

可再生能源供电下射频单元的基带功能分割和功率控制

Flexible Baseband Functional Split and Power Control with Renewable Energy Powered Remote Radio Unit

王刘猛/WANG Liumeng
周盛/ZHOU Sheng

(清华大学, 北京 100084)
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

中国移动在 2009 年提出云接入网 (C-RAN) 的概念^[1], 其主要思路是将部分或所有基带功能集中到基带功能池, 在基带功能池对基带单元 (BBU) 进行统一管理和资源动态分配, 进而提高资源利用率, 并支持协作传输^[2]。另一方面, C-RAN 能降低远端射频单元 (RRU) 的复杂度, 进而降低网络的部署和运营成本。其中, 前传网 (Fronthaul) 负责 BBU 和 RRU 之间基带信号的传输。对于全集中的 C-RAN, 即将全部的基带功能放置在 BBU, 前传网的带宽需求非常高。以长期演进 (LTE) 为例, 对于典型的 20 MHz 的单天线单载波系统, 如使用通用公共无线电接口 (CPRI), 前传网的数据速率需求为 1 Gbit/s^[3]。相比于全集中的 C-RAN, 通过将部分基带功能放置在 RRU, 将其余基带功能放置在 BBU, 基带功能分割可以显著降低前传网的带宽需求^[4]。

收稿日期: 2018-08-20

网络出版日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金
(61571265, 91638204, 61621091)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0012-006

摘要: 通过改变基带功能在远端射频单元 (RRU) 的放置, 基带功能分割能实现前传带宽需求和 RRU 处理能耗之间的折中。首先调研了基带功能分割和可再生能源供电下无线传输功率控制的研究现状, 进而针对 RRU 使用可再生能源供电的场景, 联合优化离线的基带功能分割方案的选择和传输功率控制, 包括每种基带分割方案被选择的时长及相应的传输功率, 并提出了一种启发式的在线策略。数值结果表明: 相比于固定的基带功能分割方案, 灵活的基带功能分割能充分利用可再生能源并提高系统的吞吐量。

关键词: 能量收集; 基带功能分割; 功率控制; 前传网; 云接入网

Abstract: By changing the placement of the baseband function in the remote radio unit (RRU), the baseband function partition can achieve the tradeoff between the fronthaul bandwidth requirement and the RRU processing energy consumption. In this paper, the study on baseband functional split and power control in energy harvesting wireless communication systems is reviewed. Then a renewable energy powered RRU is studied, and the offline functional split scheme selection and power control are jointly optimized, specifically the transmit duration of each selected functional split scheme and the corresponding transmit power, and then a heuristic online policy is proposed. Numerical results show that flexible functional split can substantially improve the throughput compared with fixed functional split scheme, owing to better utilization of the renewable energy.

Key words: energy harvesting; baseband functional split; power control; fronthaul; cloud-radio access network

为提升网络容量, 保证网络覆盖, 未来运营商将部署更多的 RRU。通过收集环境中的可再生能源, RRU 可消耗更少或者不消耗电网能量。同时, 利用可再生能源, RRU 可以部署到电网无法覆盖的区域^[5]。由于能量到达的随机性, 保障通信的可靠性是能量收集 (EH) 无线系统中的一个具有挑战性的课题^[6]。根据能量收集的状态, 优化无线传输中的功率控制

能提高通信的可靠性。

最优的功率控制策略受基带处理功率的影响。另一方面由于 RRU 和 BBU 之间光纤部署的成本高、难度大, 可能会采用无线前传网。采用无线前传网会导致前传速率受限, 并带来更大的前传功率开销, 因而需要灵活的基带功能分割。此时, 基带功能分割方案不再是固定的, 多种可选方案都可能基于当前的能量状态而被

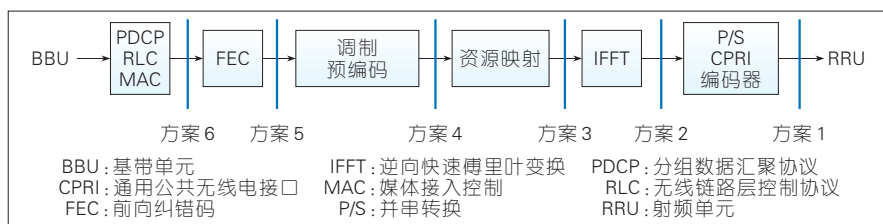
灵活地采用,因而RRU的处理功率也不再是固定的,此时需要联合优化基带功能分割和传输功率控制。

1 基带功能分割

基带功能分割旨在研究基带功能如何在RRU和BBU之间放置。基带功能包括串并行转换、快速傅里叶变换(FFT)/逆向快速傅里叶变换(IFFT)、资源映射/资源解映射、前向纠错码(FEC)、媒体接入控制(MAC)等功能。目前有多种可选的基带功能分割方案,图1给出了下行基带功能分割的几种可行的基带功能分割方案^{[4][7]},对于每个方案,竖线左边的基带功能放置在BBU,竖线右边的基带功能放置在RRU。文献[8]中作者分析了不同类型LTE基站,包括宏基站、微基站、微微基站等的能耗模型,分析了各个基带功能模块的处理复杂度,为量化分析基带功能分割的能耗提供依据。

根据文献[7]对2天线、20 MHz的LTE系统前传速率需求的分析,以及文献[8]中的计算模型,各基带功能分割方案的前传速率需求和RRU计算复杂度如表1所示。

从表1可以看出:将更多的基带功能放置在RRU,前传网的带宽需求会降低,但会增加RRU的复杂度(及对应的能耗)。因此,基带功能分割可以实现前传网带宽需求和RRU复杂度及处理能耗之间的折中。



▲图1 下行基带功能分割示意图

▼表1 基带功能分割方案前传带宽需求和计算复杂度

内容	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
前传带宽/(Mbit/s)	2 458	1 966	1 074	933	173	152
计算复杂度/(GOP/s)	240	240	380	420	440	470

通过软件定义基带功能,未来RRU和BBU可选择使用通用处理平台实现。通过配置RRU和BBU运行的基带模块,可以调整RRU和BBU之间的基带功能分割方案,进而能根据前传链路状态、RRU的可用能量、业务量和业务类型等灵活地选择基带功能分割方案^[9]。同时,通过前传链路汇聚亦可获得前传网传输资源的统计复用增益^[10]。

2 可再生能源供电下的无线传输功率控制

由于可再生能源到达的随机性,并且由于电池容量通常受限,优化能量收集无线系统中能量的使用显得十分重要。在没有处理能量开销时,即只考虑发射功率,对于给定的能量和信道衰落区间,如果传输速率关于传输功率的函数满足非负、严格凹且单调递增,最优的传输策略为能量在信道衰落区间内平均分配。然而在考虑处理能耗时,为减少处理能耗,最优的传输策略不再是在同一个信道衰落区间内功率平均分配,传输时间可能小于信道衰落区间的时长,传输呈突发性,对应于一种“注胶”功率分配策略^[11]。

对于有多个能量到达且具有信道衰落的场景,由于能量到达的随机性,可再生能源会在不同的信道衰落区间进行分配。文献[12]中,作者分析了能量收集中具有信道衰落的场

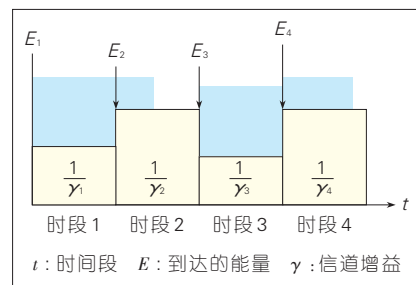
景,提出了一种“定向注水”的功率控制策略,即对能量的“注水”只能流向能量到达之后的时刻,流动的能量大小则受电池容量的限制。文献[13]针对具有处理能耗的能量收集传输链路,提出“定向注胶”的功率分配策略,其原理如图2所示。图中 γ_i 为信道衰落区间 i 内的信道增益,其中 E_i 为信道衰落区间起始阶段到达的可再生能源。能量可以从区间1流向区间2和区间3,不能从区间4流向区间3。由于处理能耗的存在,在区间2和区间4,传输具有突发性,即每个区间只有一部分时段在传输。由于电池容量的限制,从区间1和区间2流向区间3的能量受限,因而区间3的注胶水平低于区间1和区间2。

对于能量收集通信系统,如果采用固定的基带功能分割方案,系统地处理能耗是固定的,那么定向注胶的功率分配策略是最优的。对于灵活调整基带功能分割方案的场景,基带功能分割方案不再是固定的,多种可选方案都可能基于当前的能量状态而被灵活地采用,因而RRU的处理复杂度和功率也不再是固定的(如表1所示),定向注胶策略不再适用。此时需要综合考虑前传链路的信道特性和可再生能源的到达特性,优化基带功能分割方案的选择和功率控制策略。

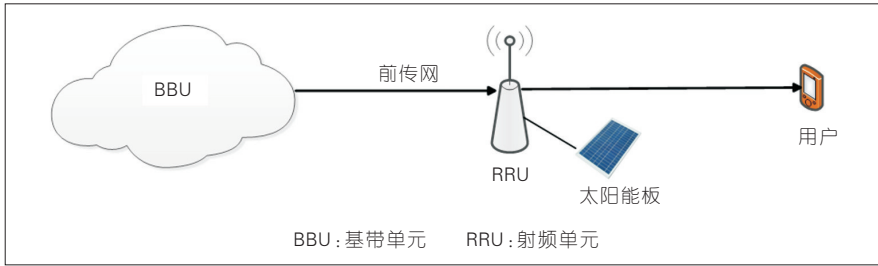
3 单RRU基带功能分割方案的选择和功率控制

3.1 离线最优策略

考虑如图3中C-RAN的下行传



▲图2 可再生能源“定向注胶”原理示意图



▲图3 可再生能源供电的下行云接入网系统示意图

输,其中RRU使用可再生能源供电。RRU可以从 N 种基带功能分割方案中选择一种进行配置。对于基带功能分割方案 j ,其基带处理功率记为 ε_j ,前传带宽需求记为 R_j 。目标为最大化吞吐量,因而假设BBU随时有数据需要传输给用户。本文中,我们将研究在满足平均前传速率 D 的约束下,如何选择基带功能分割方案和功率控制策略,包括采用每个基带功能分割的时间和相应的传输功率,以最大化传输吞吐量。

考虑 $0 \sim T$ 时间段内的吞吐量最大化问题。如图4所示,能量在时刻 t_1, t_2, \dots, t_M 到达,其中 M 是到达的能量的个数。在时刻 t_i ,到达的能量大小记为 E_i ,到达的能量存储到一个容量为 E_{\max} 的电池中。假设每次到达的能量满足 $E_i \leq E_{\max}$,即每次到达的能量不超过电池容量,否则到达的能量无法全部存储到电池中。根据能量的到达,将整个区间分为 M 个时段,第 i 个时段是指从 t_i 到 t_{i+1} 这个时间段,其长度为 $L_i = t_{i+1} - t_i$,特别地,记 $L_M = T - t_M$ 。

在每个时段内,RRU可以选择一个或者多个基带功能分割方案。在时段 i ,选择基带功能分割方案 j 的

时长为 θ_{ij} ,相应的传输功率为 p_{ij} , $\theta_{ij} = 0$ 意味着在时段 i 方案 j 没被选择。当没有方案被选择时,RRU没有数据传输,也没有能量消耗。由于各个方案被选择的时间没有重叠,在一个时段内,所有方案被选择的时长总和不能超过时段的长度,因而有 $\sum_{j=1}^N \theta_{ij} \leq L_i$ 。

假设信道增益为一个常数 γ ,可以理解为信道增益在功能分割时间尺度上的平均。根据香农定理,在时段 i 选择方案 j 传输给用户的数据量为 $\theta_{ij} \log(1 + \gamma p_{ij})$ bit/s,其消耗的能量为 $\theta_{ij}(p_{ij} + \varepsilon_j)$,其中 $\alpha_{ij} = \theta_{ij} p_{ij}$ 是无线传输消耗的能量, $\theta_{ij} \varepsilon_j$ 是基带处理消耗的能量。

由于RRU只能使用已经到达的能量,因而基带功能分割方案选择和功率控制需要满足以下能量使用的“因果性”约束:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} + \theta_{ij} \varepsilon_j) \leq \sum_{i=1}^m E_i \quad (1)$$

到达的能量要先存储在电池中才能使用,在任意时刻电池中存储的能量不能超过电池容量。对于时段 m ,在能量到达时刻 t_m 电池中的能量

最多,因而需要满足:

$$\sum_{i=1}^m E_i - \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} + \theta_{ij} \varepsilon_j) \leq E_{\max} \quad (2)$$

最大化吞吐量的相关问题可以建模为:

$$\begin{aligned} & \max_{\theta_{ij}, \alpha_{ij}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \theta_{ij} \log \left(1 + \gamma \frac{\alpha_{ij}}{\theta_{ij}} \right) \\ & s.t. \quad \frac{1}{T} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \theta_{ij} R_j \leq D \\ & \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} + \theta_{ij} \varepsilon_j) \leq \sum_{i=1}^m E_i \\ & \quad \sum_{i=1}^{m+1} E_i - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} + \theta_{ij} \varepsilon_j) \leq E_{\max} \\ & \quad \sum_{j=1}^N \theta_{ij} \leq L_i \\ & \quad \theta_{ij} \geq 0, \alpha_{ij} \geq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

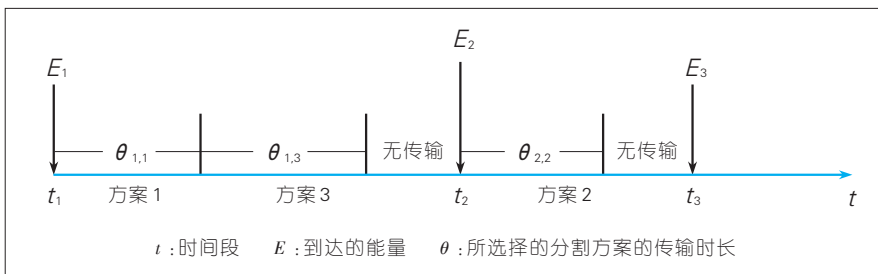
第1个约束是平均前传速率约束,第2个和第3个约束是可用能量和电池容量的约束,第4个约束是每个时段总传输时长的约束。该优化方程的目标函数是凸的,约束是线性的,因而是一个凸优化问题。使用拉格朗日乘法,可发现最优的基带功能分割方案选择和功率控制具有以下性质。

推论1:在每个时段,最多选择2个基带功能分割方案,且被选择方案的传输功率相同。

该推论的详细证明可以参考文献[14]。

3.2 单个能量到达的离线最优策略

根据推论1,每个时段内最多只有2个基带功能分割方案被选择。为了设计有效的在线算法,有必要探讨只有1个时段、2个可选基带功能分割方案的特殊场景。在获得只有2个可选基带功能分割方案时的功率控制策略后,可以将其结果拓展到可选基带功能分割方案数 $N > 2$ 的场景。计算选择任意2种或1种基带功能分割方案时的吞吐量,从中选择吞吐量最大时的组合,即可获得有 N 种可选基带功能分割方案时的功率控制策略。不失一般性,用 R_1 和 R_2



▲图4 能量到达和功率控制示意图

表示2种基带功能分割方案的前传带宽需求,用 ε_1 和 ε_2 表示相应的基带处理功率,且 $R_1 > R_2$, $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ 。为了便于表示,用 θ_1 和 p_1 表示基带功能分割方案1被采用的时长和相应的传输功率, θ_2 和 p_2 表示基带功能分割方案2被采用的时长和相应的传输功率。在时段内可用的能量为 E ,时段持续时间为 L 。

根据平均前传速率约束 D 与 R_1 和 R_2 之间的关系,下面将分3种情况进行讨论。这里只给出结论,详细的推导过程参见文献[14]。

3.2.1 情况1: $D \geq R_1$

当 $D \geq R_1$,平均前传速率约束一直能被满足。由于基带功能分割方案1具有更小的基带处理功率,因而只选择基带功能分割方案1。如果没有时段长度限制,最大化吞吐量的问题可以表示为:

$$\max_{p_1} \frac{E}{p_1 + \varepsilon_1} \log(1 + \gamma p_1), \quad (4)$$

最优的传输功率 v_1^* 可以通过解以下方程获得:

$$(1 + \gamma v_1^*) \log(1 + \gamma v_1^*) - \gamma v_1^* = \gamma \varepsilon_1. \quad (5)$$

如果 $E < (v_1^* + \varepsilon_1)L$,则最优的传输功率为 v_1^* ,相应的传输时间为 $\frac{E}{v_1^* + \varepsilon_1}$;如果 $E \geq (v_1^* + \varepsilon_1)L$,则传输时间为 L ,传输功率为 $\frac{E}{L} - \varepsilon_1$ 。

3.2.2 情况2: $R_2 < D < R_1$

如果 $E < \frac{DL(v_1^* + \varepsilon_1)}{R_1}$,能量是最主要的约束,因而只选择基带功能分割方案1,传输功率为 v_1^* ,此时最优的传输策略为:

$$\theta_1 = \frac{E}{v_1^* + \varepsilon_1}, p_1 = v_1^*, \theta_2 = 0, p_2 = 0. \quad (6)$$

在无传输时长约束时,如果2种分割方案都被选择,则最优传输功率

v_3^* 满足:

$$\gamma \left(v_3^* + \frac{R_1 \varepsilon_2 - R_2 \varepsilon_1}{R_1 - R_2} \right) - (1 + \gamma v_3^*) \log(1 + \gamma v_3^*) = 0. \quad (7)$$

$$\text{当 } \frac{(v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1} \leq E \leq L v_3^* +$$

$$\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)DL + (R_1 \varepsilon_2 - R_2 \varepsilon_1)L}{R_1 - R_2} \text{ 时, 最优的}$$

功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{(v_3^* + \varepsilon_2)DL - R_2 E}{R_1(v_3^* + \varepsilon_2) - R_2(v_3^* + \varepsilon_1)}, p_1 = v_3^*,$$

$$\theta_2 = \frac{R_1 E - (v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1(v_3^* + \varepsilon_2) - R_2(v_3^* + \varepsilon_1)}, p_2 = v_3^*. \quad (8)$$

$$\text{当 } \frac{(v_1^* + \varepsilon_1)DL}{R_1} \leq E < \frac{(v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1}$$

时,最优的功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{DL}{R_1}, p_1 = \frac{R_1 E}{DL} - \varepsilon_1, \theta_2 = 0. \quad (9)$$

$$\text{当 } E > L v_3^* + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)DL + (R_1 \varepsilon_2 - R_2 \varepsilon_1)L}{R_1 - R_2}$$

最优的功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{DL - R_2 L}{R_1 - R_2},$$

$$p_1 = \frac{E}{L} - \frac{D(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{R_1 - R_2} - \frac{R_1 \varepsilon_2 - R_2 \varepsilon_1}{R_1 - R_2},$$

$$\theta_2 = \frac{R_1 L - DL}{R_1 - R_2},$$

$$p_2 = \frac{E}{L} - \frac{D(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{R_1 - R_2} - \frac{R_1 \varepsilon_2 - R_2 \varepsilon_1}{R_1 - R_2}. \quad (10)$$

3.2.3 情况3: $D \leq R_2$

$$\text{当 } E < \frac{DL(v_1^* + \varepsilon_1)}{R_1}, \text{ 只有功能分割}$$

方案1被采用,功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{E}{v_1^* + \varepsilon_1}, p_1 = v_1^*, \theta_2 = 0, p_2 = 0. \quad (11)$$

$$\text{当 } \frac{(v_1^* + \varepsilon_1)DL}{R_1} \leq E < \frac{(v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1},$$

最优的功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{DL}{R_1}, p_1 = \frac{R_1 E}{DL} - \varepsilon_1, \theta_2 = 0. \quad (12)$$

$$\text{当 } \frac{(v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1} < E \leq \frac{(v_3^* + \varepsilon_2)DL}{R_2},$$

最优的功率控制策略为:

$$\theta_1 = \frac{(v_3^* + \varepsilon_2)DL - R_2 E}{R_1(v_3^* + \varepsilon_2) - R_2(v_3^* + \varepsilon_1)}, p_1 = v_3^*,$$

$$\theta_2 = \frac{R_1 E - (v_3^* + \varepsilon_1)DL}{R_1(v_3^* + \varepsilon_2) - R_2(v_3^* + \varepsilon_1)}, p_2 = v_3^*. \quad (13)$$

$$\text{当 } E > \frac{(v_3^* + \varepsilon_2)DL}{R_2}, \text{ 最优的功率控}$$

制策略为:

$$\theta_1 = 0, p_1 = 0, \theta_2 = \frac{DL}{R_2}, p_2 = \frac{ER_2}{DL} - \varepsilon_2. \quad (14)$$

3.3 启发式在线策略

基于对只有一个能量到达时的特殊情况的推导,可以制定一种启发式的在线策略。在能量到达的时刻 t_i ,根据电池中存储的能量 e_i 制定未来一段时间内的传输方案。由于能量到达的随机性,RRU无法预知下一个能量何时到达。设置该期望时段长度为 L ,最大化 t_i 到 $t_i + L$ 这段时间内的吞吐量,最优的传输策略则通过对只有一个能量到达时的特殊情况的推导获得。时段长度 L 需要根据能量到达的统计特性而制定,例如可以将 L 设置为能量到达间隔的期望。在制定传输策略后,RRU根据制定的策略传输,直到下一个能量到达,或者电池的能量耗尽。当有新的能量在 t_{i+1} 时刻到达时,电池中的能量更新为 e_{i+1} ,此时重新制定传输策略并进行传输。

3.4 数值结果

本节我们将通过数值仿真研究平均前传网带宽约束对吞吐量的影响。考虑一个下行的C-RAN系统,RRU使用能量收集技术供电,空口带宽为20 MHz。考虑3个可选的基带功能分割方案,相应的前传带宽需求和基带处理功率为 $R_1 = 980$ Mbit/s, $R_2 = 460$ Mbit/s, $R_3 = 86$ Mbit/s, $\varepsilon_1 = 1$ W, $\varepsilon_2 = 2.5$ W, $\varepsilon_3 = 4$ W。信道增益为

$\gamma=0.025$ W。

首先考虑离线的吞吐量最大化问题。以具有3个时段的情况为例,时段长度分别为[10, 16, 12] s,每个时段开始时到达的能量为[480, 360, 160] J,电池的容量为800 J。图5给出了吞吐量随平均前传速率变化的关系。从图中可以看出:相比固定一种基带功能分割方案,灵活的基带功能分割在不同的平均前传速率约束下都能获得最大的吞吐量。

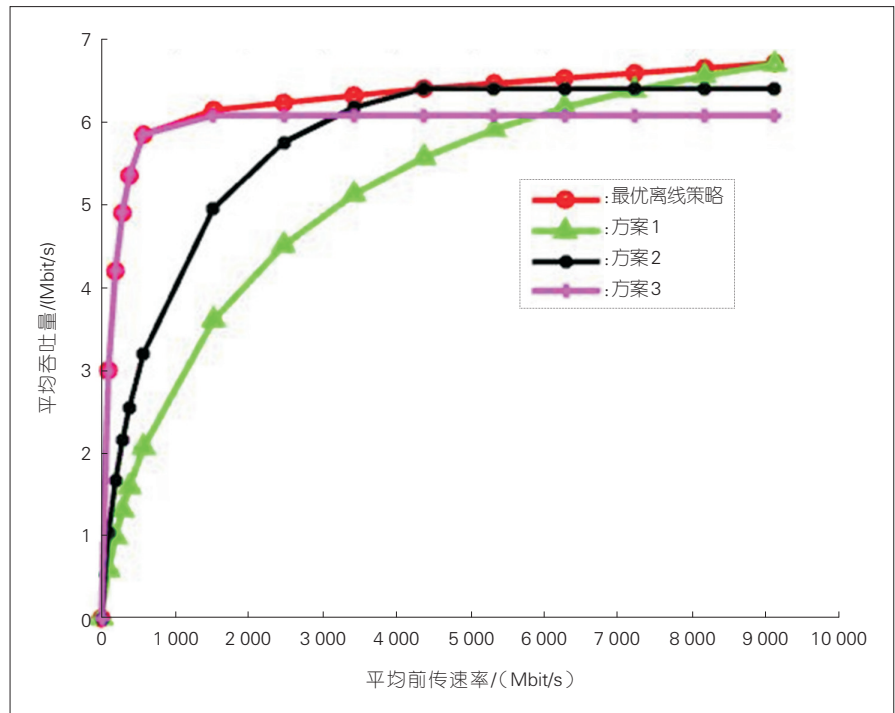
接着考虑在线吞吐量最大化问题。假设能量到达率为 $\lambda_e=1/20$ s,每次到达的能量在0~400 J之间均匀分布。考虑到0~200 s内的吞吐量最大化问题,图6给出了启发式在线策略的性能。从图中可以看出:启发式在线策略与最优的离线策略有着相近的性能。将启发式在线策略用于固定基带功能分割方案时的场景作为基准,可以发现:采用灵活的基带功能分割能带来可观的吞吐量增益。

4 结束语

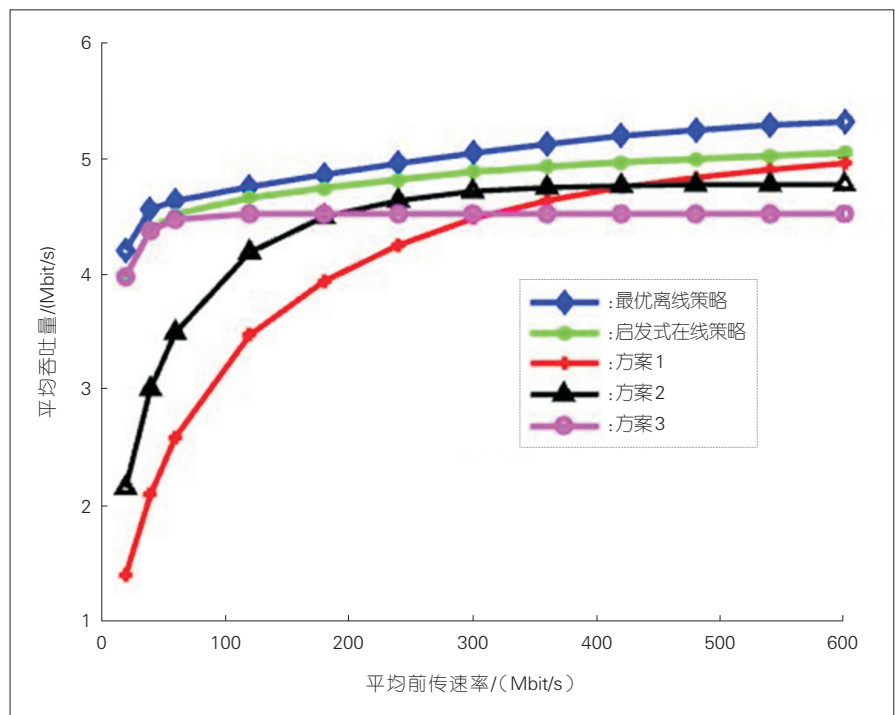
本文针对C-RAN系统中可再生能源供电的RRU,联合优化基带功能分割方案的选择和功率控制。离线吞吐量最大化问题可以建模为一个凸优化问题。通过拉格朗日乘子法发现了最优解的结构,即在每个时段内RRU最多选择2个基带功能分割方案,且每个基带功能分割方案时的传输功率相同。进一步推导了只有一个能量到达时的最优功率控制策略,并基于此提出了一种启发式在线策略。数值结果表明:相比于固定的基带功能分割方案,灵活的基带功能分割能显著提升系统吞吐量。

本工作尚存在一些待研究的问题,进而引出一些未来工作。

(1)最优在线策略。研究最优的在线策略可以进一步提高系统的吞吐量,并有助于进一步评估启发式的在线策略的性能。可以将在线问题建模为一个马尔科夫决策过程,获得



▲ 图5 最优离线策略吞吐量与平均前传速率之间的关系



▲ 图6 启发式在线策略吞吐量与平均前传速率之间的关系

最优的基带功能分割方案选择和功率控制。

(2)多RRU和多用户的场景。当系统中存在多个RRU和多个用户

时,不同RRU的能量到达特性以及前传链路状态可能不同,用户速率需求也存在差异。同时可进一步研究用户调度以及RRU之间的协作。

(3) 能量到达和信道衰落存在不同的时间尺度。在实际系统中, 能量到达率的变化往往比信道衰落的时间尺度更大。同时在信道衰落的尺度做基带功能分割的重配置亦会有较大开销。可以考虑在能量到达的时间尺度下选择基带功能分割方案, 在信道衰落的时间尺度下进行传输功率控制。

参考文献

- [1] China Mobile. C-RAN: The Road towards Green RAN White Paper[R]. 2013
- [2] CHIH-LIN I, HUANG J R, DUAN R, et al. Recent Progress on C-RAN Centralization and Cloudification [J]. IEEE Access, 2014, 2: 1030-1039. DOI:10.1109/access.2014.2351411
- [3] CPRI. CPRI Specification V6.0. Common Public Radio Interface (CPRI) [R]. Interface Specification, 2013
- [4] DOTSCHE U, DOLL M, MAYER H P, et al. Quantitative Analysis of Split Base Station Processing and Determination of Advantageous Architectures for LTE [J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 18(1): 105-128. DOI:10.1002/bltj.21595
- [5] GONG J, ZHOU S, NJU Z S. Optimal Power Allocation for Energy Harvesting and Power Grid Coexisting Wireless Communication Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(7): 3040-3049. DOI:10.1109/tcomm.2013.05301313.120705
- [6] TUTUNCUOGLU K, YENER A. Optimum Transmission Policies for Battery Limited Energy Harvesting Nodes [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1180-1189. DOI:10.1109/twc.2012.012412.110805
- [7] Small Cell Forum. Small Cell Virtualization: Functional Splits and Use Cases[R].2016
- [8] DESSET C, DEBAILLIE B, GIANNINI V, et al. Flexible Power Modeling of LTE Base Stations[C]//2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). USA: IEEE, 2012: 2858-2862. DOI:10.1109/WCNC.2012.6214289
- [9] LIU J C, XU S G, ZHOU S, et al. Redesigning Fronthaul for Next-Generation Networks: Beyond Baseband Samples and Point-to-Point Links [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(5): 90-97. DOI: 10.1109/mwc.2015.7306542
- [10] WANG L M, ZHOU S. On the Fronthaul Statistical Multiplexing Gain [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(5): 1099-1102. DOI:10.1109/lcomm.2017.2653120
- [11] YOUSSEF-MASSAAD P, ZHENG L Z, MEDARD M. Bursty Transmission and Glue Pouring: On Wireless Channels with Overhead Costs [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 5188-5194. DOI:10.1109/twc.2008.070939
- [12] OZEL O, TUTUNCUOGLU K, YANG J, et al. Transmission with Energy Harvesting Nodes in Fading Wireless Channels: Optimal Policies [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1732-1743. DOI:10.1109/jsac.2011.110921
- [13] ORHAN O, GUNDUZ D, ERKIP E. Energy Harvesting Broadband Communication Systems with Processing Energy Cost [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(11): 6095-6107. DOI:10.1109/twc.2014.2328600
- [14] WANG L M, ZHOU S. Flexible Functional Split in C-RAN with Renewable Energy Powered Remote Radio Units[C]//2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). USA: IEEE, 2018: 1-6. DOI: 10.1109/ICCWork.2018.8403571

作者简介



王刘猛, 清华大学电子系在读博士研究生; 主要研究方向为绿色通信与网络、云接入网等。



周盛, 清华大学电子系副教授; 主要研究方向为绿色通信与网络、移动边缘计算、车联网等; 先后主持2项国家自然科学基金项目, 并参加多项国家自然科学基金和科技部项目; 获得2017年IEEE通信学会亚太区杰出青年学者奖; 已发表论文140余篇。