpha T_p - \alpha T_p(N-2)(N-1)}{\alpha N} \\
 &SE_6 = 2T_1 + T_w(N+1) - T_p(N-1) \\
 &\Rightarrow \alpha > \frac{T_w(N+1)}{2T_1 - 2T_p + NT_w + T_w}, N \geq 1, N \in \mathcal{N}+ \quad (13)
 \end{aligned}$$

根据式(13)及条件 $0 < \alpha < 1$ ，当 α 满足式(14)所示条件时，新型切换机制的平均传输时延恒小于传统切换机制的平均传输时延。

$$\alpha \in \left(\frac{T_w(N+1)}{2T_1 - 2T_p + NT_w + T_w}, 1 \right) \quad (14)$$

N 可根据式(1)进行计算，得式(15)。

$$\alpha \in \left(\frac{T_x T_w + T_w T_p}{2T_1 T_p - 2(T_p)^2 + T_x T_w + T_w T_p}, 1 \right) \quad (15)$$

进一步，将传统切换机制与新型切换机制进行对比评估，仿真结果如图 16 所示。可以看出，对于数据分组的平均传输时延，当取图 16 所示的特殊值时，在 $\alpha > 0.6$ 时，新型切换机制的平均传输时延恒小于传统切换机制的平均传输时延。

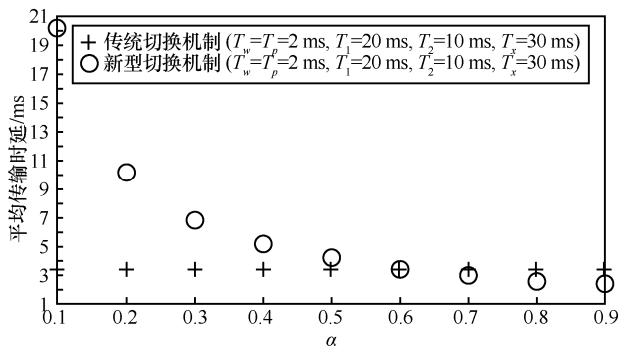


图 16 平均传输时延对比

4.4 数据总传输时延评估

设新型切换机制的总传输时延为 TD_{proposed} ，传统切换机制的总时延为 TD_{legacy} ，在已知其他参数的情况下，计算 α 的取值范围，使得新型切换机制的

总传输时延恒小于传统切换机制的总传输时延，如式(16)所示。

$$\begin{aligned}
 &TD_{\text{proposed}} < TD_{\text{legacy}} \\
 &\Rightarrow T_p + \frac{T_x}{T_p} \frac{T_w}{\alpha} < T_1 + \frac{T_x}{T_p} T_w \\
 &\Rightarrow \frac{T_x T_w}{\alpha T_p} < T_1 - T_p + \frac{T_x T_w}{T_p} \\
 &\Rightarrow \alpha > \frac{T_x T_w}{T_1 T_p - (T_p)^2 + T_x T_w} \quad (16)
 \end{aligned}$$

根据式(16)及条件 $0 < \alpha < 1$ ，当 α 满足式(17)时，新型切换机制的总传输时延恒小于传统切换机制的总传输时延。

$$\alpha \in \left(\frac{T_x T_w}{T_1 T_p - (T_p)^2 + T_x T_w}, 1 \right) \quad (17)$$

进一步，将传统切换机制与新型切换机制进行对比评估，仿真结果如图 17 所示。可以看出，对于数据分组的平均传输时延，当取如图 17 所示的特殊值时，在 $\alpha > 0.6$ 时，新型切换机制的总传输时延恒小于传统切换机制的总传输时延。

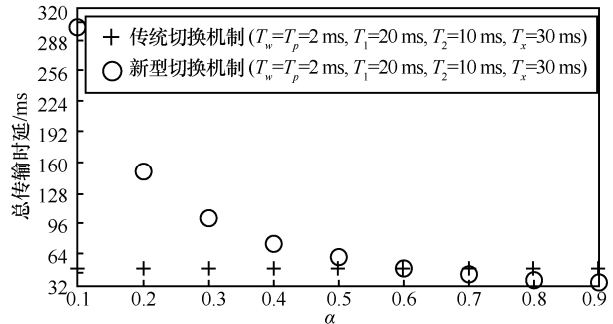


图 17 总传输时延对比

4.5 新型切换机制的实际应用条件

5G 双连接系统在实际运行时会根据信道条件来计算 α 。考虑切换过程中 UPF 发出的下行数据的传输时延，当实际的 α 落在式(12)给出的范围内时，应用新型切换机制时单个下行数据分组传输时延小于应用传统切换机制时单个下行数据分组传输时延，此时可以启用新型切换机制进行切换；若实际的 α 超出式(12)给出的范围，则可以使用传统切换机制进行切换。同样地，通过式(15)或式(17)得到的 α 取值范围，也可以作为是否应该启用新型切换机制切换的判定标准。实际 α 落在式(15)给出的范围内时，应用新型切换机制时

下行数据分组平均传输时延小于应用传统切换机制时下行数据分组平均传输时延；实际 α 落在式 (17) 给出的范围内时，应用新型切换机制时下行数据分组总传输时延小于应用传统切换机制时下行数据分组总传输时延。

5 结束语

针对双连接切换中辅基站不变的场景中核心网与 UE 之间数据传输时延问题，提出了一种新型切换机制。首先，针对传统切换机制进行分析并对影响数据传输时延的关键问题进行定位；其次，对新型切换机制的信令交互流程进行详细阐述，利用辅基站在切换过程中传输数据，避免双连接在切换中完全断开，以此减少由切换过程中数据传输暂时中断引起的传输时延；最后，通过数学推导与仿真对所提机制与传统机制进行对比评估，相关结果显示新型机制在单个数据传输时延、数据平均传输时延及总传输时延方面的优越性。

参考文献：

- [1] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN): overall description (release 13): TS 36.300 V13.4.0 [S]. 3rd Generation Partnership Project, 2016.
- [2] ROSA C, PEDERSEN K, WANG H, et al. Dual connectivity for LTE small cell evolution: functionality and performance aspects [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(6):137-143.
- [3] KIBRIA M G, NGUYEN K, VILLARDI G P, et al. Next generation new radio small cell enhancement: architectural options, functionality and performance aspects [J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(4):120-128
- [4] HUAWEI, HISILICON. R2-1811712 TP to 37.340 for NR-NR DC [R]. Gothenburg, Sweden: 3GPP RAN2#103, 2018.
- [5] 3GPP. Study on new radio access technology: radio access architecture and interfaces (release 14): TR38.801 V14.0.0 [S]. 3rd Generation Partnership Project, 2017.
- [6] INTEL. R2-1813992 RRC reconfiguration structure for NR-DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [7] HUAWEI, HISILICON. R2-1814119 details on RRCRe configuration for NR-DC and NE-DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [8] ERICSSON. R2-1812020 NR RRC design principles for NN-DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [9] ZTE. R2-1811589 Consideration on the measurement configuration for NR-NR DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [10] HUAWEI, HISILICON. R2-1811714 Discussion of Measurement Aspects for NR-NR-DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [11] NOKIA, NOKIA SHANGHAI BELL. R2-1812714 Consideration on Measurement configuration in NR-NR DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [12] QUALCOMM INCORPORATED. R2-1813813 Discussions on measurement gap configuration and coordination in N-R-DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [13] HUAWEI, HISILICON. R2-1814114 Discussion of measurement aspects for NR-NR-DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [14] INTEL CORPORATION. R2-1814486 NR-NR DC measurement configuration[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [15] NOKIA SHANGHAI BELL. R2-1814529 Consideration on measurement configuration in NR-NR DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [16] ERICSSON. R2-1814567 MN and SN measurement configuration in NR-DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [17] HUAWEI, HISILICON. R2-1807184 QoS flow offloading in DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [18] SAMSUNG. R2-1815319 QoS flow handling in NR-DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [19] HUAWEI, HISILICON. R2-1812147 In order delivery during QoS flow relocation in MR-DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [20] HUAWEI, HISILICON. R2-1809975 In order delivery during QoS flow relocation in MR-DC[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [21] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and NR: multi-connectivity (release 15): TS 37.340 V15.1.0 [S]. 3rd Generation Partnership Project, 2018.

[作者简介]



裴旭明 (1984—)，男，辽宁铁岭人，中国科学院上海高等研究院工程师，主要研究方向为 LTE 与 5G 无线通信系统。

贾建鑫 (1988—)，男，山东青岛人，上海海事大学博士生，中国科学院上海高等研究院助理工程师，主要研究方向为 LTE 与 5G 无线通信系统。

钱骅 (1976—)，男，江苏武进人，博士，中国科学院上海高等研究院研究员，主要研究方向为无线通信系统的物理层理论研究与实现、非线性信号处理及大数据信号处理理论等。

朱正航 (1982—)，男，山西晋中人，中国科学院上海高等研究院高级工程师，主要研究方向为 5G、软件无线电。

唐振宇 (1993—)，男，安徽巢湖人，中科院上海高等研究院助理工程师，主要研究方向为软件无线电、物联网数据平台。

康凯 (1977—)，男，黑龙江哈尔滨人，博士，中科院上海高等研究院正高级工程师，主要研究方向为 5G 通信系统、下一代 Wi-Fi 系统。

通信学报

Journal on Communications



发行代号： $\frac{\text{国内}2-676}{\text{国外}M395}$

2019年4月25日出版 定价：98.00元

ISSN 1000-436X

