

高铁场景下基于缓存的无线云接入 预下载机制研究

张嘉驰^{1,2}, 刘留¹, 韩柏涛¹, 王栋², 唐盼³

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 山东交通学院轨道交通学院, 山东济南 250357;
3. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 云接入网(Cloud Radio Access Network, C-RAN)中有限带宽的前程链路无法有效应对高铁场景下乘客大量集中式的网络资源请求. 针对这一不足, 本文对 C-RAN 架构中的射频拉远头(Remote Radio Head, RRH)配置缓存设备使其具有存储转发资源的功能, 利用列车运行信息可预知的先验条件, 针对乘客数据通信提出基于缓存机制的预下载方案以提升网络系统的吞吐量. 仿真结果表明, 在前期链路拥挤情况下, 基于缓存的预下载方案可明显提升资源的平均传输速率和高铁通信网络的吞吐量, 进而提升了乘客的在途通信服务质量(Quality of Service, QoS).

关键词: 高铁通信; 云接入网; 前程链路; 受限带宽; 缓存机制; 预下载方案

中图分类号: U285 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)09-1748-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.09.012

Research on Pre-downloading Mechanism of Cache-Based Wireless Cloud Radio Access in HSR Scenarios

ZHANG Jia-chi^{1,2}, LIU Liu¹, HAN Bo-tao¹, WANG Dong², TANG Pan³

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Rail Transportation, Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong 250357, China;

3. Key Lab of Universal Wireless Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The cloud radio access network (C-RAN) with limited-capacity fronthauls cannot cope with the large-scale centralized passenger resource requests efficiently in high-speed railway (HSR) scenarios. As such, this paper adds a cache device to the remote radio head (RRH) to enable the function of storing and forwarding resources. Moreover, a cache-based pre-downloading scheme for passenger data communication is proposed to improve the network throughput by using the predictive information of the train. The simulation results show that the proposed scheme can significantly boost the average transmission rate of resources, enhance the throughput of HSR communication network and improve passengers' in-journey communication quality of service (QoS) when the fronthaul link is congested.

Key words: high-speed railway communication; cloud RAN; fronthaul link; limited capacity; cache mechanism; pre-downloading scheme

1 引言

近年来,中国高铁的飞速发展吸引了全世界的注意力,我国已建成世界上最大的规模最大、技术水平最高的高铁铁路体系^[1]. 可靠的通信网络系统是高铁安全运行和旅客在途通信服务的有力保障,已有大量文献从无线信道测量与建模^[2,3]、无线接入方式^[4]、无线资源调度^[5]以及网络架构等方面深入探究了高铁场景下的通信网

络性能,但是高铁场景下频繁的越区切换导致乘客通信服务质量较低. 此外,随着多媒体技术的不断发展,越来越多的乘客在旅途中通过电子邮件、视频会议、观看高清视频、多媒体语音等方式实现多元化办公与娱乐. 其中一些大文件网络资源的实时通信,如高清视频,需要一定的传输带宽以保障流畅播放,这就对网络实时传输速率提出了较高的要求. 因此,如何利用有限的资源来承载更多的网络流量成为业界广泛关注的热点

收稿日期:2019-09-25;修回日期:2019-11-04;责任编辑:覃怀银

基金项目:国家重点研发计划(No. 2018YFE0205501);中央高校基本科研业务费(No. 2018JBZ102);北京市科技新星计划交叉学科合作课题(No. Z191100001119016)

问题。

随着 5G 商用步伐的加快,云接入网(Cloud Radio Access Network, C-RAN)作为一种重要网络架构,旨在通过集中化基带处理单元(Base Band Unit, BBU)来提高资源利用率以及降低网络运行成本^[6]。现今许多文献从能耗最小化、缓存分配策略等方面研究了 C-RAN 网络性能,但高铁场景的特殊性使得 C-RAN 架构不能发挥其最佳性能,高铁场景下大量集中式的通信行为对通信网络产生巨大的负担。根据图 1 可知,约束高铁通信网络吞吐量主要有两个因素:一是受限的无线链路资源的传输速率,具体表现为的高速移动场景下的快衰落信道、车体穿透损耗、大量用户等导致的链路速率下降^[7];二是受限的前程链路容量。针对第一个问题,已有大量文献探讨了高铁场景下无线资源利用率最大化的问题,如采用大规模天线阵列、波束赋形、车载中继等技术^[8],本文主要探究在第二个约束条件下网络吞吐量最大化的问题。

对于 C-RAN 架构中前程链路容量受限条件下网络吞吐量最大化的问题,文献[9]研究了子载波上的联合无线功率控制和前程链路量化设计,以最大限度地提高系统吞吐量。文献[10]通过信号压缩的相关技术的实现在前程容量约束的条件下提升 C-RAN 性能。但是提升系统性能的途径并非只有一种,相关研究表明,采用缓存机制也可以大幅度提升系统吞吐量^[11]。文献[12]探讨了带缓存 C-RAN 架构中的稀疏多播波束成型技术,建立了混合整数非线性规划问题,比较了不同传播、缓存方式的优劣。文献[13]研究了多播前程链路中基站间的缓存大小分配策略来优化 BBU 池至基站间的资源传输。上述对 C-RAN 的研究大多考虑陆地移动通信场景下的资源优化与分配,而高铁场景的一个重要特点是列车运行状态的可预知性。如何将高铁运行信息的可预知性与 C-RAN 架构和缓存机制结合起来,成为了业界关注的问题。

本文研究了 C-RAN 架构在高铁场景下的应用,重点考虑在前程链路容量约束下,利用列车运行状态的可预知性和缓存机制来降低前程链路的网络负担,增加网络系统的吞吐量。

2 基于 C-RAN 的高铁通信系统

2.1 系统描述

C-RAN 是实现致密化网络的重要方式之一。C-RAN 主要包含三部分^[6]:BBU 池、RRH 和前程链路。在 C-RAN 架构中,传统分散式分布的 BBU 被集中到一个基带处理池中(通常由大型计算机群实现),RRH 通过前程链路与 BBU 池进行数据交换。C-RAN 架构的优点是集中化的基带处理池可根据当前资源的实时使用情

况灵活地为用户分配处理资源,大大提高资源利用的灵活性及效率。基于 C-RAN 架构的高铁通信网络如图 1 所示。

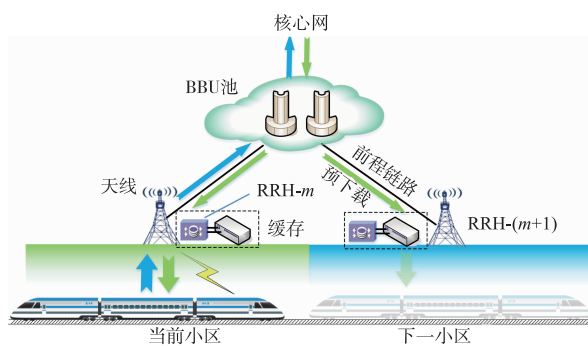


图1 高铁场景下 C-RAN架构示意图

针对 C-RAN 架构下的通信性能优化,前人已开展了大量的研究^[14,15],但这些工作大多是从策略和资源分配的角度开展的。与传统陆地移动通信场景不同的是,在高铁场景下,列车的运行轨迹、实时速度等要遵循预先规划好的路径,运行轨迹沿着既定线路,因而列车的实时运行状态(包括速度、位置、无线传播环境等)是可知的。这些先验信息为高铁通信性能的提升提供了一个新的视角。文献[16]基于列车先验信息提出了移动小区方案来实现高铁场景下的无缝越区切换方案,在此基础上,文献[17,18]进一步探讨了移动小区方案结合 C-RAN 架构在超高速移动环境下的广阔应用前景。基于此,本文后续分析是以 C-RAN 架构为基础而展开的。

2.2 前程链路状态划分

已有部分研究了前程链路容量受限条件下的 C-RAN 网络性能。根据文献[19]中的表述,本文基于前程链路是否在传输数据,将其划分为三个不同的状态:“空闲”、“可用”和“繁忙”。如图 2 所示,绿色区域表示前程链路处于空闲状态,此时前程链路中无数据可传输,一般发生在小区内无列车运行时;红色区域表示前程链路处于繁忙状态,此刻其以最大传输速率进行资源传输;图中黄色区域表示介于两种状态间的“可用”状态。与陆地移动通信系统不同的是,高铁场景中列车以极高的速度在小区内运行,这导致小区服务时间较

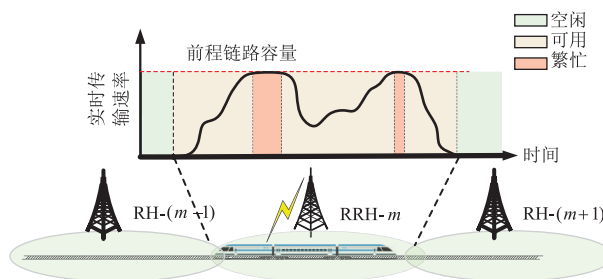


图2 前程链路状态示意图

短,前程链路大部分时间处于空闲状态,造成了资源的浪费.

此外,当今多媒体网络技术的飞速发展导致乘客对高清视频等大文件网络资源的请求率变高,在高铁场景下,乘客大量集中式的通信需求更加加重了列车所在小区的网络负担.针对这些海量非安全业务数据的通信,本文将利用缓存机制,从网络吞吐量和资源平均传输速率方面来提升高铁通信网络的性能.

3 基于缓存机制的预下载方案

3.1 变量预定义

为了便于后文分析,现将一些重要变量定义如下:RRH集合 $\{m|m \in M\}$;指示列车是否运行在小区 m 的因子 $e_m \in \{0,1\}$ (0为否,1则为是);小区 m 开始位置 p_m^{start} 与结束位置 p_m^{end} ,乘客集合 $\{k|k \in K\}$;网络资源集合 $\{t|t \in T\}$; C_t^j 表示网络资源 t 的文件大小, j 表示该资源对应的请求热度排名; $\theta_{k,t} \in \{0,1\}$ 指示乘客 k 是否请求资源 t ; $i_{m,k} \in \{0,1\}$ 指示资源 t 是否存储在RRH- m 缓存中; $\phi_{k,t} \in \{0,1\}$ 指示是否完成资源 t 的传输;RRH- m 的前程链路最大带宽为 F_m ;每位乘客在前程链路上分配的最大带宽为 R_m^F ; $N_a(p)$ 表示位于位置 p 时的活跃用户数; $N_m^F(p)$ 表示此时占用RRH- m 前程链路的用户数,则列车位于位置 p 时前程链路上乘客 k 所分类的传输速率为 $R_k^F(p) = \min\{R_m^{\text{max}}, F_m/N_m^F(p)\}$,乘客 k 的无线链路传输速率是 $R_k^{\text{wire}}(p)$,实际传输速率为 $R_k(p)$,由于无线链路和前程链路可视级联关系,所以有:

$$R_k(p) = \min\{R_k^{\text{wire}}(p), R_k^F(p)\} \quad (1)$$

设列车在位置 p 处的速度 $v=f(p)$,则列车从 p_1 运行至 p_2 所需时间为:

$$\Delta T_{p_1}^{p_2} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{f(p)} dp \quad (2)$$

若 p_1 与 p_2 均位于同一小区 m ,假设实际传输速率函数为 $r_k(p)$,则其可传输的信息量为:

$$C_k(p_1, p_2) = \int_{p_1}^{p_2} \frac{r_k(p)}{f(p)} dp \quad (3)$$

3.2 预下载方案

传统缓存方案的核心思想是将用户请求频率较高的网络资源预先存储至距离最近的RRH缓存器中,当用户请求该资源时,基站无需向核心网请求资源,而将该资源通过无线链路直接发送至用户即可.

由于乘客通信业务数据的数据量较大、安全性不高,且对时延要求不高,因而本文通过缓存的方案实现对前程链路的优化,预下载方案如图3所示.

假定每个小区覆盖范围均相同,根据式(2)可计算出列车通过每个小区所需的时间 ΔT .列车总人数为 N ,一个小区内平均活跃用户所占比例为 $\alpha \in (0,1)$.设定前程

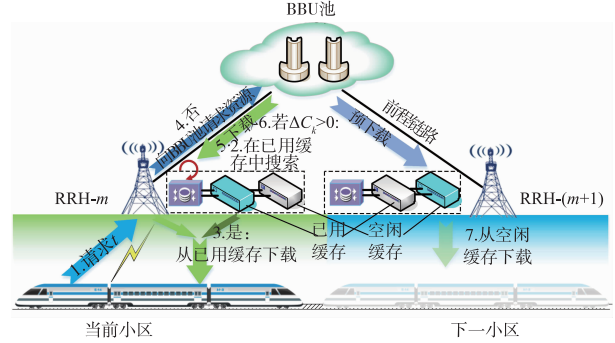


图3 预下载方案示意图

链路处于繁忙状态,始终以最高速率进行资源传输.

(1) 当不采用缓存技术时,列车在小区 m 内的最大网络吞吐量为:

$$Q_1 = F_m \Delta T \quad (4)$$

其中 ΔT 表示列车运行通过一个小区所需时间.

(2) 当采用传统缓存方案时,RRH缓存中预先存储部分请求热度较高的资源,假设这部分资源被请求的概率为 β ,则列车在该小区内的网络吞吐量为:

$$Q_2 = (\alpha\beta N \overline{R_k^{\text{wire}}} + F_m) \Delta T \quad (5)$$

其中 $\overline{R_k^{\text{wire}}}$ 表示每位乘客的平均无线传输速率,可知吞吐量 Q_2 由前程链路所传部分(资源未存储在缓存中)和无线链路所传部分(资源存储在缓存中)两部分组成.

(3) 若采用预下载方案,则列车行驶至下一小区前,可预下载的资源文件大小为:

$$Q^{\text{PDL}} = F_{m+1} \Delta T \quad (6)$$

当列车驶入下一小区时,可将资源从缓存中通过无线链路直接传输给用户.由于列车速度较快,其在一个小区内暂驻时间较短,在该时间内,用户请求资源的行为较为随机,因此假定下一小区的RRH将预缓存的资源传输给用户后立即删除该资源以便为其他用户资源缓存提供更多的存储余量.缓存中预存储资源文件大小为 Q^{PDL} (可视为库存量),无线链路传输速率为 $\alpha(\beta + \Delta\beta)N \overline{R_k^{\text{wire}}}$ (可视为流出速率),其中 $\Delta\beta$ 表示预下载存储的资源被请求的概率,前程链路的传输速率为 F_{m+1} (可视为流入速率),则每位用户以最大无线链路传输速率 $\overline{R_k^{\text{wire}}}$ 传输的持续时间为:

$$T_1 = \min\left\{\frac{Q^{\text{PDL}}}{\alpha(\beta + \Delta\beta)N \overline{R_k^{\text{wire}}} - F_{m+1}}, \Delta T\right\} \quad (7)$$

当缓存中资源传输完毕后(即库存量为0),则继续经由前程链路向核心网请求资源,即此时无线传输速率由 $\alpha(\beta + \Delta\beta)N \overline{R_k^{\text{wire}}}$ 降为 F_{m+1} .列车在该小区内的网络吞吐量可分为两部分:传统缓存方案产生的吞吐量 Q_2 与预下载方案产生的吞吐量,即:

$$Q_3 = Q_2 + \alpha\Delta\beta N \overline{R_k^{\text{wire}}} T_1 \quad (8)$$

通过上文可知,预下载方案中缓存的存储容量大

小应至少为:

$$C = F_{m+1}(\Delta T + T_1) + C_0 \quad (9)$$

其中 C_0 表示预存储在缓存中资源的文件大小. 值得注意的是, 上文分析中 $\alpha, \beta, \Delta\beta$ 是已知信息, 实际应用中, 需预先对大量的用户行为进行统计, 得到 α, β 的经验值. 在实际应用中, 即使在一个小区内这些基于大量统计结果得到的先验信息也并非一成不变的, 这必然会导致实际性能与理想性能有一定出入(如所设计的缓存容量过小导致预下载效果性能下降等问题, 在工程应用中, 可通过适当增加缓存容量来缓解该问题). 同时, 对这些信息进行精准的预测也是本文后续的研究方向. 但是可确定 $\Delta\beta$ 的取值范围, 根据其 $F_{m+1}\Delta T$ 的关系, 可知应大于预下载资源全为热度排行最低的资源对应的请求概率, 并小于预下载资源全为热度排行最高的资源对应的请求概率.

下面本文将从单个用户角度精准分析资源的请求、传输过程, 从微观层面详细阐释预下载方案. 考虑列车从小区 m 行驶至小区 $(m+1)$, 当列车在小区 m 运行时, 即 $e_m = 1$, 乘客 k 请求资源 t ($\theta_{k,t} = 1$), 该请求经由无线链路到达距离最近的 RRH- m , 其先在 RRH- m 的缓存中搜索是否存在该资源. 若存在 ($i_{m,k} = 1$), 则通过无线链路以 $R_k^{\text{wire}}(p)$ 的传输速率直接发送至乘客; 若不存在 ($i_{m,k} = 0$), 则向 BBU 池请求该资源, BBU 池从核心网获取该资源后先以 $\min\{R_F^{\text{max}}, F_m/N_m^F(p)\}$ 的速率经由前程链路发送至 RRH- m , 再由 RRH- m 以 $R_k(p)$ 速度转发至乘客 k .

对于未预存储在缓存中的请求资源 t , 即 $i_{m,t} = 0$, 根据式(1)~(3)可知列车在小区 m 内即从发起请求位置 p_0 至小区结束位置 p_m^{end} , 可传输的文件大小为:

$$C_k^m = C_k(p_0, p_m^{\text{end}}) \Big|_{r_i(p) = R_k(p)} \quad (10)$$

根据式(1), 可知实时传输速率 $R_k(p)$ 受到当前占用前程链路用户数目的 $N_{F_m}(p)$ 的影响, 其处于动态随机变化的状态, 因而无法准确预测该值. 由于前程链路和无线链路是级联关系, 可知在前程链路较为空闲时, 约束实时传输速率 $R_k(p)$ 的主要因素为无线传输速率 $R_k^{\text{wire}}(p)$ 和 R_F^{max} , 而这两个变量是确知的, 因而在前程链路状况最佳时, 其在小区 m 内可传输文件大小的预测值 C_k^{pred} 为:

$$C_k^{\text{pred}} = C_k(p_0, p_m^{\text{end}}) \Big|_{r_i(p) = \min\{R_F^{\text{max}}, R_k^{\text{wire}}(p)\}} \quad (11)$$

则 BBU 池需预下载至 RRH- $(m+1)$ 缓存中的部分为:

$$\Delta C_t = \underbrace{\{\theta_{k,t} C_t^j - C_k^{\text{pred}} - C_k(p_0, p)\}}_{A1} \underbrace{(1 - i_{t,m+1})}_{A2} \quad (12)$$

式中, $C_k(p_0, p)$ 表示从起始位置 p_0 至位置 p ($p \geq p_m^{\text{end}}$) 过程中实际传输的文件大小, $A1$ 表示预下载资源文件大小, $A2$ 表明该资源并未完全存储在 RRH- $(m+1)$ 缓存中. 在实际情况中, 拥挤的前程链路会导致 $C_k^{\text{pred}} \geq C_k^m$, 由

此可知, 当列车驶入下一小区时, 其已传输给用户的文件大小与预下载的文件大小之和可能小于该资源的文件大小, 对于该种情况, 将在后文中进行详细说明.

考虑对每个资源公平对待, 在预下载过程中, RRH- $(m+1)$ 的前程链路上的对预下载资源 t 分配的传输速率为:

$$R_k^{F_{m+1}}(p) = F_{m+1}/N_{m+1}^F(p) \quad (13)$$

根据式(13), 可知列车在小区 m 行驶时, 其在 RRH- $(m+1)$ 缓存中预存储的文件大小为:

$$C_k^{\text{PDL}} = C_k(p_0, \min\{p_m^{\text{end}}, p_k^{\text{end}}\}) \Big|_{r_i(p) = R_k^{F_{m+1}}(p)} \quad (14)$$

其中, p_k^{end} 表示预下载完毕时列车的位置. 当列车驶入下一小区 $(m+1)$ 时, 则直接将预下载资源通过无线链路以速率 $R_k^{\text{wire}}(p)$ 传输给乘客, 直至缓存中的资源传输完毕后速率降低至 $R_k(p)$, 即满足的临界条件为:

$$C_k^{\text{PDL}} + C_k^{m+1}(p_{m+1}^{\text{start}}, p) = C_k^{\text{wire}}(p_{m+1}^{\text{start}}, p) \quad (15)$$

同时 BBU 池实时计算已传输的文件大小:

$$C_k^{\text{done}} = C_k^{\text{PDL}} + C_k^m + C_k(p_{m+1}^{\text{start}}, p) \quad (16)$$

若 $C_k^{\text{done}} < C_k^j$, 表明未传输完毕, RRH- $(m+1)$ 继续从 BBU 池下载该资源; 若 $C_k^{\text{done}} = C_k^j$, 则表示传输完毕 $\phi_{k,t} = 1$. 根据上述分析, 现将基于缓存的预下载方案总结为如下算法.

算法 1 基于缓存的预下载算法

输入: $p, R_k^{\text{wire}}, R_F^{\text{max}}$
 计算: $\phi_{k,t}(p), e_m(p)$
 while $\theta_{k,t}(p) = 1$ and $\phi_{k,t}(p) = 1$:
 更新: $e_m, R_k, R_k^m, R_k^{m+1}, C_k^{\text{pred}}, C_k^{\text{PDL}}, \Delta C_t, C_k^{\text{done}}$
 if $e_m(p) = 1$
 if $i_{m,t} = 1$
 RRH- m : 从缓存以速率 R_k^{wire} 传输
 else
 RRH- m : 从缓存以速率 R_k 传输
 if $\Delta C_t > 0$
 RRH- $(m+1)$: 以 R_k^{m+1} 速率预下载
 end
 end
 end
 if $e_{m+1}(p) = 1$
 if EQ. (15) is TRUE
 RRH- $(m+1)$: 以 R_k 速率传输给乘客
 else
 RRH- $(m+1)$: 以 R_k^{wire} 速率传输给乘客
 end
 end
 $p \leftarrow p + \Delta p$
 end

4 仿真与分析

假设一列载有 1000 名乘客的列车以速度 300km/h

的速度匀速穿越两个小区,每个小区可覆盖 10km 的铁路沿线通信,每个 RRH 的前程链路最大传输速率均为 $F_m = 500\text{Mbps}$,每位乘客可占用的最大前程链路带宽 $R_f^{\max} = 3\text{Mbps}$,假设通过闭环功率控制,每位乘客的无线链路最大传输速率 $R_k^{\text{wire}} = 2\text{Mbps}$. 设定网络资源总数目为 500,乘客请求资源的行为服从 Poisson 过程,平均每分钟收到 30% 乘客发出的资源请求,即 $\alpha = 0.3$ (Poisson 过程的到达率为 300),每位乘客在任意时刻最多只能请求一个资源. 资源 t 被请求的概率服从 Zipf 分布^[20]

$$\rho_t = t^{-\lambda} / \sum_i t^{-\lambda}, \text{其中参数 } \lambda = 0.7. \text{ 资源 } t \text{ 文件大小服从}$$

均值 $S = 200\text{Mb}$ 且在 $(0, 400]\text{Mb}$ 上的均匀分布. 在仿真中将对比:①无缓存方案(方案 1);②带有缓存但未启用预下载算法的传统缓存方案(方案 2),且缓存中预存储 20 个热度排名靠前的资源,即 $\beta = 29.2\%$, $E[C_0] = 4\text{Gb}$,其中 $E[\cdot]$ 表示数学期望;③带有缓存并启用预下载算法的方案(方案 3)三种方案的性能.

接下来根据式(9)计算缓存空间大小. 根据前文所述,可知 $F_{m+1}\Delta T/S = 30$,即对应 30 个资源的请求概率,则 $\Delta\beta$ 可取范围为 $[2.1\%, 14\%]$,故 $T_1 = 120\text{s}$,表明由于较快的列车运行速度导致在小区 2 内并不能将预缓存的资源全部传输给乘客,需要后续小区进行预下载“接力”. 此时所需缓存空间大小为 $C = 124\text{Gb}$.

图 4 表示的是不同位置处的用户活跃度. 列车从小区 1 始发,随着列车的前行,用户请求资源数目剧增. 其中所请求的资源中,大部分请求资源并未存储在本地缓存中,因而当前前程链路用户所占百分比比较高. 同时,BBU 池针对部分资源不能在该小区全部传输完毕的问题,开始启用预下载方案,即图中小区 2 的前程链路用户数目开始增加,而且随着列车即将离开小区,此时小区 2 前程链路的用户数目越来越多. 当列车刚驶入小区 2 时,由于部分预下载的资源并未全部传输完毕,因而

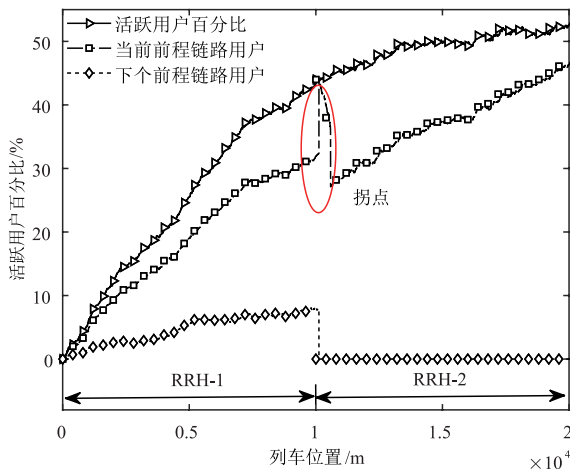


图4 列车位置与用户活跃度关系图

仍需调用前程链路进行资源的传输,即图 4 中椭圆区域处的当前前程链路比例出现了急剧增高,当预下载资源全部加载完毕时,则其出现了回降.

图 5 表示的是不同列车位置处的网络实时吞吐量. 从图中可知,列车在小区 1 的 $0 \sim 5\text{km}$ 范围内行驶时,三个方案的吞吐量是一致的,这是由于当前请求资源的数目较少,前程链路比较“空闲”,传输速率的限制在于无线链路. 随后乘客请求的资源数量增大,速率限制转移至前程链路上. 方案 1 的传输速率达到前程链路的峰值并保持不变,方案 2 的传输速率突破了前程链路的极限值,在小区 2 中更是达到了均值为 727Mbps 的传输速率. 方案 3 在小区 1 中的传输速率与方案 2 一致,这是由于列车从小区 1 始发,当前缓存中仅存有预存储的资源. 列车在小区 1 行驶时 BBU 池启用预下载方案,当列车驶入下一小区时,即图中拐点,传输速率得到大幅度提升,最高可达 893Mbps ,均值为 828Mbps ,网络吞吐量性能要优于方案 2.

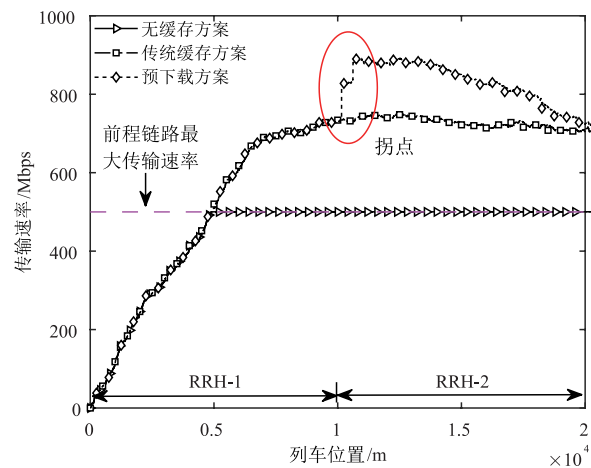


图5 列车位置与实时吞吐量关系图

图 6 表示已传输完毕资源的文件大小与传输所耗时间的关系. 图中红色菱形散点表示采用预下载方案传输的资源,蓝色圆形散点表示未启用该方案传输的资源. 对数据进行线性拟合,则斜率表示平均传输速率. 从图中可知,采用预下载方案的资源的平均传输速率为 1.93Mbps ,非常接近无线链路的传输速率 2Mbps . 而蓝色散点(未启用预下载方案的资源)比较分散,其传输速率在 $1.11 \sim 2\text{Mbps}$ 范围内. 可知与传统缓存方案相比,预下载方案可大大提升资源平均传输速率.

根据图 4 可计算出在小区 2 内平均用户活跃度 $\alpha = 49.3\%$,缓存中预存储资源命中概率 $\beta = 29.2\%$,采用与预下载方案后 RRH-2 缓存中资源命中概率增加了 $\Delta\beta = 54.5\%$. 根据式(4)~(8),可计算出三种方案的吞吐量如表 1 所示,同时表 1 还给出了实际微观仿真结果,可知从宏观层面分析结果与微观层面分析结果几

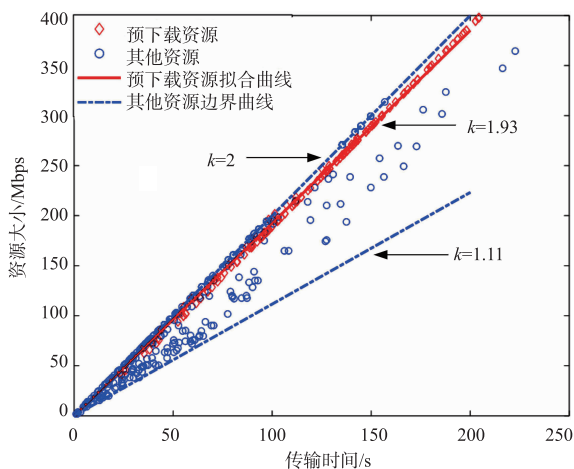


图6 资源传输时间与文件大小关系图

乎一致,验证了算法的合理性.

表 1 三种方案吞吐量

吞吐量	理论/ 10^4 Mbps	仿真/ 10^4 Mbps
Q_1	6	6
Q_2	9.45	8.73
Q_3	10.1	9.94

5 结论

本文基于 C-RAN 架构和缓存设备,针对高铁场景下乘客集中式请求大量网络资源,且 C-RAN 前程链路带宽受限条件下,利用列车运行状态可预知等先验信息,提出预下载方案以提升高铁通信网络的吞吐量. 本文从宏观和微观两个层面详细阐述了预下载方案,仿真结果表明本文所提方案能明显提升资源传输速率,降低了传输耗时,提升了网络吞吐量.

参考文献

- [1] GUAN K, AI B, PENG B, et al. Towards realistic high-speed train channels at 5G millimeter-wave band - part I: paradigm, significance analysis, and scenario reconstruction [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 9112 - 9128.
- [2] LIU L, TAO C, QIU J, et al. Position-based modeling for wireless channel on high-speed railway under a viaduct at 2.35GHz [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(4): 834 - 845.
- [3] HE R, ZHONG Z, AI B, et al. Measurements and analysis of propagation channels in high-speed railway viaducts [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 12(2): 794 - 805.
- [4] FOKUM D T, FROST V S. A survey on methods for broadband internet access on trains [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2010, 12(2): 171 - 185.
- [5] ZHAO Y, LI X, LI Y, et al. Resource allocation for high-speed railway downlink MIMO-OFDM system using quantum-behaved particle swarm optimization [A]. 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. Budapest, Hungary: IEEE, 2013. 2343 - 2347.
- [6] CHECKO A, CHRISTIANSEN H L, YAN Y, et al. Cloud RAN for mobile networks-A technology overview [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 17(1): 405 - 426.
- [7] ZHOU T, TAO C, LIU L, et al. High-speed railway channel measurements and characterizations: A review [J]. Journal of Modern Transportation, 2012, 20(4): 199 - 205.
- [8] ZHU H. Radio resource allocation for OFDMA systems in high speed environments [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(4): 748 - 759.
- [9] LIU L, BI S, ZHANG R. Joint power control and fronthaul rate allocation for throughput maximization in OFDMA-based cloud radio access network [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(11): 4097 - 4110.
- [10] PARK S H, SIMEONE O, SAHIN O, et al. Joint decomposition and decoding for cloud radio access networks [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(5): 503 - 506.
- [11] ZHAO Z, PENG M, DING Z, et al. Cluster content caching: An energy-efficient approach to improve quality of service in cloud radio access networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(5): 1207 - 1221.
- [12] TAO M, CHEN E, ZHOU H, et al. Content-centric sparse multicast beamforming for cache-enabled cloud RAN [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(9): 6118 - 6131.
- [13] DAI B, LIU Y F, YU W. Optimized base-station cache allocation for cloud radio access network with multicast backhaul [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(8): 1737 - 1750.
- [14] AHMED K, HRANILOVIC S. C-RAN uplink optimization using mixed radio and FSO fronthaul [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(6): 603 - 612.
- [15] TALEB H, EL HELOU M, LAHOUD S, et al. Multi-objective optimization for RRH clustering in cloud radio access networks [A]. 2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA) [C]. Beirut, Lebanon: IEEE, 2018. 85 - 89.
- [16] LANNON B, COLLE D, PICKAVET M, et al. Radio-over-fiber-based solution to provide broadband internet access to train passengers [J]. IEEE Communications Maga-

zine, 2007, 45(2): 56 – 62.

- [17] 刘留, 裘陈成, 刘叶, 等. 真空管道高速飞行列车车地无线通信技术[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(01): 146 – 156.

LIU Liu, QIU Chen-cheng, LIU Ye, et al. Wireless communication technology for vacuum tube high-speed flight train[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(01): 146 – 156. (in Chinese)

- [18] 刘留, 裘陈成, 李铮, 等. 真空管道高速飞行列车车地宽带无线通信关键技术的思考[J]. 铁道学报, 2019, 41(1): 65 – 73.

LIU Liu, QIU Chen-cheng, LI Zheng, et al. Thoughts on key technologies of broadband wireless communication for

high-speed vacuum pipeline flying train[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(1): 65 – 73. (in Chinese)

- [19] PENG M, WANG C, LAU V and POOR H, Fronthaul-constrained cloud radio access networks: insights and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 152 – 160.

- [20] YAMAKAMI T. A zipf-like distribution of popularity and hits in the mobile web pages with short life time [A]. 2006 Seventh International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies [C]. Taipei, Taiwan, IEEE, 2006. 240 – 243.

作者简介



张嘉驰 男, 1991年5月生, 山东省潍坊市人, 现为北京交通大学电子信息工程学院在读博士生, 主要从事高铁通信、通信资源管理方向的研究。

E-mail: jiachi_zhang@bjtu.edu.cn



刘留(通信作者) 男, 1981年7月生, 云南省昆明市人, 现为北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师。主要研究方向为真空管道高速飞行列车关键技术, 高铁无线信道测量与建模, 时变信道信号处理, 5G关键技术, 高铁宽带接入物理层关键技术等。入选2016年北京市科技新星。

E-mail: liuliu@bjtu.edu.cn



韩柏涛 男, 1985年3月生, 山西省运城市人, 现为北京交通大学电子信息工程学院在读博士生, 主要从事高铁通信、真空管高速飞行列车通信方向的研究。

E-mail: bthan@bjtu.edu.cn



王栋 男, 1980年7月生, 山东省济南市人, 博士, 现在山东交通学院信息科学与电气工程学院讲师, 主要从事通信与计算资源管理的研究。

E-mail: 215020@sdjtu.edu.cn



唐盼 男, 1991年5月生, 湖南省衡阳市人, 现为北京邮电大学博士后。主要研究方向为毫米波、太赫兹以及V2X信道测量与建模, 信号处理和混合波束赋形技术等。

E-mail: tangpan27@bupt.edu.cn