



研究与开发

基于 MRR 调度的认知 LTE-R 基站和服务类型值优先队列管理

邓宏宇, 汪一鸣, 吴澄

(苏州大学轨道交通学院, 江苏 苏州 215006)

摘要: 利用认知无线电技术在长期演进铁路 (LTE-R) 通信系统中构建认知无线网络, 提出认知 LTE-R 基站网络架构和 MRR 调度算法, 用以提高铁路专网频谱利用率。特别针对单一车载网关中认知 LTE-R 基站的先入先出队列策略造成次用户的实时业务的时延过大问题, 提出基于服务类型值优先的认知 LTE-R 基站队列管理策略。该策略优先将服务类型值大的分组送出队列, 从而达到优先服务实时业务的目的。仿真结果表明, 在保障车地正常通信的前提下, 构建的认知 LTE-R 基站能为旅客提供额外互联网接入链路, 提高了长期演进铁路通信系统频谱的利用率。此外, 基于服务类型值优先的队列管理策略可以有效地减少旅客实时业务的时延。

关键词: 长期演进铁路通信系统; 认知无线网络; 认知 LTE-R 基站; 车载网关; 服务类型

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018165

MRR scheduling based cognitive LTE-R eNode B and type of service value priority queue management strategy

DENG Hongyu, WANG Yiming, WU Cheng

School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215006, China

Abstract: Cognitive radio technology was used to build cognitive radio networks in long-term evolution railway communication systems, and cognitive base station network architecture and MRR scheduling algorithms were proposed to improve the spectrum utilization of railway dedicated networks. In particular, the FIFO policy for cognitive LTE-R base stations in a single vehicle gateway causes excessive delay in real-time services of secondary users, and a cognitive LTE-R base station queue management strategy based on priority of service types was proposed. This strategy gave priority to sending packets with large service type values to the queue, so as to achieve the purpose of prioritizing real-time services. Simulation results show that under the premise of ensuring the normal communication of vehicles, the constructed cognitive base station can provide passengers with additional internet access links, and at the same time, improve the spectrum utilization rate of the LTE-R communication system. In addition, the cognitive base station queue management strategy based on service type value priority can effectively reduce the delay of passenger real-time services.

Key words: LTE-R communication system, cognitive radio network, cognitive LTE-R eNode B, vehicle gateway, type of service

收稿日期: 2017-10-30; 修回日期: 2018-04-20

1 引言

近年来,高铁、地铁和有轨电车等轨道交通得到了快速的发展。研究表明,美国已经提出建设高铁的计划,而我国高铁总里程到2020年将突破18 000 km^[1]。目前,铁路通信系统大多使用基于GSM通信的ETCS(European train control system,欧洲列车控制系统)技术,也就是GSM-R(GSM-railway,铁路数字移动)通信系统。但GSM-R数据承载能力弱,不能满足日益蓬勃的铁路业务的发展需求,且不能给旅客提供便捷的宽带无线接入服务等^[2-3]。

作为当前主流的宽带无线通信技术,LTE具有较高的数据速率和频谱效率。全IP的扁平化网络架构使其网络时延大大减少,1 ms的TTI(time transmission interval,传输时间间隔)使其能处理更多的网络通信数据^[4],采用MIMO(multiple input multiple output,多输入多输出)技术后能够获得更快的速率。因此,在铁路通信的演进过程中,LTE-R(LTE-railway,长期演进铁路)通信系统很有可能成为下一代铁路无线通信系统,并在2020年前后开始部署逐步替代现有的GSM-R。中国将在2020年建成首个LTE-R网络^[3]。LTE-R带宽可能达到20 MHz,以满足更多的铁路通信业务需求。此外,LTE-R还被寄予希望于为列车上的旅客提供Internet接入服务^[5]。

参考文献[6]在LTE技术的基础上,设计ATO(automatic train operation,自动列车控制)系统的相关通信应用,并对设计的系统进行外场测试。测试结果表明,在LTE上实现基于通信的列车控制是可行的,LTE能够满足列车控制应用业务的QoS要求。此外,笔者还说明列车控制业务的特点是数据量小,但对时延、抖动敏感。参考文献[3,5,7]讨论了现有的高铁通信技术和被广泛研究的高铁通信方案,通过分析和比较可以发现LTE技术最能满足铁路通信的需求。参考文

献[8]研究了高速列车在经过不同LTE基站时的接入和切换问题,仿真结果表明,该文提出的方法能够满足高速列车在LTE系统中的接入和切换的QoS需求,保证列车通信的可靠性和安全性。参考文献[9]则讨论了公共安全和铁路专网使用相同频段通信时存在的多种共存场景,并针对共存场景提出了基于优先的资源分配方案,优先给铁路通信分配资源,确保列车的运行安全。

铁路通信是一个复杂的专用通信系统,受到很多现实条件的影响。如高速运动的列车受到多普勒频移的影响;铁路道路路况复杂,有高架、封闭隧道等。因此,保障铁路通信系统的可靠性和低时延是关键。铁路通信作为专用的通信系统,享有专用的通信频段,但其下行网络数据量小、频谱空闲时间多,存在明显的频谱浪费^[10-11]。FCC(Federal Communications Commission,美国联邦通信委员会)提供的研究也表明现已分配的大部分授权频谱存在时域、频域和空间上的利用不充分。特别是一些授权频谱,大部分时间里没有用户使用,造成了严重的频谱浪费^[12]。

为了提高LTE-R系统的下行频谱利用率,改善旅客在列车上的通信质量和乘车体验。本文利用CR(cognitive radio,认知无线电)技术^[13],将LTE-R系统中的轨旁eNode B升级成C-eNode B(cognitive eNode B,认知LTE-R基站),并在LTE-R系统中构建基于C-eNode B和VG(vehicle gateway,车载网关)的CRN(cognitive radio network,认知无线网络),实现PU(primary user,主用户)和SU(secondary user,次用户)的频谱共享,从而提高LTE-R下行频谱利用率。本文还从基于通信的铁路应用的角度出发,研究PU使用资源与SU可用资源间的关系。针对由FIFO(first input first output,先入先出)队列管理策略造成的实时业务时延过大的问题,提出基于ToS(type of service,服务类型)值优先的C-eNode B队列管理策略,最大限度减少SU的RTS(real-time



service, 实时业务) 的接收时延。本文假设 PU 是列车上的车载通信设备, 每个 PU 仅接收 1 种铁路应用业务数据, 各 PU 相互独立。SU 是列车上的旅客设备, 如手机、平板电脑、笔记本电脑等。

2 系统模型

2.1 LTE-R 系统及存在的问题

2.1.1 LTE-R 系统

很多学者对 LTE-R 系统进行了比较深入的研究^[1-3,5,7,14]。图 1 是一种常见的 LTE-R 系统网络架构, 图 1 中, CS 指内容服务器 (content server)。它分为核心网络、汇聚层网络、接入网和铁路沿线网络 4 个部分^[5,15]。核心网络包括列车控制中心和 Internet 服务两个部分的网络; 汇聚层主要负责将不同通信技术的数据汇聚到服务网关进行数据交换; 接入网在本文中包括 LTE-R 专用网络和运营商的 LTE 网络; 铁路沿线网络主要包括与 LTE-R 基站通信的列车车载设备和与运营商基站通信的旅客设备。

在一般的 LTE-R 系统中, 列车控制中心的数据首先经过 SGW (service gateway, 服务网关) 和 AGW (access gateway, 接入网关), 然后到达轨旁的 LTE-R eNode B, 最后 LTE-R eNode B 将数据通过空中无线接口发送给列车上的 PU, PU 根据接收到的数据控制列车的运行, 如加速、减速和制动等。在这样的网络架构中, SU 只能通过轨旁

运营商的 LTE eNode B 接入并使用 Internet (线路 1)。基于通信的列车应用是小流量应用^[6], 导致 LTE-R 系统的下行链路在大多时间里处于空闲状态, 造成大量频谱浪费。

2.1.2 LTE-R 系统中 RR 调度方案存在的问题

RR (round robin, 轮询) 调度算法以轮询的方式在每个 TTI 里将系统的资源平均分配给活跃的 UE。因为不考虑 UE 的信道条件和流量特点, 所以 RR 在所有的调度算法中公平性最高。但由于 RR 的平均分配原则, 在 TTI 中也造成了一定的资源浪费。本文假设 C-eNode B 使用 RR 调度算法。

假设系统中有 n 个 PU ($n = 1, 2, 3, \dots, 12$), 各 PU 独立存在。通过分析, 在每个 TTI 里浪费 RBG (resource block group, 资源块组) 的数量与 PU 的数量有以下关系:

$$L_{\text{RBG}}(t) = N_{\text{RBG}} - \text{MOD}(N_{\text{RBG}}, n_{\text{PU}}(t)) \cdot n_{\text{PU}}(t) \quad (1)$$

其中, $L_{\text{RBG}}(t)$ 表示在 TTI t 里被浪费的 RBG 数量, $n_{\text{PU}}(t)$ 表示在 TTI t 里需要被调度的 PU 数量, N_{RBG} 表示系统的 RBG 数量, $\text{MOD}(N_{\text{RBG}}, n_{\text{PU}}(t))$ 表示对 $n_{\text{PU}}(t)$ 取模。从式 (1) 可得, 只有当 $L_{\text{RBG}}(t) = 0$ 时才没有 RB (resource block, 资源块) 浪费。

例如, 按照 3GPP 规定, 5 MHz 的系统带宽 (LTE 系统的带宽为 1.4~20 MHz), 其中 10% 的带宽作为通信保护带, 剩余的 4.5 MHz 带宽作为通信资源, 分为 25 个 RB。一个 RB 在时域上

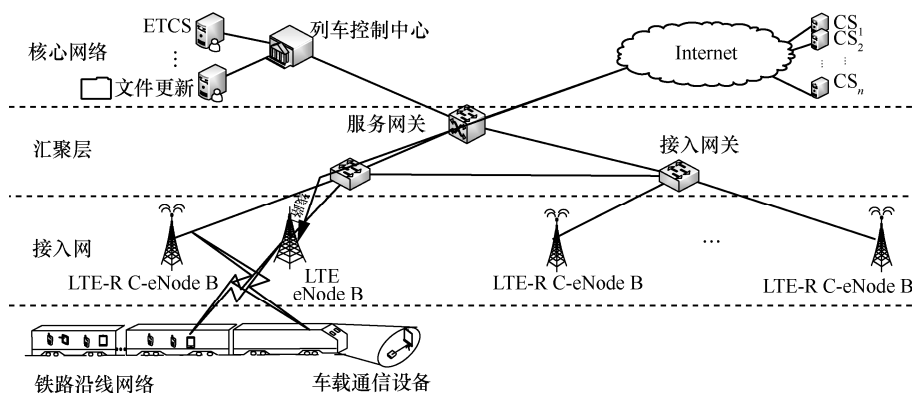


图 1 铁路通信网络架构

表 1 1 个 TTI 中需要被调度的 PU 数量与浪费的 RBG 之间的关系

需要被调度的 PU 数量 $n_{PU}(t)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
不足以分配的剩余 RBG 数量 $L_{RBG}(t)$	12	0	0	0	0	2	0	5	4	3	2	1	0

占 0.5 ms, 在频域上占 180 kHz, 由 12 个带宽为 15 kHz 的连续子载波组成^[4]。RB 可以进一步组合成 RBG, 当 $10 < RB < 30$ 时, 每个 RBG 包含 2 个 RB。25 个 RB 量化为 12 个 RBG, 剩下一个无用的 RB。根据上面的分析, 当系统有 12 个用户 (类似推广到 N 个用户) 时, 见表 1。

2.2 基于通信的铁路应用和旅客应用

2.2.1 基于通信的铁路应用

LTE-R 的业务可以归结为以下 3 种类型^[16]:

- 关键性安全应用 (如 ETCS 信号);
- 铁路运营相关的操作 (如语音通话);
- 不影响列车移动的额外应用 (如视频监控、语音报站、文件更新、旅客互联网应用等)。

本文仅研究 LTE-R 下行链路资源分配, 仿真中将使用以下 4 种下行铁路通信应用。

(1) ETCS 应用

负责在列车车载单元和地面控制中心的数据交换, 主要完成列车加速、减速、制动等操作。每条 ETCS 信息数据量大小约为 128 byte, ETCS 是关键的安全性应用。

(2) 对讲机通话, 铁路运营的基本应用

如铁路施工工人之间的对话。本文中, 为了增加 CRN 的负载, 假设整个仿真时间里铁路工人一直保持通话, 数据速率是 64 kbit/s。

(3) 语音报站应用

告知车上旅客当前列车上的人流量和列车所在位置。在本文的仿真中, 假设每隔 20 s 列车接收到来自地面控制中心的语音报站信息, 平均每个报站信息持续时间是 5 s, 数据速率是 64 kbit/s。

(4) 文件更新应用

从地面控制中心下载文件以更新列车车载设备信息。前面 3 种铁路应用业务的数据速率较小,

不容易对网络容量产生影响。为了观察 PU 使用网络资源对 SU 的接收时延的影响, 本文中文件更新的下行速率分别是 500 kbit/s、1 Mbit/s、2 Mbit/s。

2.2.2 旅客应用

在很多已有关于 CRN 的研究中, 大部分研究者仅把 SU 的服务类型考虑为 BE (best effort), 没有考虑不同业务需求 SU 的 QoS。本文假设列车上的旅客使用 VoIP、video 和 BE 这 3 种业务, 且设定 VoIP 业务的 ToS 值是 224、video 业务的 ToS 值是 160、BE 业务的 ToS 值是 0。

3 LTE-R CRN 架构和 C-eNode B 队列管理策略

3.1 LTE-R CRN 架构

通过第 2 节的分析发现, 基于 RR 调度的 LTE-R 系统不仅存在空闲时间的资源浪费, 还有 TTI 里的资源浪费。为提高 LTE-R 系统的频谱利用率, 本文提出将 LTE-R eNode B 升级成 C-eNode B, 并定义 C-eNode B 具有以下能力: 准确区分 PU 和 SU 的业务数据, 保障 PU 通信, 确保列车运行安全; 在有 RB 浪费的 TTI 里, 将浪费的 RB 分配给 SU 通信; 在 SU 有可用 RB 的 TTI 里, 对不同业务的 SU 数据按照 ToS 值优先策略区别处理, 减少实时业务的时延。

为降低系统的复杂度、减少穿透损耗和 SU 使用 LTE-R 授权频段对车地通信的干扰, 本文采用在列车车顶上增加 VGW 的方法来实现旅客与列车在 LTE-R 系统中的频谱共享。不同车厢的无线 AP (access point, 接入点) 通过光纤连接至无线 VG, 旅客在不同车厢仅需要连接到其所在车厢的无线 AP 即可享受 Internet 服务。该方法的优点是减少了由大量旅客在越区切换时产生的信令风



暴对 PU 通信的影响。

本文的目的在于使用 CR 技术提高 LTE-R 系统频谱利用率,如图 2 所示,在不改变图 1 网络架构的基础上,为旅客提供一条经过 LTE-R 系统的链路来给旅客提供 Internet 接入服务(线路 2)。在图 2 中,原 LTE-R eNode B 变成 C-eNode B,并与 PU 和 SU 构成 CRN(如图 2 虚线框所示)。列车上的 SU 除了通过运营商的 LTE eNode B 接入 Internet 外,还可通过 VG 与 LTE-R C-eNode B 进行通信,接入并使用 Internet。在下行链路方向,Internet 的数据经过 SG 和 AG 后可通过线路 1 到达 LTE eNode B 或通过线路 2 到达 LTE C-eNode B,若经线路 2 到达 C-eNode B,在不影响 PU 通信的情况下,C-eNode B 将 SU 的数据通过空中接口发送给列车上的 VG,VG 通过光纤转发到 AP,最后到达旅客设备,实现 PU 和 SU 在 LTE-R 系统的频谱共享。

3.2 基于 FIFO 的 C-eNode B 队列管理策略

本文通过在列车车顶增加 VG 与 C-eNode B 通信的方法来实现 PU 和 SU 在 LTE-R 系统中的资源共享。如图 3 所示,在 C-eNode B 端的 RLC (radio link control, 无线链路控制)层,每个 PU 都具有一个独立的 FIFO 队列。SU 通过 VG 与 C-eNode B 通信,在 C-eNode B 的 RLC 层只有一个 FIFO 队列,去往不同 SU 的数据需要在这个唯

一的 FIFO 队列中排队等待传送机会。当 TCC 或 Internet 的数据分组经过 SG 和 AG 到达 C-eNode B 时,C-eNode B 在其分组过滤器中对接收到的每一个分组进行分类。去往不同 PU 的分组按到达顺序的先后排队进入各自所属的队列,不同 SU 的分组按到达顺序进入队列 $Q_{su_1, su_2, \dots, su_n}^{FIFO}$ 等待调度。

在每个 TTI 里,C-eNode B 首先给 PU 分配 RB,保障列车控制信号及相关应用数据的正常发送。根据 RR 的调度规则,如第 2.1.2 节所述,当 $L_{RBG}(t)$ 不为 0 时,会有空闲的 RB 或不足以分配给 PU 的 RB 剩余。C-eNode B 把这部分 RB 分配给 SU, $Q_{su_1, su_2, \dots, su_n}^{FIFO}$ 里面的分组被调度发往 VG, VG 往下转发给 SU。由于 C-eNode B 只有当 $L_{RBG}(t)$ 不为 0 时才会给 SU 分配 RB,在一定程度上造成 SU 数据接收的时延,特别是当 SU 在较长时间里得不到调度机会时,分组时延将特别大。基于 FIFO 的 C-eNode B 队列管理策略如图 3 所示。

3.3 提出的算法和 C-eNode B 的队列管理策略

3.3.1 提出的算法

本文在参考文献[17]的基础上改进了 RR 调度算法,称为 MRR(modified RR, 改进 RR)。在每个 TTI 开始后,MRR 调度算法首先遍历所有无线承载,获得当前 TTI 中活跃的 PU 数量 $n_{PU}(t)$,然后根据式(1)计算出 $L_{RBG}(t)$ 。接下来通过参数 $L_{RBG}(t)$ 来进行资源分配。若 $L_{RBG}(t)$ 值为 0,即该

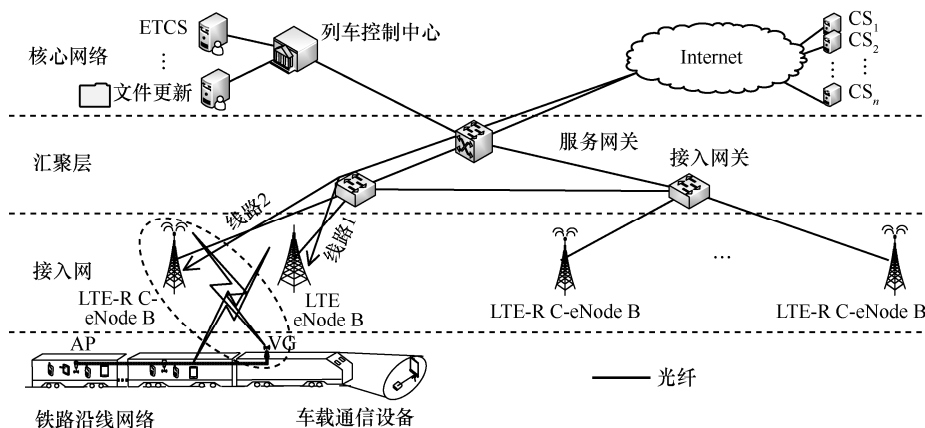


图 2 基于 C-eNode B 和 VG 的 LTE-R 系统 CRN 频谱共享架构

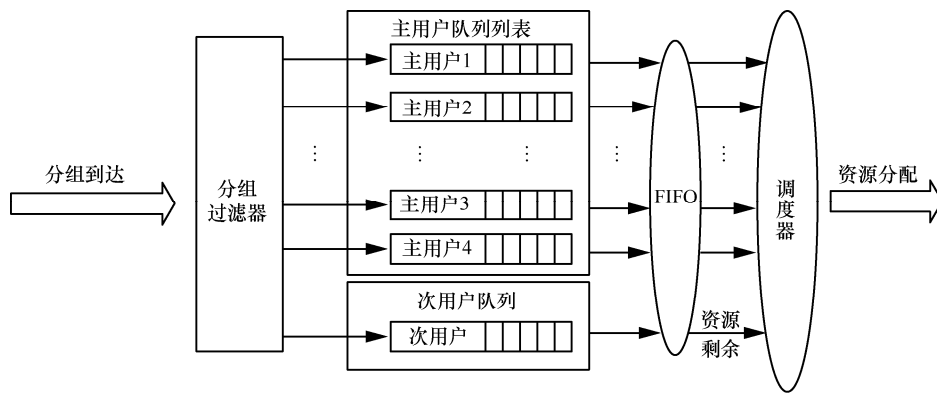


图3 基于FIFO的C-eNode B队列管理策略

TTI没有剩余RB分配给SU,给PU分配完RBG之后生成调度指示并结束该TTI。若 $L_{\text{RBG}}(t)$ 值不为0,该TTI有 $L_{\text{RBG}}(t)$ 个不足以分配给PU的RBG剩余,MRR给每个活跃的PU分配完RBG后,将剩余的 $L_{\text{RBG}}(t)$ 个RBG分配给SU,生成调度指示并结束该TTI。MRR调度算法描述如下。

TTI begin

Get the $n_{\text{PU}}(t)$ of PU in current TTI

Calculate $L_{\text{RBG}}(t)$ by equation (1)

Resource allocation:

if $L_{\text{RBG}}(t) = 0$

MRR allocates all of RBGs to the $n_{\text{PU}}(t)$ number of active PU and go to the last step

else

MRR allocates $\text{MOD}(N_{\text{RBG}}, n_{\text{PU}}(t))$ RBGS to the $n_{\text{PU}}(t)$ number of active PU

if SUs is active

MRR allocates the left $L_{\text{RBG}}(t)$ RBGs to the active SUs

else

//do nothing

end if

end if

Generate downlink schedule instruction

TTI end

3.3.2 ToS 值优先的 C-eNode B 队列管理策略

在C-eNode B端,C-eNode B除了处理PU的数据外,还要转发SU的数据。为解决第3.2节由频谱共享网络架构和单一车载网关造成的SU分组接收时延问题,本文提出ToS值优先的C-eNode B队列管理策略。不同于FIFO队列管理策略只是按数据到达的先后顺序将分组放入对应的队列,C-eNodeB在使用ToS值优先队列管理策略后,当接收到的SU数据分组是VoIP或video时,C-eNode B使用C++ stable_sort()函数对次用户队列 $Q_{\text{su}_1, \text{su}_2, \dots, \text{su}_n}^{\text{FIFO}}$ 中的分组按ToS值从大到小的顺序进行分组重排,形成新的次用户队列 $Q_{\text{su}_1, \text{su}_2, \dots, \text{su}_n}^{\text{ToS}}$,从而保证在有发送机会时,ToS值大的实时业务分组能够优先得到转发机会,减少实时业务的接收时延。具体描述在图4中。

3.4 复杂度分析

RR算法只考虑每个TTI中活跃的用户数量 n ,故算法的复杂度是 $o(n)$ 。MRR在RR的基础上做了改进,将空闲时间里的RB或TTI里不足以分配给PU的RB分配给列车上的SU使用,提高LTE-R频谱利用率。本文通过VG与C-eNode B通信,故MRR的复杂度还是 $o(n)$ 。基于ToS值优先的C-eNode B队列管理策略的复杂度取决于排序算法。本文使用C++ stable_sort()函数实现分组快速排序,时间复杂度为 $o(n \log n)^{[18]}$, n 表示队列中分组的数量。

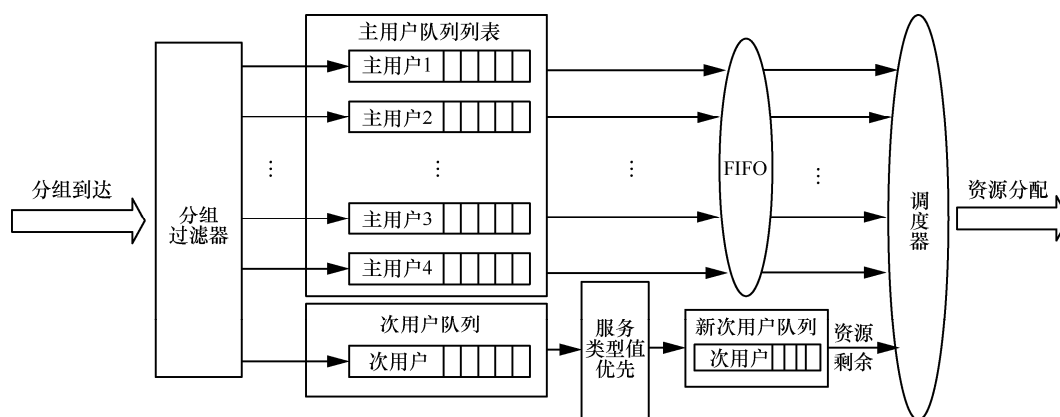


图4 基于 ToS 值优先的 C-eNode B 队列管理策略

4 仿真结果与分析

4.1 仿真场景

本文选择离散事件网络模拟器 NS3 来仿真 LTE-R CRN 的网络架构和基于 ToS 值优先的 C-eNode B 队列管理算法。本次仿真研究的是一个 C-eNode B 覆盖范围内的两个问题：在不影响车地通信的前提下，MRR 能否有效地将空闲资源块和 TTI 剩余不足以分配给 PU 的资源块给 SU 使用，实现频谱共享；在第 1 个问题的基础上，C-eNode B 对不同 QoS 要求的 SU 按 ToS 值优先的队列管理原则减少实时性业务的时延。

对于第一个问题，假设 LTE-R 基站工作在 700 MHz 的频段，系统带宽 5 MHz。在 C-eNode B 覆盖范围内同时有 3 辆列车，每辆列车上有 4 个接收不同铁路应用业务的设备（即 12 个 PU）需要接收来自列车控制中心的数据，各 PU 独立存在。PU 对网络的使用服从 on-off 模型，其中 on 服从正态分布，off 服从指数分布。假设列车速度不影响车载设备的越区切换和对无线信号接收，本文列车以 30 m/s 的速度由远到近穿过 LTE-R C-eNode B 的覆盖范围。

对于第 2 个问题，仿真采用第 2.2 节中描述的铁路应用参数，假设 C-eNode B 的队列缓冲区无限大。除了第 2.2.2 节中描述的 PU 的业务外，列

车上 30% 的旅客使用 VoIP 业务，VoIP 的编码方式是 G.729，数据速率是 8 kbit/s；20% 的旅客接收视频流，数据速率是 128 kbit/s，编码方式是 H.264；50% 的旅客只需要 BE 服务，主要的仿真参数总结在表 2 中。

表2 仿真参数

参数	取值
基站功率	46 dBm
带宽/资源块数量	5 MHz/25 个
频段	700 MHz
基站覆盖半径	1.5 km
列车速度	30 m/s
调度算法	MRR
PU/SU 数量	12/（10~100，每步增加 10 个）
仿真时间	100 s
流量模型	无限大 buffer 30% VoIP—G.729 语音流 20% video—H.264 编码方式 50% BE

4.2 结果与讨论

本研究的目的是在保障车地通信稳定安全、低时延的前提下，利用 CR 技术提高 LTE-R 系统下行频谱的利用率，并在资源受限的条件下尽量减少实时业务 SU 的接收时延。RB 的利用率、主用户业务的平均时延和不同队列管理策略下 SU 的接收时延将在下面讨论。

单位时间 SU 可用资源 PU on 的平均时间与仿真时间的关系如图 5 所示， T (theory) 表示理论

$\frac{\text{on}}{(\text{on}+\text{off})}$ 的比值, $S(\text{simulation})$ 表示仿真 $\frac{\text{on}}{(\text{on}+\text{off})}$ 的比值。在每个 TTI 中, 根据给定的仿真参数和 RR 的平均分配原则可获得理论剩余 RBG 的数量, 即每个 TTI 中会被浪费的频谱资源。当每个 TTI 中 $L_{\text{RBG}}(t)$ 均等于 0 时不会出现频谱浪费, 即 SU 可用 RBG 为 0。不难看出, 在几个不同的 PU 平均占用时间里, 理论和实际的曲线都接近重合, 证明了第 2.1.2 节的分析。

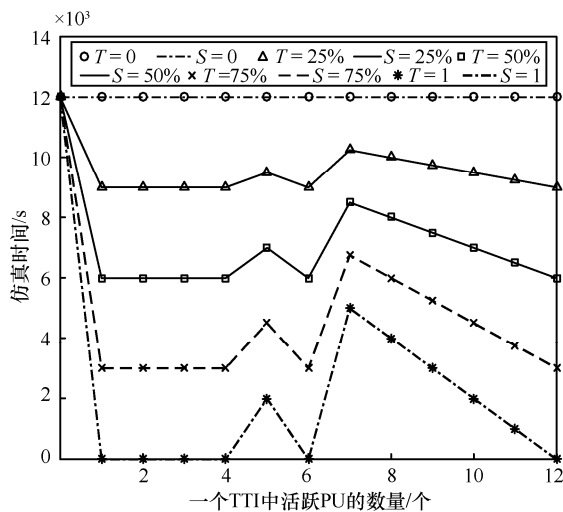


图5 单位时间 SU 可用资源与 PU on 的平均时间与仿真时间的关系

表 3 描述了单个 TTI 里需要被调度 PU 的数量与频谱利用率的关系, 在第 2.1.2 节中提到, 在本文给定的 5 MHz 带宽的仿真参数下, LTE-R 系统的 $N_{\text{RBG}} = 12$, 由于有一个无用 RB, 系统频谱的最大利用率为 96%。从表 3 可看出, RR 算法在 PU 数量不能整除系统可用 RBG 时将会产生频谱浪费, 如当某个 TTI 里需要被调度 PU 的数量为 7 个时, 频谱的利用率只有 56%。在使用 MRR 算法和基于 C-eNode B 与 VG 的频谱共享网络结构

后, MRR 将该 TTI 中剩余的 5 个 RBG 分配给 SU 使用, 频谱的利用率可以提高 40%, 达到 96%。结合图 5 和表 3, 说明 MRR 调度算法能很好地将 TTI 里剩余的 RBG 分配给 SU 使用, 提高 LTE-R 系统频谱的利用率。

认知 LTE-R 使用 MRR 下的 PU 业务的平均时延如图 6 所示。

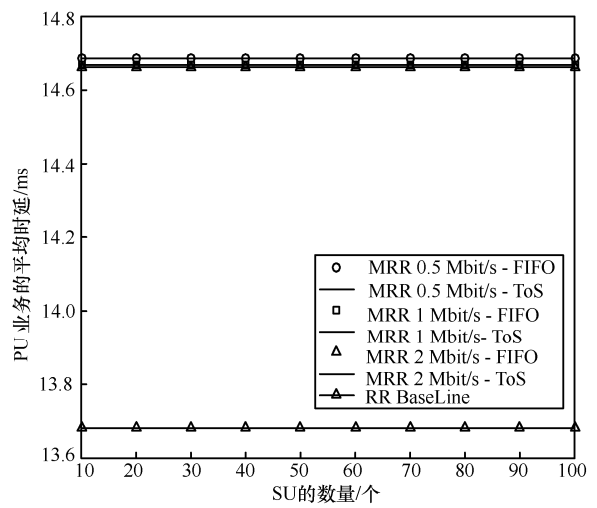


图6 认知 LTE-R 使用 MRR 下的 PU 业务的平均时延

由图 6 可知, 在未对 RR 算法改进前, 为保障列车运行的安全, LTE-R 系统的资源只有 PU 可以使用, 此时 PU 业务的平均时延最小, 是固定值, 不随次用户的增加而变化。当 C-eNode B 使用 MRR 调度算法后, PU 业务的平均时延有所上升, 但幅度不大, 大约为 1 ms, 远远小于铁路通信系统 50 ms 的时延要求^[14]。时延增加是因为 MRR 在给 PU 分配完资源后还需要检查是否有剩余资源要分配给 SU。从图 6 的上半部分还可得到, 在 file update 速率相同的前提下, PU 的平均时延是固定值, 不随 SU 的数量增加而变化, 不管 C-eNode B 采用的是 FIFO, 还是 ToS 队列管理策

表 3 一个 TTI 中需要被调度 PU 的数量与频谱利用率的关系

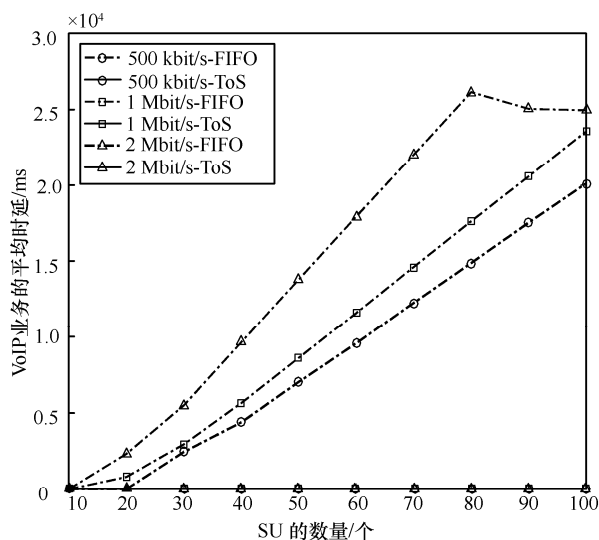
需要被调度 PU 的数量 $n_{\text{PU}}(t)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RR 调度算法频谱利用率	0	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%	0.8%	0.96%	0.56%	0.64%	0.72%	0.8%	0.88%	0.96%
MRR 调度算法频谱利用率	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%



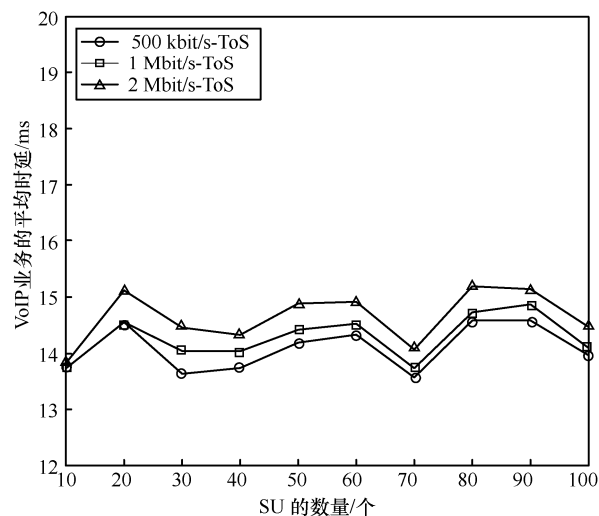
略, 对 PU 业务的端到端时延影响不大。总之, MRR 能够保证 PU 的接收时延较小, 保障车地通信的安全。

为了更接近真实的铁路通信环境, 本文选择 4 种不同的铁路通信应用进行仿真, 在第 2.2.3 节中描述。由图 7 (a) 知, 随着 SU 数量和 PU 业务速率的增加, 基于 FIFO 队列原则的 VoIP 业务的平均时延在不断增加。在 PU 速率等于 2 Mbit/s、系统总的 SU 数量等于 80 个时, 时延达到最大值; 继续增加 SU 的数量, 时延变小。原因是达到系统可用资源瓶颈, C-eNode B 队列缓冲区中的分组没有被发送出, 平均每个 SU 接收到的数据变少, 平均接收时延变小。基于 ToS 值优先策略的 C-eNode B 在每个可用的 TTI 里优先发送 ToS 值大的分组。本仿真中 VoIP 业务分组具有最大的 ToS 值, 所以在有转发机会的 TTI 里最先得到转发。图 7 (b) 是 C-eNode B 使用 ToS 策略时 VoIP 业务的平均时延, 即图 7 (a) 底部的局部放大图, 从图 7 (b) 可知, 在 C-eNode B 使用 ToS 值优先队列策略后, 尽管总的 SU 数量和 PU 占用资源在不断增加, VoIP 业务的平均时延都小于 16 ms。证明了 ToS 值优先策略能够保障 VoIP 业务的时效性和有效性。

图 8 给出了 C-eNode B 在使用 FIFO 和 ToS 值优先这两种队列管理策略时, video 业务的平均时延与 PU 占用资源和系统 SU 数量之间的关系。由图 8 (a) 可知, 基于 FIFO 的队列管理策略在 SU 数量较少和 PU 的速率较小时, video 业务的平均时延较小。随着 SU 数量的增加和 PU 速率的提高, video 业务的平均时延与 VoIP 业务类似, 不断上升。图 8 (b) 是 C-eNode B 使用 ToS 策略时 video 业务的平均时延, 即图 8 (a) 底部的局部放大图, 由图 8 (b) 可知, 在 C-eNode B 使用 ToS 值优先策略后, 由于 video 业务的 ToS 值大于 BE 业务但小于 VoIP, 且 VoIP 业务数据分组长度较小, video 业务在 VoIP 业务之后能够较快



(a) C-eNode B 使用 FIFO 和 ToS 队列管理策略



(b) C-eNode B 使用 ToS 队列管理策略

图 7 VoIP 业务的平均时延

得到转发, 最大时延不超过 20 ms。综合图 7、图 8 可知, C-eNode B 使用 ToS 值优先策略能够有效地保障实时业务的通信质量。

图 9 给出了 C-eNode B 在使用 FIFO 和 ToS 值优先这两种队列管理策略时, BE 业务的平均时延与 PU 占用资源和系统 SU 数量之间的关系。由图 9 可知, C-eNode B 使用 FIFO 的队列管理策略, 当 SU 数量较少和 PU 的速率较小时, BE 业务的平均时延较小。随着 SU 数量的增加和 PU 速率的提高, 平均时延在不断上升。到达资源瓶颈后, 再增加 SU 的数量, 时延最终基本维持不变。

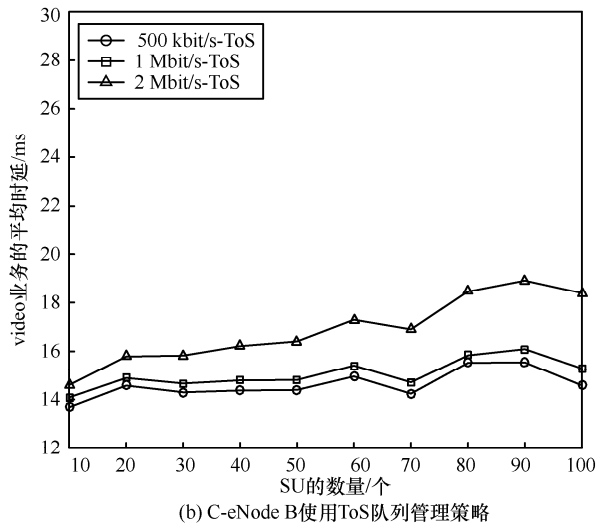
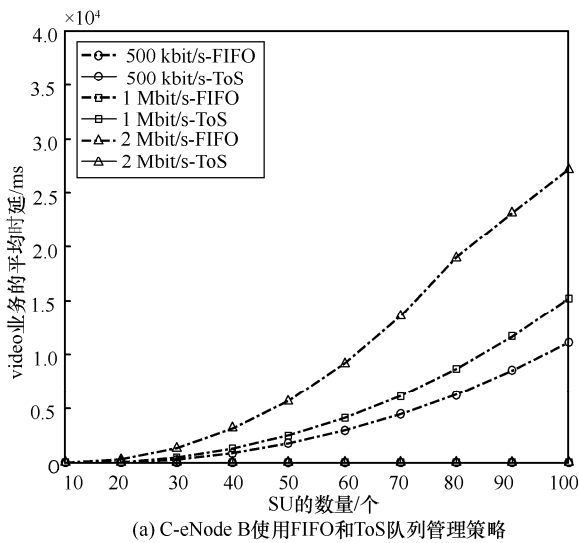


图8 video业务的平均时延

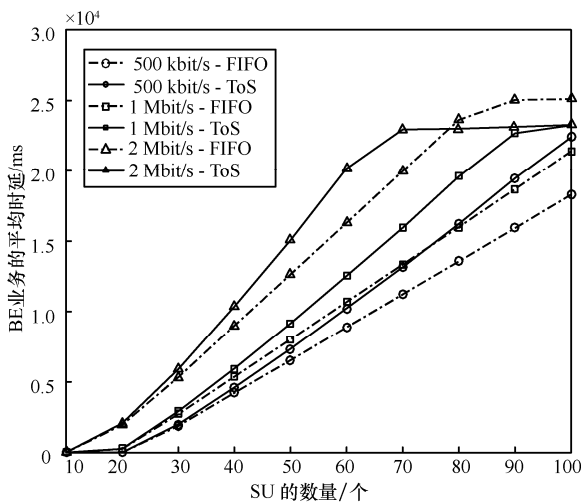


图9 BE业务的平均时延与PU占用资源和系统SU数量之间的关系

原因是随着系统中总的SU数量的增加,每个使用BE业务的SU接收到的数据在变少,导致时延基本维持不变。基于ToS值优先的C-eNode B队列管理策略优先转发ToS至更大的VoIP、video业务,BE业务在队列中无VoIP或video分组时才能被转发,所以在使用ToS值优先策略后,VoIP、video的平均时延较FIFO的时延小,BE业务的平均时延较FIFO的大。

未来,铁路运营商可以利用LTE-R系统中的空闲频谱资源为旅客提供Internet服务。将为乘客

提供不同服务质量等级的Internet接入作为铁路运营的增值服务,在增加铁路运营收入的同时提高旅客的乘车体验。

5 结束语

本文针对下行基于RR调度算法的LTE-R系统存在的空闲和TTI里存在的频谱资源浪费问题,提出将LTE-R基站升级成C-eNode B,改进RR算法,并在LTE-R系统中构建基于C-eNode B和VG的认知无线网络。C-eNode B在保障PU通信的前提下,通过MRR调度算法实现PU和SU频谱资源共享。通过ToS值优先的C-eNode B队列管理策略,减小高QoS要求的SU分组时延。仿真结果表明,基于MRR调度算法的C-eNode B能很好地提高LTE-R授权频段的频谱利用率。基于ToS值优先的C-eNode B队列管理策略可以有效地减少实时业务的时延。下一步将研究认知LTE-R基站对整条铁路线上频谱的利用情况和不同QoS业务的SU如何在资源有限的条件下更好地完成通信。

参考文献:

- [1] WANG J, ZHU H, GOMES N J. Distributed antenna systems

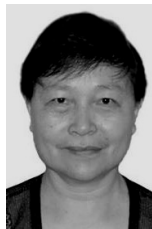


- for mobile communications in high speed trains[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(4): 675-683.
- [2] SNIADY A, SOLER J. LTE for railways: impact on performance of ETCS railway signaling[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(2): 69-77.
- [3] HE R, AI B, WANG G, et al. High-speed railway communications: from GSM-R to LTE-R[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(3): 49-58.
- [4] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKOLD J. 4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011.
- [5] XU S, ZHU G, AI B, et al. A survey on high-speed railway communications[J]. Computer Communications, 2016, 86(C): 12-28.
- [6] KIM J, SANG W C, SONG Y S, et al. Automatic train control over LTE: design and performance evaluation[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 102-109.
- [7] BANERJEE S, HEMPEL N, SHARIF H. A survey of wireless communication technologies & their performance for high speed railways[J]. Journal of Transportation Technologies, 2016, 6(1): 15-29.
- [8] PARICHEHREH A, SAVAZZI S, GORATTI L, et al. Seamless LTE connectivity in high-speed trains[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2016, 16(12): 1478-1494.
- [9] AHMAD I, CHEN W, CHANG K. LTE-railway user priority-based cooperative resource allocation schemes for coexisting public safety and railway networks[J]. IEEE Access, 2017, 5(99): 7985-8000.
- [10] MORENO J, RIERA J M, DE HARO L, et al. A survey on future railway radio communications services: challenges and opportunities[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 62-68.
- [11] BALDINI G, KARANASIOS S, ALLEN D, et al. Survey of wireless communication technologies for public safety[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2): 619-641.
- [12] KOLODZY P, KOLODZY P. Spectrum policy task force report[J]. Federal Communications Commission Tech.rep.rep.et Docket, 2002, 40(4): 147-158.
- [13] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [14] PARICHEHREH A, SPAGNOLINI U, MARINI P, et al. Load-stress test of massive handovers for LTE two-hop architecture in high-speed trains[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(3): 170-177.
- [15] FOKUM D, FAST V. A survey on methods for broadband Internet access on trains[J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2010, 12(2): 171-185.
- [16] SNIADY A, KASSAB M, SOLER J, et al. LTE micro-cell deployment for high-density railway areas[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014(8435): 143-155.
- [17] DENG H, WU C, WANG Y. A cognitive gateway-based spectrum sharing method in downlink round robin scheduling of LTE system[J]. Modern Physics Letters B, 2017: 1740070.
- [18] CORMEN, THOMAS H. Introduction to algorithms[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.

[作者简介]



邓宏宇 (1991-), 男, 苏州大学硕士生, 主要研究方向为认知无线电中的资源分配和共享等。



汪一鸣 (1956-), 女, 博士, 苏州大学教授、博士生导师, 中国电子学会高级会员, IEEE 会员, 主要研究方向为无线通信网络、认知无线电、超宽带通信等。



吴澄 (1976-), 男, 博士, 苏州大学副教授, 主要研究方向为认知无线电、人工智能、图像处理等。