

具有时延约束的高速铁路云无线接入网络资源分配研究

李世超

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 高速铁路无线信道是一种强时变的无线信道,在实际中难以保证乘客的时延约束。在高速铁路云无线接入网络(C-RAN)架构下,构建一个同时满足用户业务统计时延约束与前向链路容量限制的能量效率最大化问题。考虑到高速列车具有运动方向确定、轨迹固定、路径损耗可预测等特点,以路径损耗信息替代传统信道状态信息进行建模,从而有效降低能量效率最大化问题的复杂度。鉴于原始问题为非凸优化问题,首先通过变换将问题重构为一个等价的凸优化问题,随后设计一种 2 层迭代的功率分配算法,并使用拉格朗日对偶方法对内层子问题进行求解。在不同列车速度、服务质量(QoS)指数、用户数量下进行仿真验证,结果表明,所提算法不仅能够严格满足统计时延约束,还能显著提升系统的能量效率,该研究可以为高速铁路 C-RAN 中绿色、高效的资源分配任务提供可行思路和理论支持。

关键词: 高速铁路;云无线接入网络;业务统计时延;能量效率;功率分配

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0069171

Research on Resource Allocation in Cloud Radio Access Networks for High-Speed Railways with Delay Constraints

LI Shichao

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

【Abstract】 A high-speed railway wireless channel is a highly time-varying wireless channel, posing challenges to the enforcement of delay constraints for passengers in practical scenarios. Within the framework of the Cloud Radio Access Networks (C-RAN) architecture for high-speed railways, this study constructs an energy efficiency maximization problem that simultaneously satisfies the statistical delay constraints of user services and forward link capacity limitations. Considering the characteristics of high-speed trains, such as their deterministic movement direction, fixed trajectory, and predictable path loss, the model is established by utilizing the path loss information instead of traditional channel state information, thereby effectively reducing the complexity of the energy efficiency maximization problem. As the original problem is a non-convex optimization problem, it is first transformed into an equivalent convex optimization problem. Subsequently, a two-layer iterative power allocation algorithm is designed, and the Lagrangian duality method is employed to solve the inner subproblem. Simulation validations are conducted under varying train speeds, Quality of Service (QoS) indices, and numbers of users. The results demonstrate that the proposed algorithm not only strictly adheres to the statistical delay constraints but also significantly enhances the energy efficiency of the system. Thus, this study provides feasible solutions and theoretical support for green and efficient resource allocation tasks in high-speed railway C-RAN systems.

【Key words】 high-speed railway; Cloud Radio Access Networks (C-RAN); service statistics delay; energy efficiency; power allocation

0 引言

云无线接入网络(C-RAN)是 5G 移动通信的重要组成部分,它能为用户提供高速率的数据服务,以适应不断增加的高速率数据服务需求^[1-2]。C-RAN 中的无线射频单元(RRH)只能进行无线电收发,而基带单元(BBU)则负责数据的处理。无线接入网络中的接入设备主要负责信息的收发,而基带设备

则是无线接入网络的核心,两者的相互作用将直接影响无线接入网络的性能。BBU 池中的集中式信号处理结构在许多方面要比传统独立基站中的分布式信号处理结构具有更大的优势,其能节约能耗、降低运营商的运营开支以及提高硬件利用率等^[3-4]。将 C-RAN 技术引入高速铁路网络,能够极大地提高高速铁路的数据服务质量(QoS)。

随着通信技术的飞速发展,通信设备对能源的需

收稿日期: 2024-01-04 修回日期: 2024-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(62361016);国家留学基金(202108450022)。

通信作者 E-mail: shichaoli@guet.edu.cn

求日益增大。有数据显示,目前通信设备所产生的 CO_2 已达到全球 CO_2 总排放量的 2%,通信设备的能量消耗已达到全球总能量消耗的 3%^[5]。另外,高速铁路中的无线通信能耗也在逐年增加^[6]。高速铁路作为一种高效、绿色的交通系统,如何利用有限的能量来满足日益增长的业务需求,是亟需解决的问题。

近年来,有关 C-RAN 的资源管理研究受到了极大关注。文献[7]提出了一种针对 C-RAN 下行链路传输的联合多种资源分配系统能效优化模型,利用 Lyapunov 优化方法提出了一种迭代优化算法,实现了能效与 QoS 的均衡。文献[8]在保证用户 QoS 要求的前提下,为了提高 C-RAN 中 BBU 的利用率,提出了一种基于优先级的资源分配和队列模型,利用连续时间马尔可夫链定义和推导了模型的性能指标,并利用不同方法对其进行了评估和比较。在 C-RAN 中,为了降低任务的传输时间,文献[9]研究了联合波束成形与缓存分配问题,通过将原问题分解为 2 个子问题,分别提出了迫零波束成形算法以及高速缓存分配方案。文献[10]在基于 C-RAN 的有限长度编码通信系统中,提出了一种跨层优化框架,旨在保证用户 QoS 要求的前提下最大限度地提高带宽效率。该框架构建了一个联合调制、编码、重传次数选择、初始带宽分配与接入点选择的优化问题。针对该问题,首先将其分解为传输参数决策子问题和用户关联子问题,然后分别利用二进制搜索算法和拍卖算法来进行求解。文献[11]提出了一种混合供电的下行 C-RAN 模型,所提出的太阳能和电网混合协作供电模式能够有效降低 C-RAN 的能耗。文献[12]将频谱共享、信道、功率分配以及干扰管理引入 C-RAN 中,提出了一种开放的 C-RAN 模型,实验证明,该模型能够消除小区间干扰。文献[13]将智能反射面技术引入 C-RAN 中,通过对 RRH 进行发射波束成形设计、智能反射面无源波束成形设计和前端压缩,增加了系统的鲁棒性。针对用户的数据重传需求,文献[14]在 C-RAN 中提出了一种灵活动态的混合自动重传请求资源分配策略,实验证明,该策略能够有效降低数据的传输错误率。

现有的相关工作均聚焦于传统的移动通信系统。考虑到 C-RAN 技术能够满足大规模用户的高速率无线业务需求,可以将其应用在高速铁路无线网络中。与传统的蜂窝网络相比,高速铁路具有信道状态时变特性,这使得在实际中难以保证用户的时延约束。另外,列车还具有移动方向确定、运动轨迹固定等特性,这会给问题的建模与求解带来一定的便利。

本文以高速铁路为背景,以 C-RAN 网络为研究对象,研究用户业务统计时延与前传链路容量约束下的 C-RAN 网络能量效率最大化问题。考虑到该问题是一个非凸优化问题,首先对目标函数进行重构,使其变为一个凸优化问题,接着提出一种 2 层迭代的功率分配算法,最后利用拉格朗日对偶算法对内层迭代问题进行求解。

1 系统模型

本文考虑一种基于 C-RAN 的高速铁路网络,该 C-RAN 网络由若干个 RRH 和一个 BBU 池组成,如图 1 所示(彩色效果见《计算机工程》官网 HTML 版,下同)。RRH 部署在铁路沿线,可以为高速列车中的用户提供无缝覆盖,RRH 接收到任务后将其传输至 BBU 池中进行处理。

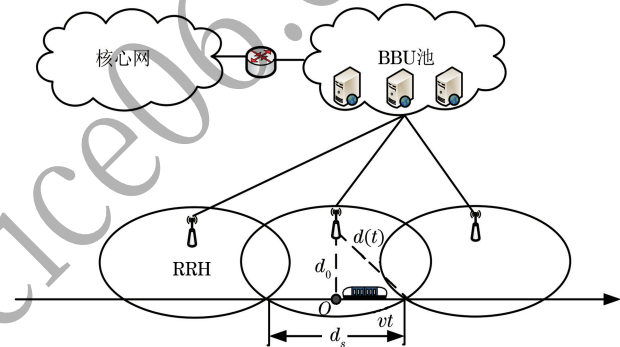


图 1 系统模型

Fig.1 System model

设高速列车的车速是 v ,每一个 RRH 的覆盖范围为 d_s ,那么通过一个 RRH 需要的时间为 $T = d_s/v$ 。设高速列车在 origin 时 $t=0$ 。由于列车具有高速移动性,因此在高速铁路场景中很难获取准确的信道状态信息。但考虑到列车具有运动方向确定、运动轨迹固定等特点,可以利用可预测的路径损耗信息替代信道状态信息,从而实现对问题的简化。根据文献[15-17],列车在一个 RRH 小区覆盖下的路径损耗可以写为:

$$h(t) = \frac{1}{(d_0 + (vt)^2)^{\frac{\alpha}{2}}}, -\frac{d_s}{2v} \leq t \leq \frac{d_s}{2v} \quad (1)$$

式中: α 是路径损耗因子。考虑到列车在 2 个 RRH 之间运动时信道状态信息存在着一定的周期变化,而在同一个 RRH 中信道状态信息是对称的,因此本文只需要考虑半个 RRH 中的信道变化即可^[15-17]。

本文考虑任务的上行传输,在列车中有 K 个用户,定义用户集合为 $\mathbf{K} = \{1, \dots, K\}$ 。定义 $p_k(t)$ 为第 k 个用户在第 t 个时刻的发射功率,利用香农公

式可得信息传输速率为:

$$r_k(t) = \log_a(1 + h(t)p_k(t)) \quad (2)$$

高速铁路无线信道是一种强时变的无线信道,因此,在实际应用中难以保证用户的时延约束。由文献[18-20]可知,统计延迟可以通过有效容量得到保障。有效容量是指在满足一定的时延条件下无线信道所能承受的最大常值传输率。

根据文献[18-20],用户业务的遍历随机服务过程可定义为 $R(i), i=0,1,2,\dots$, 与其对应的有效容量可以表示为:

$$E_c(\theta) = -\frac{1}{\theta} \log_a(E(e^{-\theta R(i)})) \quad (3)$$

式中: θ 为正整数,即 QoS 指数。 θ 的物理含义是用户稳态延迟违背的概率,可表示为:

$$\Pr(D \geq D_{\max}) \approx e^{-\theta \mu D_{\max}} \quad (4)$$

式中: D 为用户的时延; $D_{\max}$ 为用户所能接受的最大时延; μ 由数据达到和服务过程所决定。在给定最大延时 $D_{\max}$ 的情况下,系统的延迟违背率取决于 QoS 指数。QoS 指数越小,对延迟的需求就越小。QoS 指数越大,对延迟的要求就越高。在确定了 QoS 指数之后,就可以对用户进行有效容量计算。定义 $E_{\min}$ 为用户必须达到的最小有效容量,所以需要满足下式:

$$E_c(\theta) \geq E_{\min} \quad (5)$$

由上述分析可知,在已知 QoS 指数的情况下,第 k 个用户的有效容量为:

$$E_c^k(\theta_k) = -\frac{1}{\theta_k} \log_a(E[e^{-\theta_k r_k(t)}]) \quad (6)$$

2 能量效率最大化问题

在 5G 通信系统中,高能量效率已成为当今的研究热点。本节在高速铁路 C-RAN 中,考虑用户的统计时延以及网络前向链路容量约束,构建一个网络能量效率最大化问题。考虑到该问题是一个非凸优化问题,对问题进行重构。

2.1 问题建模

本文构建的基于高速铁路 C-RAN 的能量效率最大化问题可以表示为:

$$\max_{\{p_k(t)\}} \frac{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k(t)}{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k(t) + p_c)} \quad (7)$$

$$\text{s. t. } E_c^k(\theta_k) \geq E_{\min} \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K b_k r_k(t) \leq C_{\max} \quad (9)$$

$$0 \leq p_k(t) \leq P_{k,\max} \quad (10)$$

式中: p_c 是用户的固定电路功耗; $E_{\min}^k$ 为第 k 个用户所需达到的最小有效容量; b_k 为分配给第 k 个用户的频带资源; $C_{\max}$ 为网络前向链路所具有的最大容量。式(8)为统计时延限制。式(9)为网络的前向链路容量限制。式(10)为用户的发射功率限制。由于式(7)具有非凸性,使得该问题属于非凸性优化问题,采用经典的凸优化算法很难解决。

2.2 问题变换

为了求解所构建的问题式(7),首先需要对目标函数式(8)进行变换。

定义一个非负的辅助变量 γ^* , 它表示最优的

能量效率值, $\gamma^* = \frac{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k^*(t)}{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k^*(t) + p_c)}$, 其中,

$p_k^*(t)$ 为最优的功率分配策略, $r_k^*(t)$ 是指最优功率分配策略下的信道容量。

引理 1 当且仅当式(11)成立时, γ^* 为最优的能量效率值。

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k(t) - \gamma^* \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k(t) + p_c) \right) &= \\ \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k^*(t) - \gamma^* \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k^*(t) + p_c) \right) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

证明如下:

1)充分性。定义 γ^* 为问题式(7)的最优能量

效率值, $\gamma^* = \frac{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k^*(t)}{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k^*(t) + p_c)}$, 其中, $p_k^*(t)$

为最优的功率分配策略, $r_k^*(t)$ 是指最优功率分配策略下的信道容量,则有:

$$\begin{aligned} \gamma^* &= \frac{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k^*(t)}{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k^*(t) + p_c)} \geq \\ &= \frac{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k(t)}{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k(t) + p_c)} \end{aligned} \quad (12)$$

从式(12)可得:

$$\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k(t) - \gamma^* \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k(t) + p_c) \right) \leq 0 \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k^*(t) - \gamma^* \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k^*(t) + p_c) \right) = 0 \quad (14)$$

因此,当 $p_k^*(t)$ 为最优的功率分配策略时,可得 $\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k^*(t) - \gamma^* \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k^*(t) + p_c) \right) = 0$ 。充分性得证。

2) 必要性。定义 $\hat{p}_k^*(t)$ 为改变目标函数后的最优功率分配策略, $\hat{r}_k^*(t)$ 是在此最优功率分配策略下的信道容量。因此,有 $\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K \hat{r}_k^*(t) - \gamma^* \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (\hat{p}_k^*(t) + p_c) \right) = 0$ 。对于任意可行的功率分配策略 $p_k(t)$ 以及对应的信道容量,可以写为:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k(t) - \gamma^* \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k(t) + p_c) \right) &\leq \\ \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K \hat{r}_k^*(t) - \gamma^* \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (\hat{p}_k^*(t) + p_c) \right) &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

从上式可得:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K \frac{r_k(t)}{p_k(t) + p_c} &\leq \gamma^* \\ \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K \frac{\hat{r}_k^*(t)}{\hat{p}_k^*(t) + p_c} &= \gamma^* \end{aligned} \quad (16)$$

因此,对于改变目标函数后的最优功率分配策略 $\hat{p}_k^*(t)$, 同样也是原问题的最优功率分配策略。必要性得证。

综上,引理 1 得证。

根据引理 1, 可以将问题式(7)重构为:

$$\max_{\{p_k(t)\}} \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k(t) - \gamma^* \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k(t) + p_c) \right) \quad (17)$$

$$\text{s. t. 式(8) ~ 式(10)} \quad (18)$$

式中: γ^* 为最优的能量效率值。

3 能量效率最大化的功率分配算法

针对能量效率最大化问题,本节提出一种迭代算法来得到最优的能量效率值 γ^* , 如算法 1 所示。

算法 1 能量效率最大化的功率分配算法

1. 初始化系统的相关参数;
2. 设 i 为迭代次数,令 $i=0$ (外层迭代)
3. for $1 \leq i \leq I_{\max}$ do
4. 利用 $\gamma^{(i)}$ 求解功率分配问题(内层迭代)
5. 利用拉格朗日对偶法计算 $r_k^{(i)}(t)$ 和 $p_k^{(i)}(t)$
6. if $\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k^{(i)}(t) - \gamma^{(i)} \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k^{(i)}(t) + p_c) \right) < \tau$

7. 可得 $\gamma^* = \gamma^{(i)}$, $p_k^*(t) = p_k^{(i)}(t)$

8. break

9. else

$$10. \text{ 可得 } \gamma^{(i+1)} = \frac{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k^{(i)}(t)}{\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k^{(i)}(t) + p_c)}, i=i+1$$

11. end if

12. end for

该算法包括内、外 2 层迭代,外层迭代通过计算 $r_k^{(i)}(t)$ 和 $p_k^{(i)}(t)$ 来更新 $\gamma^{(i+1)}$, 内层迭代利用拉格朗日对偶法计算 $r_k^{(i)}(t)$ 和 $p_k^{(i)}(t)$ 。

内层迭代的资源分配问题可以写为:

$$\max_{\{p_k(t)\}} \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k(t) - \gamma^{(i)} \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k(t) + p_c) \right) \quad (19)$$

$$\text{s. t. } E[e^{-\theta_k r_k(t)}] \leq e^{-\theta_k r_{\min}^k} \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^K b_k r_k(t) \leq C_{\max} \quad (21)$$

$$0 \leq p_k(t) \leq P_{k,\max} \quad (22)$$

式中: $\gamma^{(i)}$ 为第 i 次迭代的能效值。

由于式(19)是一个凸优化问题,因此可以利用拉格朗日对偶法进行求解。根据文献[21],式(19)的拉格朗日函数可以写为:

$$\begin{aligned} L(\{p_k(t)\}, \{\lambda_k\}, \{\mu(t)\}, \{v_k(t)\}) &= \\ \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k(t) - \gamma^{(i)} \left(\sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K (p_k(t) + p_c) \right) &- \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k (E[e^{-\theta_k r_k(t)}] - e^{-\theta_k r_{\min}^k}) &- \\ \sum_{t=1}^{T/2} \mu(t) \left(\sum_{k=1}^K b_k r_k(t) - C_{\max} \right) &- \\ \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K v_k(t) (p_k(t) - P_{k,\max}) & \end{aligned} \quad (23)$$

式中: λ_k 、 $\mu(t)$ 和 $v_k(t)$ 为拉格朗日变量。

若要使拉格朗日函数达到最大,则只需要对式(23)应用拉格朗日对偶方法,将式(23)对 $p_k(t)$ 求偏导,使其等于 0,可以得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(\{p_k(t)\}, \{\lambda_k\}, \{\mu(t)\}, \{v_k(t)\})}{\partial p_k(t)} &= \\ \frac{h(t)}{(1+h(t)p_k(t)) \ln 2} - \gamma^{(i)} + & \\ \lambda_k \theta_k e^{-\theta_k r_k(t)} \frac{h(t)}{(1+h(t)p_k(t)) \ln 2} - & \\ \mu(t) b_k \frac{h(t)}{(1+h(t)p_k(t)) \ln 2} - v_k(t) &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

通过对式(24)进行求解,可得到对应的功率分配策略。

式(23)中的拉格朗日变量可以利用下式进行更新:

$$\lambda_k^{l+1} = [\lambda_k^l + \xi_\lambda (E[e^{-\theta_k r_k(t)}] - e^{-\theta_k E_{\min}^k})]^+ \quad (25)$$

$$\mu^{l+1}(t) = \left[\mu^l(t) + \xi_\mu \left(\sum_{k=1}^K b_k r_k(t) - C_{\max} \right) \right]^+ \quad (26)$$

$$v_k^{l+1}(t) = [v_k^l(t) + \xi_v (p_k(t) - P_{k,\max})]^+ \quad (27)$$

式中: ξ_λ 、 ξ_μ 和 ξ_v 均为迭代步长; l 为迭代次数。

由于式(25)中含有期望运算,因此需要得到相应的概率密度函数。然而,在实际的高速铁路通信系统中,这是很难得到的。为了解决该问题,本文根据文献[22-23]将式(25)改写为:

$$\lambda_k^{l+1} = [\lambda_k^l + \xi_\lambda' (e^{-\theta_k r_k(t)} - e^{-\theta_k E_{\min}^k})]^+ \quad (28)$$

ξ_λ' 是满足以下条件的正数:

$$\sum_{l=1}^{\infty} \xi_\lambda' = \infty, \quad \sum_{l=1}^{\infty} (\xi_\lambda')^2 < \infty \quad (29)$$

由于式(19)是一个凸优化问题,当采用内点法来求解拉格朗日对偶函数时,该问题的复杂度可以表示为 $O(K^{3.5} T^{3.5})$ [21]。

4 仿真结果分析

本节通过实验验证所提功率分配算法的有效性,表 1 给出了仿真所采用的参数[24]。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	值
RRH 距离铁路轨道的距离/m	50
RRH 小区覆盖半径/m	1 500
列车运行速度/(km·h ⁻¹)	350
路径损耗因子	3
每个用户的分配带宽/MHz	1
前向链路的最大容量/(Mb·s ⁻¹)	600
用户个数	100
QoS 指数	0.01
最小有效容量	1
用户最大发射功率/W	0.5
时隙长度/ms	1
用户电路固定功率消耗/W	0.04
衰落因子	1

为了验证本文所提功率分配算法的有效性,将该算法与传统的注水算法、固定功率分配算法、信道反转算法进行对比[25]。4 种算法的复杂度如表 2 所示。

1) 注水算法。在该算法中,目的是最大化信息

传输速率,优化目标为 $\max_{\{p_k(t)\}} \sum_{t=1}^{T/2} \sum_{k=1}^K r_k(t)$ 。

2) 固定功率分配算法。在该算法中,信息的传输功率 $p_k(t)$ 为一个定值。

3) 信道反转算法。在该算法中,通过功率补偿方式维持恒定的信息传输速率,即在式(2)中 $h(t)p_k(t)$ 是一个定值。

表 2 功率分配算法的复杂度比较

Table 2 Comparison of complexity of power allocation algorithms

算法	复杂度
本文算法	$O(K^{3.5} T^{3.5})$
注水算法	$O(KT)$
固定功率分配算法	$O(KT)$
信道反转算法	$O(KT)$

图 2 为不同功率分配策略下能量效率与列车速度之间的关系。当车速增加时,能量效率降低,这是因为在单位时间内较低车速的信道质量优于较高车速。从图 2 还可以看出,本文所提算法性能优于传统的 3 种算法,而在这 3 种算法中,信道反转算法的能量效率值最差。这是因为信道反转算法的思路是无论信道状态如何,都将以固定速率传输信息,当信道状态较差时,信道反转算法会以较大的发射功率来传输信息,从而使得系统的能量效率降低。

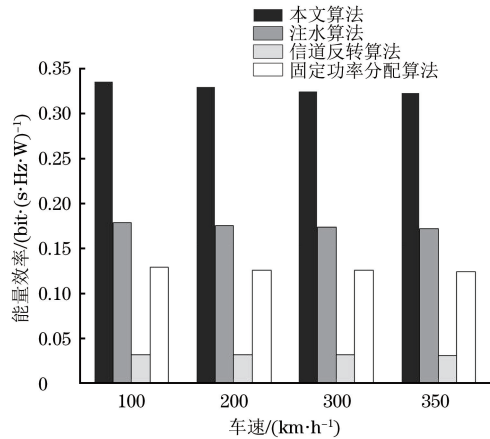


图 2 不同功率分配策略下能量效率与列车速度之间的关系

Fig. 2 The relationship between energy efficiency and train speed under different power allocation strategies

图 3 为不同固定功耗下能量效率与 QoS 指数的关系。当 QoS 指数 θ 增加时,系统的能量效率降低,这是因为更高的 θ 值表示用户具有更加严苛的时延约束,此时用户需要增加发射功率来满足业务的时延要求,从而使得系统的能量效率降低。同时,从图中还可以看出,当用户的电路固定功率消耗增加时,系统的能量效率也在降低。

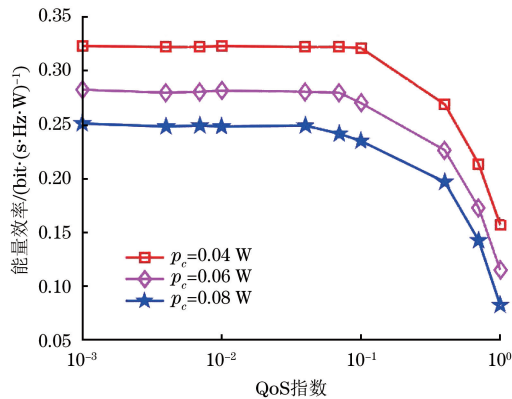


图 3 不同固定功耗下能量效率与 QoS 指数的关系
Fig.3 The relationship between energy efficiency and QoS index under different fixed power consumption

图 4 为不同用户数目下能量效率与列车速度之间的关系。随着用户数目的增加,系统的能量效率降低。这是因为受到前传链路容量约束的影响,当用户数目增加时,每个用户的传输速率受到了限制,从而使得系统的能量效率降低。

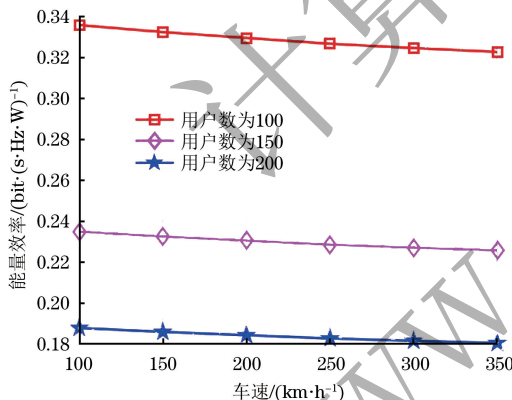


图 4 不同用户数目下能量效率与列车速度之间的关系
Fig.4 The relationship between energy efficiency and train speed under different numbers of users

5 结束语

本文在高速铁路 C-RAN 中研究有业务时延约束的能量效率最大化问题。考虑到列车的快速移动特性,利用可预测的路径损耗信息替代信道状态信息,以实现问题的简化。首先对非凸优化问题的目标函数进行等价变换,接着提出一种 2 层迭代的功率分配算法,最后采用拉格朗日对偶算法对内层迭代问题进行求解。仿真结果表明,本文所提功率分配策略能在满足用户业务时延和前向链路容量约束的条件下,实现系统的能量效率最大化。目前,本文仅利用仿真软件在理论上证明了算法的可行性,接下来考虑将本文算法应用于实际的高速铁路测试数据中,从而验证算法的有效性。

参考文献

- [1] 李世超. 基于云架构的无线通信资源管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
LI S C. Research on wireless communication resource management in cloud architecture [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [2] 余钊贤, 易辉跃, 裴俊. 5G 超密集异构网络带内无线回传资源分配方案[J]. 计算机工程, 2021, 47(3): 43-52.
YU Z X, YI H Y, PEI J. Resource allocation scheme of in-band wireless backhaul in 5G ultra-dense heterogeneous network[J]. Computer Engineering, 2021, 47(3): 43-52. (in Chinese)
- [3] AMANI N, PARSAEEFARD S, YANIKOMEROGLU H. Multi-objective energy efficient resource allocation in massive multiple input multiple output-aided heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Access, 2023, 11: 33480-33497.
- [4] 程麒, 张昱, 彭宏. 智能反射面辅助 OFDMA 云接入网的资源分配方法[J]. 小型微型计算机系统, 2024, 45(4): 943-950.
CHENG Q, ZHANG Y, PENG H. Resource allocation for intelligent reflecting surface assisted OFDMA C-RAN[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2024, 45(4): 943-950. (in Chinese)
- [5] LARSEN L M P, CHRISTIANSEN H L, RUEPP S, et al. Toward greener 5G and beyond radio access networks—a survey [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2023, 4: 768-797.
- [6] WANG L, AI B, NIU Y, et al. Energy efficient train-ground mmWave mobile relay system for high speed railways [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2023, 7(1): 16-28.
- [7] MAI Z Y, CHEN Y Y, XIE Y T, et al. An energy efficiency optimization jointing resource allocation for delay-aware traffic in fronthaul constrained C-RAN [J]. Wireless Networks, 2023, 29(1): 353-368.
- [8] ALQAHTANI S A. Cooperative-aware radio resource allocation scheme for 5G network slicing in cloud radio access networks[J]. Sensors, 2023, 23(11): 5111.
- [9] ESMAEILI M, SHAHBAZPANAH S, DONG M. Joint optimization of transmit beamforming and base station cache allocation in multi-cell C-RAN [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2023, 71: 1755-1769.
- [10] WU C, LU H C, CHEN Y A, et al. Cross-layer optimization for statistical QoS provision in C-RAN with finite-length coding [J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(6): 3393-3407.
- [11] RUBINA AKTAR M, ANOWER M S, SARKAR M Z I, et al. Energy-efficient hybrid powered Cloud Radio Access Network (C-RAN) for 5G [J]. IEEE Access, 2023, 11: 3208-3220.
- [12] WU S H, KO C H, CHAO H L. On-demand coordinated spectrum and resource provisioning under an open C-RAN architecture for dense small cell networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(1): 673-688.
- [13] ZHANG Y, HE X X, ZHONG C J, et al. Robust design for IRS-aided C-RAN with constrained wireless fronthaul links[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(2): 1909-1924.
- [14] ELFIKY M, BECVAR Z, MACH P. Allocation of resources for HARQ retransmission in mobile networks based on C-RAN[J]. IEEE Systems Journal, 2024, 18(1): 450-461.
- [15] LI S C, ZHU G, LIN S Y, et al. Energy efficiency and capacity tradeoff in cloud radio access network of high-speed railways [J]. Mobile Information Systems, 2017, 2017:

- 5816862.
- [16] XU J Y, WEI Z C, LÜ Z W, et al. Throughput maximization of offloading tasks in multi-access edge computing networks for high-speed railways [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9): 9525-9539.
- [17] ZHONG G D, XIONG K, ZHONG Z D, et al. Internet of Things for high-speed railways[J]. Intelligent and Converged Networks, 2021, 2(2): 115-132.
- [18] MOOSAVI N, SINAIE M, AZMI P, et al. Delay aware resource allocation with radio remote head cooperation in user-centric C-RAN [J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(7): 2343-2347.
- [19] QASMI F, SHEHAB M, ALVES H, et al. Effective energy efficiency and statistical QoS provisioning under Markovian arrivals and finite blocklength regime[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(18): 17741-17755.
- [20] LIU Y F, WEI Z Q, YAN C, et al. Effective capacity based power allocation for the coexistence of an integrated radar and communication system and a commercial communication system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 58629-58644.
- [21] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [22] BHORKAR A, KARANDIKAR A, BORKAR V S. Power optimal opportunistic scheduling [C] //Proceedings of IEEE Global Communications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006: 1-5.
- [23] PHAN K T, LE-NGOC T. Online QoS-based dynamic scheduling in multi-channel wireless networks [C] // Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Washington D.C., USA: IEEE Press, 2013: 586-590.
- [24] ZHANG C, FAN P Y, XIONG K, et al. Optimal power allocation with delay constraint for signal transmission from a moving train to base stations in high-speed railway scenarios[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5775-5788.
- [25] XU S F, ZHU G, SHEN C, et al. Utility-based resource allocation in high-speed railway wireless networks [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014(1): 68.

编辑 吴云芳