

# 带有混合能量供电的 TWDM-PON 与 C-RAN 联合架构资源分配机制

王汝言<sup>1,2</sup>, 徐宁宁<sup>1,2</sup>

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆高校市级光通信与网络重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 针对现有虚拟化云无线接入网络资源利用率低、能耗高、用户服务质量无法得到保证等问题, 提出一种带有混合能量供电的能耗感知虚拟化资源分配机制。根据不同网络设备的能量来源和能量消耗情况, 建立能量到达模型和能量消耗模型; 进而, 在保障用户服务质量的前提下, 考虑比例公平和能耗优化, 利用异步更新的分布式算法对不同类型虚拟云无线接入网和用户虚拟基站分配资源和能量, 从而有效提高网络能量效率。仿真结果表明, 所提资源分配机制能够降低能耗, 同时有效地减小了时延, 提高了吞吐量。

**关键词:** 云无线接入网; 网络虚拟化; 时波复用无源光网络; 能量收集; 资源共享分配

**中图分类号:** TP393.04

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2018156

## Resource allocation mechanism in the TWDM-PON and C-RAN joint architecture with hybrid energy supply

WANG Ruyan<sup>1,2</sup>, XU Ningning<sup>1,2</sup>

1.School of Telecommunication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2.Optical Communication and Network Key Laboratory of Chongqing, Chongqing, 400065, China

**Abstract:** Aiming at the problems of low resource utilization rate, high energy consumption and poor user service quality in the existing virtualized Cloud Radio Access Network, an energy-aware virtualized resource allocation mechanism with hybrid energy supply was proposed. According to the energy sources and energy consumption of different network devices, energy arrival and energy consumption models were established. Furthermore, under the premise of guaranteeing the quality of user services, considering proportional fairness and energy consumption optimization, distributed algorithms based on asynchronous update were used to allocate resources and harvested energy for different types of virtual cloud radio access networks and user virtual base stations to effectively improve the energy efficiency of network. The simulation results show that the proposed resource allocation mechanism can reduce energy consumption while effectively reducing the latency and improving the throughput.

**Key words:** cloud radio access network, network virtualization, time and wavelength division multiplexing-passive optical network, energy harvesting, resource sharing allocation

### 1 引言

随着用户对标清视频及高清视频、在线游戏、电话视频等应用需求的不断增加, 无线接入网的业务负载急剧上升, 在第五代移动网络中引入云无线

接入网 (C-RAN, cloud radio access network) 以解决能耗问题<sup>[1-3]</sup>。C-RAN 将传统基站配置分解成集中式基带处理单元 (BBU, baseband processing unit) 池和分布式无线射频头端 (RRH, remote radio head) 2 个部分<sup>[4]</sup>, 并通过低成本、低时延、低能耗且具

收稿日期: 2018-05-02; 修回日期: 2018-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61371097, No.61771082); 重庆高校创新团队计划基金资助项目 (No.CXTDX201601020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61371097, No.61771082), Chongqing University Innovation Team Construction Project Funded Projects (No.CXTDX201601020)

有丰富带宽的时波分复用无源光网络 (TWDM-PON, time and wavelength division multiplexing passive optical network) 连接 BBU 池和 RRH<sup>[5-6]</sup>。此种方式不但可以降低系统升级和维护的资本和运营支出, 还可以提高频谱利用率。然而, C-RAN 中大规模部署的 RRH 消耗较多能量, 导致了碳足迹的激增<sup>[7]</sup>。为了解决这个问题, 将能量收集(EH, energy harvesting)能力并入 RRH 中, 使 RRH 不但可以由传统电力网直接供电, 而且还能够从环境能源(例如太阳能、风能和射频信号<sup>[8-10]</sup>)中收集绿色可再生能源, 从而保证服务质量。

尽管能源效率更高, 但由混合能源供电的 C-RAN 仍然面临着一些新的问题: 其仅实现了 BBU 资源的集中化处理, 对前传波长资源和无线资源无法实现共享; 各服务提供商(SP, service provider)独立运行 C-RAN, 造成资源利用率不高; 可扩展且灵活的动态资源分配方式由于频繁变化难以部署在基础设施网络上<sup>[11]</sup>。网络虚拟化(NV, network virtualization)技术通过对计算资源、网络资源、频谱资源、基础设施等进行抽象, 能够实现不同 SP 之间的资源共享, 此种架构不但可以节省成本、提高资源利用率、降低能耗、易于资源部署, 还可以增强网络扩展性和灵活性<sup>[12]</sup>。因此, 考虑充分结合这 2 种技术的优势, 提出了将虚拟化技术和带有能量收集 C-RAN 相联合的架构, 并在架构上依照业务流量变化联合配置虚拟无线、光网络、BBU 计算资源和 RRH 能量, 它不仅可以提高系统吞吐量和资源利用率, 还可以降低能耗。进而, 如何在联合架构上合理地分配虚拟资源和能量使能耗最小化, 成为国内外研究人员的关注重点。

针对以上问题, 文献[13-14]将网络虚拟化与 C-RAN 架构进行联合, 实现不同移动网络运营商之间的资源共享, 可以有效提高吞吐量并降低端到端时延和总能耗, 然而, 所提出的方法并没有考虑 BBU 资源的共享调度, 也没有考虑能量收集。在实际场景中, 通过收集可再生能源, 可以有效地减少传统电网所供给能量的消耗。因此, 利用可再生能源收集的优势, 文献[15]提出了一种新的能量到达模型, 并利用量子行为粒子群算法联合分配子载波和功率, 在满足能耗限制和总数据速率要求的同时最大限度提高能源效率。但所提出方法仅限于 RRH 无线资源分配, 并没有考虑波长和计算资源的优化配置。文献[16-17]将可持续资源分配问题分解为能

量收集、数据调度以及子载波和功率分配等 3 个子问题, 并在确保数据缓冲器稳定性和能量缓冲器可持续性的基础上获得最大聚集用户效用, 但没有考虑不同 SP 之间的能量共享。文献[18]根据能源供需匹配策略, 在具有能量收集的异构无线接入网络中提出能源经济模型实现能源双向交换。此外, 根据能量存储和业务负载状态提供 D2D 辅助用户关联, 从而实现能源成本与用户关联比率之间的权衡。然而上述文献主要通过调度带有能量收集的部分虚拟化 C-RAN 资源去降低能耗, 并没有考虑全局资源分配和能量共享的有效结合, 因此, 无法最小化能耗。

针对上述问题, 本文提出了一种新的带有混合能量供电的能耗感知虚拟化 C-RAN 资源分配机制。首先, 根据虚拟化 C-RAN 中各网络设备的能量来源和能量消耗情况, 建立能量到达和能耗模型; 接着, 利用异步更新的能耗感知分布式算法 (AU-EADA, energy-aware distributed algorithm based on asynchronous updating), 依据负载流量为不同类型虚拟化 V-CRAN (virtualization C-RAN) 公平地分配总能量和资源, 再针对用户的不同服务请求, 在相应 V-CRAN 中基于能耗和时延最小的原则为之分配计算和波长资源, 并基于能耗最小化为其选择接入模式和关联 RRH, 从而完成 C-RAN 网络中的整体资源优化配置, 并有效地提高网络能量效率。

## 2 CRAN-NV 联合架构

在 C-RAN 与网络虚拟化(CRAN-NV, cloud radio access network and network virtualization)的联合架构中, 使用基于 TWDM-PON 和特殊模式接入的 C-RAN 作为物理网络。在物理网络中, 小区用户首先依据信道状态信息选择直接或者间接模式将射频信号发送给 RRH。当处于间接模式时, 用户通过中继接入点用户(RAP-UE, relay access point users)接入 RRH, 其中 RAP-UE 与 RRH 之间采用蜂窝移动通信方式, 而 RAP-UE 与 UE 之间采用无线保真(Wi-Fi, wireless fidelity)通信方式。特殊地, 假设 RRH 和 RAP-UE 既可以进行能量收集, 也可以从电网购买能量, 因此每个 RRH 和 RAP-UE 都有一个 EH 模块, 且配备有可充电电池和数据缓存区。接着, RRH 将接收到的信号转发给与其直接相连的光网络单元(ONU, optical network unit), 而 ONU 使用

通用公共无线电接口将数字基带信号发送到光线路终端(OLT, optical line terminal)处,并由代表不同波长的线卡(LC, line card)服务。BBU 池和 OLT 位于中心局(CO, central office),在 BBU 池中,每个 BBU 与一个 LC 相关联,因此,BBU 和 LC 的集合有相同的基数。以太网交换机位于 BBU 池之后,且每个端口都连接到 BBU,可以将流量从一个 BBU 重定向到其他 BBU。显然,重定向的源 BBU 和目的 BBU 之间的数据迁移会持续一段时间,因此,使用直通交换机<sup>[19]</sup>快速转发数据分组而不存储整个数据分组。

通过虚拟化技术将底层物理网络资源进行虚拟化。如图 1 所示,总集中控制器通过调度资源分配策略,组成具有不同特点的 V-CRAN。传统 SP 固定租用需求最大化时的资源并独自占用,这使业务流量少的 SP 资源浪费,业务流量过载的 SP 得不到满足,造成总体资源利用率低下。因此,本文考虑不同的 SP 组成不同 V-CRAN,并依照负载情况公平地分配 C-RAN 资源。显然,在 RRH 分配资源时,不仅要考虑无线信道资源和数据缓冲区资源,还要考虑可再生电能和传统电能的公平分配。为了减轻一级集中控制器的处理压力,采用分布式的方式为每个 V-CRAN 配置一个二级集中控制器,并为 V-CRAN 中的每个 RRH 配置一个三级控制器,其中二级控制器实时获知当前服务类型的信道状态信息和资源分配情况,执行资源共享策略完成 BBU 计算资源和 TWDM-PON 波长资源的合理分配;三

级控制器根据用户和 RRH 的信息,执行能量共享策略和用户关联策略完成无线资源的分配。最后,二级和三级控制器将资源分配信息返回至一级总集中控制器;进而,总控制器将配置信息下发到底层物理网络,从而为用户合理地分配物理资源。

### 3 能量到达模型

在 C-RAN 网络中,由于 RRH 大规模部署,造成能量消耗严重,所以考虑 RRH 具备 EH 功能。同时,RAP-UE 由于中继通信产生额外能耗,因此也考虑为其配备 EH 模块。那么,RRH 和 RAP-UE 均可由可再生能源或传统电力能量供电。本节根据 RRH 和 RAP-UE 的不同能量来源,分别对其能量到达模型进行描述。

#### 3.1 RRH 能量到达模型

如前所述,RRH 不但可以从环境能源收集能量,还可以从电网或其他 RRH 购买能量。本文将  $e_n(t)$  定义为 RRH<sub>n</sub> 在时隙  $t$  收集的能量,能量来自于太阳能、风能。则每个时隙的 EH 约束为

$$e_n(t) = e_n^{\text{sun}}(t) + e_n^{\text{wind}}(t) \leq \psi_n(t) \quad (1)$$

其中,  $\psi_n(t)$  定义为在时隙  $t$  可以被 RRH<sub>n</sub> 收集到的环境能量,  $e_n^{\text{sun}}(t)$  和  $e_n^{\text{wind}}(t)$  分别表示时隙  $t$  时 RRH<sub>n</sub> 所收集的来自太阳和风的可再生能源。由于 EH 过程受环境因素变化,所以  $\psi_n(t)$  的值随时间动态改变,且最高界限为  $\psi_{\text{max}}$ ,即  $\psi_n(t) \leq \psi_{\text{max}}, \forall n \in N$ 。接着,将  $g_n(t)$  定义为 RRH<sub>n</sub> 在时隙  $t$  所购买的传统电能;

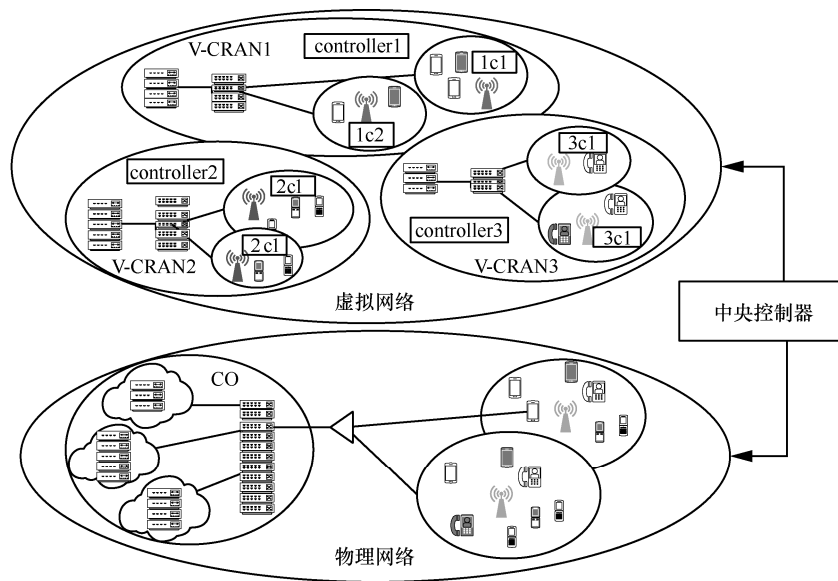


图 1 支持 TWDM-PON 和特殊模式接入的 C-RAN 与 NV 联合架构

将  $E_n^{\text{RRH}}(t)$  定义为 RRH<sub>*n*</sub> 在时隙 *t* 执行能量共享策略得到的能量，包括可再生电能和传统电能；将  $P_{\text{RRH}}^{n,k,m,\text{tras}}(t)$  定义为 RRH *n* 通过信道 *k* 到用户 *m* 的传输功率。最后，将  $E_n(t)$  定义为在 *t* 时隙 RRH<sub>*n*</sub> 的可用能量。由以上定义可知，RRH<sub>*n*</sub> 的动态能量到达模型为

$$E_n(t+1) = E_n(t) + g_n(t) + e_n(t) + E_n^{\text{RRH}}(t) - \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} u e_{n,m}^k(t) (1 + \|M'_n\|) P_{\text{RRH}}^{n,k,m,\text{tras}}(t) - r r h_n(t) P_{\text{RRH}} \quad (2)$$

其中， $P_{\text{RRH}}$  是激活 RRH 所消耗的能量； $r r h_n(t)$  是二进制变量，当在 *t* 时隙 RRH<sub>*n*</sub> 是激活状态为 1； $M$  和  $K$  分别是所有用户集合和无线信道集合； $\|M'_n\|$  表示第 *n* 个 RRH 所属小区中 RAP-UE 集合的元素数目； $u e_{n,m}^k(t)$  也是一个二进制变量，当在时隙 *t* 时 RRH<sub>*n*</sub> 通过信道 *k* 服务用户 *m*，则为 1。显然，可用能量和输入能量的总和不能大于 RRH 的可充电电池容量，即满足式(3)所示的约束条件。

$$E_n(t) + g_n(t) + e_n(t) + E_n^{\text{RRH}}(t) \leq \Pi_n, \forall n \in N \quad (3)$$

其中， $\Pi_n$  是 RRH<sub>*n*</sub> 电池容量， $N$  是 RRH 集合。

### 3.2 RAP-UE 能量到达模型

如前所述，RAP-UE 由混合能量供电，本文将  $e_{m'}(t)$  定义为 RAP-UE<sub>*m'*</sub> 在时隙 *t* 所收集的能量，能量来自太阳能、风能以及 RRH 广播时的 RF 信号。当 RRH 在时隙 *t* 广播信息时，所属小区内的目标 UE 接收 RRH 广播的信号，非目标 RAP-UE 接收相同 RRH 广播的能量。因此，RAP-UE<sub>*m'*</sub> 在时隙 *t* 的能量收集表示为

$$e_{m'}(t) = e_{m'}^{\text{sun}}(t) + e_{m'}^{\text{wind}}(t) + \eta \sum_{n \in N} (\text{con}_{m'}^n \cdot \sum_{k \in K} (1 - u e_{n,m'}^k(t)) \sum_{m \in M_n - m'} \sum_{k_1 \in K} u e_{n,m}^{k_1}(t) P_{\text{RRH}}^{n,k_1,m,\text{tras}}(t)) \quad (4)$$

其中， $\eta$  是收集 RRH 广播能量时的能量效率； $\text{con}_{m'}^n$  是布尔变量，若 RAP-UE<sub>*m'*</sub> 在第 *n* 个 RRH 所在小区中时为 1； $M_n$  表示第 *n* 个 RRH 所在小区中的 UE 集合。

与 RRH 能量到达模型类似，将  $E_{m'}(t)$  定义为在时隙 *t* 时 RAP-UE<sub>*m'*</sub> 的可用能量。由于 UE 的激活能耗不具有可比性，本文计算能耗时将之忽略。那么，RAP-UE<sub>*m'*</sub> 的动态能量到达模型为

$$E_{m'}(t+1) = E_{m'}(t) + g_{m'}(t) + e_{m'}(t) - \sum_{m'' \in M''} \sum_{k \in K} \delta_{m'',m'}^k(t) P_{\text{UE2}}^{m'',k,m'',\text{tras}}(t) \quad (5)$$

其中， $g_{m'}(t)$  表示 RAP-UE<sub>*m'*</sub> 在时隙 *t* 所购买的传统电能， $M''$  是普通 UE 集合， $P_{\text{UE2}}^{m'',k,m'',\text{tras}}(t)$  表示在时隙 *t* 时 RAP-UE<sub>*m'*</sub> 通过信道 *k* 到普通用户 *m''* 的传输功率， $\delta_{m'',m'}^k(t)$  是二进制变量，当 RAP-UE<sub>*m'*</sub> 在时隙 *t* 通过信道 *k* 传输信息到用户 *m''* 时为 1。同上，可用能量和输入能量的总和不能大于 RAP-UE 的可充电电池容量，即

$$E_{m'}(t) + g_{m'}(t) + e_{m'}(t) \leq \Pi_{m'}, \forall m' \in M' \quad (6)$$

其中， $\Pi_{m'}$  是 RAP-UE<sub>*m'*</sub> 的可充电电池容量， $M'$  是 RAP-UE 集合。

## 4 电网能耗模型

CRAN-NV 架构的底层物理网络能耗主要来自基础冷却设施、CO 网络设备和小区网络设备，其中基础冷却设施和 CO 网络设备均仅由传统电力网提供能量。基础冷却设施虽然不执行网络功能，但对于维护 BBU 正常运行是必不可少的，其能量消耗为  $P_{\text{cooling,pool}}$ 。CO 中的有源网络设备包括内部以太网交换机、BBU 和 LC。交换机的能量消耗  $P_{\text{SWIT}}$  分为基础运行能耗  $P_{\text{base}}$  和业务相关能耗  $P_{\text{port\_total}}$  2 个部分，其中业务相关能耗随交换机激活的端口数量  $n_{\text{port}}$  的变化而变化，所消耗的能量为端口能耗  $P_{\text{port}}$  和交换机激活端口数目  $n_{\text{port}}$  之积。对于 BBU 能耗来说，本文不考虑处理器动态电压和频率缩放<sup>[20]</sup>，因此 BBU 仅在激活时本消耗能量消耗恒定的能量记为  $P_{\text{BBU}}$ 。类似地，有源 LC 也消耗恒定的能量  $P_{\text{LC}}$ 。小区的活动网络设备包括 ONU、RRH 和 UE。其中，ONU 仅考虑激活时所消耗的能量  $P_{\text{ONU}}$ ，而 RRH 不仅要考虑激活能耗  $P_{\text{RRH}}$ ，还要考虑发送信号所产生的能耗  $P_{\text{RRH}}^{\text{tras}}$ 。又因为 C-RAN 中 RRH 的大规模部署使能耗大幅度增加，本文考虑 RRH 由混合能源供电，所以 RRH 能耗包含可再生能耗  $P_{\text{RRH\_EH}}$  和传统能耗  $P_{\text{RRH\_G}}$  2 个部分，且这 2 部分能耗均随 RRH 的不同以及时间变化而动态改变。UE 由 RAP-UE 和普通 UE 组成，因为普通用户能耗是所有接入网架构中都有的，并不具有可比性，所以本文只考虑 RAP-UE 额外产生的发送能耗  $P_{\text{UE2}}^{\text{tras}}$ 。由于 RAP-UE 具有能量收集功能，所以其发送能耗包括可再生能耗  $P_{\text{UE2\_EH}}$  和传统能耗  $P_{\text{UE2\_G}}$ 。由上可知，仅有 RRH 和 RAP-UE 存在可再生能耗，其他设备均为传统能耗。因此，在 *t* 时隙 CRAN-NV 架构总能耗为

$$\begin{aligned}
 P_{C\_VF}(t) &= P_{\text{cooling,pool}} + sw(t)(P_{\text{base}} + P_{\text{port}}n_{\text{port}}(t)) + \\
 &\sum_{s=1}^{\|S\|} \sum_{w=1}^{\|W_s\|} (P_{\text{LC}}lc_w^s(t) + P_{\text{BBU}}up_w^s(t)) + \sum_{n=1}^{\|N\|} rrr_h_n(t) \cdot \\
 &(P_{\text{ONU}} + P_{\text{RRH\_G}}^{\text{act}}(t)) + \sum_{s=1}^{\|S\|} \sum_{n=1}^{\|N_s\|} \sum_{m=1}^{\|M_s\|} \sum_{k=1}^{\|K_s\|} ((1 - ue_m^{s,n,k}(t)) \cdot \\
 &\sum_{m'}^{\|M'_s\|} \sum_{k_1=1}^{\|K_{s_1}\|} \delta_{s,m,k_1}^{m'}(t) P_{\text{UE2\_G}}^{s,m,k_1,m',\text{tras}}(t) + ue_m^{s,n,k}(t) \cdot \\
 &(1 + \|M'_n\|) P_{\text{RRH\_G}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t)) \quad (7)
 \end{aligned}$$

其中，等式右边第一项是基础冷却设施能耗；第二项是交换机能耗， $n_{\text{port}}(t) = \sum_{s \in S} \sum_{w \in W_s} pt_w^s(t)$  是时隙  $t$  激

活的交换机端口数目， $pt_w^s(t)$  是二进制变量，表示若当时隙  $t$  时交换机接口  $w$  是激活状态为 1， $sw(t)$  是布尔变量，当时隙  $t$  交换机是激活状态时为 1；第三项是激活 LC 和 BBU 的能耗， $\|S\|$  是服务类型数目， $\|W_s\|$  表示第  $s$  个 V-CRAN 中 BBU 集合的数目， $lc_w^s(t)$  和  $up_w^s(t)$  分别是 2 个布尔变量，表示时隙  $t$  时第  $s$  个 V-CRAN 中的第  $w$  个 LC 和 BBU 是否被激活，值得注意的是，当 BBU 被激活时 LC 不一定被激活，而 LC 被激活时相连接的 BBU 一定被激活；第四项是激活 ONU 和 RRH 所消耗的能量， $\|N\|$  表示所有 RRH 的数目， $P_{\text{RRH\_G}}^{\text{act}}(t)$  表示在  $t$  时隙激活第  $n$  个 RRH 的传统能耗， $rrh_n(t)$  是二进制变量，当时隙  $t$  时第  $n$  个 RRH 是激活状态时为 1；第五项是 RRH 和 RAP-UE 发送信号所产生的能耗， $\|N_s\|$ 、 $\|M_s\|$ 、 $\|M'_s\|$  和  $\|K_s\|$  表示第  $s$  个 V-CRAN 中 RRH、所有用户、RAP-UE 及无线信道的数目， $P_{\text{RRH\_G}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t)$  表示在时隙  $t$  时第  $s$  个 V-CRAN 中的第  $n$  个 RRH 占用信道  $k$  发送信号到用户  $m$  的传统能耗， $P_{\text{UE2\_G}}^{s,m,k_1,m',\text{tras}}(t)$  表示在时隙  $t$  时第  $s$  个 V-CRAN 中的 RAP-UE $_m$  占用信道  $k_1$  发送信号到普通用户  $m$  的传统能耗， $ue_m^{s,n,k}(t)$  和  $\delta_{s,m,k_1}^{m'}$  是布尔变量，当时隙  $t$  时第  $s$  个 V-CRAN 中的第  $n$  个 RRH 占用信道  $k$  发送信号到用户  $m$  时  $ue_m^{s,n,k}(t)$  为 1，当在  $t$  时隙第  $s$  个 V-CRAN 中的用户  $m$  通过信道  $k_1$  与 RAP-UE  $m'$  通信时  $\delta_{s,m,k_1}^{m'}$  为 1。

为了有效表述 RRH 和 RAP-UE 总能耗中传统能耗所占的比例，本文定义 3 个变量，即在时隙  $t$  第  $n$  个 RRH 激活时的能耗占比变量  $\rho_{\text{RRH\_G}}^{\text{act}}(t)$ ，第  $s$  个 V-CRAN 中的第  $n$  个 RRH 在时隙  $t$  占用信道  $k$

发送信号到用户  $m$  的能耗占比变量  $\rho_{\text{RRH\_G}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t)$ ，以及在  $t$  时隙第  $s$  个 V-CRAN 中的 RAP-UE $_m$  占用信道  $k_1$  发送信号到用户  $m$  的能耗占比变量  $\rho_{\text{UE2\_G}}^{s,m,k_1,m',\text{tras}}(t)$ 。其具体形式分别为

$$\rho_{\text{RRH\_G}}^{\text{act}}(t) = \frac{P_{\text{RRH\_G}}^{\text{act}}(t)}{P_{\text{RRH}}} \quad (8)$$

$$\rho_{\text{RRH\_G}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t) = \frac{P_{\text{RRH\_G}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t)}{P_{\text{RRH}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t)} \quad (9)$$

$$\rho_{\text{UE2\_G}}^{s,m,k_1,m',\text{tras}}(t) = \frac{P_{\text{UE2\_G}}^{s,m,k_1,m',\text{tras}}(t)}{P_{\text{UE2}}^{s,m,k_1,m',\text{tras}}(t)} \quad (10)$$

因此，基于以上新定义的 3 个变量，式(7)可以改写为

$$\begin{aligned}
 P_{C\_VF}(t) &= P_{\text{cooling,pool}} + sw(t)(P_{\text{base}} + P_{\text{port}}n_{\text{port}}(t)) + \\
 &\sum_{s=1}^{\|S\|} \sum_{w=1}^{\|W_s\|} (P_{\text{LC}}lc_w^s(t) + P_{\text{BBU}}up_w^s(t)) + \sum_{n=1}^{\|N\|} rrr_h_n(t) \cdot \\
 &(P_{\text{ONU}} + \rho_{\text{RRH\_G}}^{\text{act}}(t)P_{\text{RRH}}) + \sum_{s=1}^{\|S\|} \sum_{n=1}^{\|N_s\|} \sum_{m=1}^{\|M_s\|} \sum_{k=1}^{\|K_s\|} ((1 - ue_m^{s,n,k}(t)) \cdot \\
 &\sum_{m'}^{\|M'_s\|} \sum_{k_1=1}^{\|K_{s_1}\|} \delta_{s,m,k_1}^{m'}(t) \rho_{\text{UE2\_G}}^{s,m,k_1,m',\text{tras}}(t) P_{\text{UE2}}^{s,m,k_1,m',\text{tras}}(t) + \\
 &ue_m^{s,n,k}(t)(1 + \|M'_n\|) \rho_{\text{RRH\_G}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t) P_{\text{RRH}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t)) \quad (11)
 \end{aligned}$$

本文的目标是在多个约束条件下使能耗最小化，由 C-RAN 网络总电网能耗式(11)可知，能耗主要由 3 个部分组成，即 CO 网络设备计算能耗、RRH 通信设备能耗、RRH 和 RAP-UE 通信能耗。针对这种在各种相互关联的多变量约束条件下解决线性目标函数最优的问题，通常采用线性规划法<sup>[21]</sup>去解决，但此种算法具有较高复杂性，一旦网络规模稍大，将造成严重的时延损耗甚至计算不可行。因此，本文提出基于异步更新的分布式机制，将传统的一级集中控制器改进成三级控制器的形式，然后将资源分配问题分割成三个子问题并分配给相应的控制器解决，其中，一级集中控制器基于负载流量对各 V-CRAN 公平地分配虚拟资源；三级控制器依据一级集中控制器返回的其他 RRH 以及用户的信息，对所属用户的接入方式进行合理选择，从而扩大网络吞吐量。在三控制器中，三级控制器基于供需关系调度 RRH 间的储存能量以实现共享，从而降低小区端设备的能耗；二级控制器依据定时收集的信道信息和各用户的资源分配情况，以处理时延和设

备运行能耗最小为目标, 为各用户的各类服务请求动态分配 BBU 计算资源和 TWDM-PON 波长资源。

## 5 基于异步更新的分布式资源分配机制

在实际生活中, 某一时间段内的小区业务流量是动态变化且未知的, 因此需考虑动态资源分配情况。当一个用户请求到达时, 一级控制器先判断是否对 V-CRAN 重新配置虚拟资源, 然后根据业务类型将请求分配给相应二级控制器和三级控制器进行资源分配。三级集中控制器接收到请求信息后, 先依据信道状态信息和同一 V-CRAN 内 RRH 与 RAP-UE 的剩余能量及资源信息为其选择 RAP-UE 和关联 RRH, 然后判断关联 RRH 的能量是否足以支持传输信息, 不足则调用能量共享策略从其他 RRH 处借调能量, 其借调的能量通过两个 RRH 之间的传统电力网进行传输; 接着, 二级控制器根据三级控制器返回的关联信息判断新用户请求关联 RRH 的 PHY-cell 或者新建一个 PHY-cell, 最后基于能耗和 BBU 处理时延最少选择合适的 UP 进行基带处理, 从而完成动态服务请求的整体资源分配。

### 5.1 比例公平资源配置机制

如前所述, 在 CRAN-NV 架构中, 总集中控制器通过调度资源分配策略, 组成具有不同特点的 V-CRAN。然而, 传统 SP 是按租用需求最大化时所需资源进行分配, 且分配后的资源固定且专属, 这导致业务流量少的 SP 资源浪费, 业务流量过载的 SP 得不到满足, 造成总体资源利用率低下。因此, 本文考虑不同的 SP 组成不同 V-CRAN, 即对虚拟 C-RAN 进行区分业务服务, 并将其划分为  $S$  个 V-CRAN, 然后为了适应负载流量的动态变化, 按照各种业务的负载流量公平地为 V-CRAN 分配虚拟资源。这样, 不仅可以保证各种业务所分配资源的公平性, 还减少了资源分配时的资源选择区间, 从而降低算法复杂度和处理时延。

所需分配的虚拟资源包括 BBU 计算资源、TWDM-PON 波长资源、RRH 可用能量资源、RAP-UE 可用能量资源和 RRH 无线信道资源。对于虚拟 BBU 计算资源来说, 不同 V-CRAN 所分配的计算资源量需要与其负责的业务负载成比例, 且总和不大 C-RAN 虚拟总资源量。又因为波长资源 LC 与 BBU 直接相连且具有相同的基数。因此, 虚拟 BBU 计算资源和 TWDM-PON 波长分配具有的比例公平约束如式(12)~式(14)所示。

$$\|W_1\|:\|W_2\|:\cdots:\|W_{|S|}\| = \|LC_1\|:\|LC_2\|:\cdots:\|LC_{|S|}\| \quad (12)$$

$$= (1 \pm \alpha_1)(b_1 : b_2 : \cdots : b_{|S|})$$

$$\sum_{s \in S} \|W_s\| = \sum_{s \in S} \|LC_s\| = \|W\| = \|LC\| \quad (13)$$

$$b_s = \sum_{n \in N_s} \sum_{m \in M_s} \sum_{k \in K_s} b_{s,n,m,k}, \forall s \in S \quad (14)$$

其中,  $\|\bullet\|$  表示某集合元素的总数,  $W_s$  和  $LC_s$  分别表示第  $s$  个 V-CRAN 中的 BBU 计算资源集合和波长资源集合,  $b_s$  表示第  $s$  个 V-CRAN 所负责业务的总请求带宽资源,  $b_{s,n,m,k}$  表示第  $s$  个 V-CRAN 中的 RRH<sub>n</sub> 占用信道  $k$  到用户  $m$  的请求带宽资源,  $\alpha_1$  是一个整数, 可以严格比例约束得到松弛。同理, 对于每个 RRH 来说, 其可用能量和数据缓冲单元根据各服务负载等比分配。那么, RRH<sub>n</sub> 的能量与资源共享分配如式(15)~式(17)所示。

$$E_n^1(t):E_n^2(t):\cdots:E_n^{|S|}(t) = e_n^1(t):e_n^2(t):\cdots:e_n^{|S|}(t)$$

$$= g_n^1(t):g_n^2(t):\cdots:g_n^{|S|}(t) = (1 \pm \alpha_2)(b_1 : b_2 : \cdots : b_{|S|}) \quad (15)$$

$$\Omega_n^1(t):\Omega_n^2(t):\cdots:\Omega_n^{|S|}(t) = (1 \pm \alpha_3)(b_1 : b_2 : \cdots : b_{|S|}) \quad (16)$$

$$\sum_{s \in S} E_n^s(t) = E_n(t), \sum_{s \in S} e_n^s(t) = e_n(t),$$

$$\text{and} \sum_{s \in S} g_n^s(t) = g_n(t), \sum_{s \in S} \Omega_n^s(t) = \Omega_{\text{RRH}} \quad (17)$$

其中,  $E_n^s(t)$ 、 $e_n^s(t)$ 、 $g_n^s(t)$  及  $\Omega_n^s(t)$  分别表示第  $s$  个 V-CRAN 中 RRH<sub>n</sub> 的可用能量、可再生能量、传统能量和数据缓冲区容量,  $\Omega_{\text{RRH}}$  表示每个 RRH 的数据缓冲区容量。接着, RAP-UE 的可用能量和数据缓冲单元与 RRH 具有相同分配策略, 即

$$E_m^1(t):E_m^2(t):\cdots:E_m^{|S|}(t) = e_m^1(t):e_m^2(t):\cdots:e_m^{|S|}(t)$$

$$= g_m^1(t):g_m^2(t):\cdots:g_m^{|S|}(t) = (1 \pm \alpha_4)(b_1 : b_2 : \cdots : b_{|S|}) \quad (18)$$

$$\Omega_m^1(t):\Omega_m^2(t):\cdots:\Omega_m^{|S|}(t) = (1 \pm \alpha_5)(b_1 : b_2 : \cdots : b_{|S|}) \quad (19)$$

$$\sum_{s \in S} E_m^s(t) = E_m(t), \sum_{s \in S} e_m^s(t) = e_m(t)$$

$$\sum_{s \in S} g_m^s(t) = g_m(t), \sum_{s \in S} \Omega_m^s(t) = \Omega_{\text{UE2}} \quad (20)$$

其中,  $E_m^s(t)$ 、 $e_m^s(t)$ 、 $g_m^s(t)$  及  $\Omega_m^s(t)$  分别表示第  $s$  个 V-CRAN 中所分配给 RAP-UE<sub>m</sub> 的可用能量、可再生能量、传统能量和数据缓冲区容量,  $\Omega_{\text{UE2}}$  表示每个 RAP-UE 的数据缓冲区容量。而对于无线信道资

源来说，其约束为

$$\|K_1\|:\|K_2\|:\dots:\|K_{|S|}\|=(1\pm\alpha_6)(b_1:b_2:\dots:b_{|S|}) \quad (21)$$

$$\sum_{s\in S}\|K_s\|=\|K\| \quad (22)$$

其中， $K_s$  表示第  $s$  个 V-CRAN 的无线信道集合。

在一级集中控制器处，为了有效地完成满足以上约束条件的虚拟资源公平分配，本节结合考虑小区业务流量动态变化的特点，提出了动态 V-CRAN 比例公平资源配置机制。各类虚拟资源具有相似的分配特性，因此，本节以 BBU 计算资源为例描述分配算法的执行，算法的具体伪代码如算法 1 所示。当一个用户请求到达后，一级控制器先判断连接类型和服务类型，并记录上一时刻各种服务的负载信息和 V-CRAN 的 BBU 计算资源分配信息（算法 1 中 1~3）。如果请求属于中断请求类型，则  $m=1$ ，那么将减去请求负载大小的当前时刻各 V-CRAN 的负载比例与上一请求到达后的计算资源分配比例作比较，若大致相等，则资源配置保持不变；若不等，则根据当前负载比例和先前配置信息重新进行资源分配。如果请求属于连接请求类型， $m=-1$ ，则当前时刻服务负载为加上请求负载后的结果，其具体操作与中断请求类型类似，不再加以赘述（算法 1 中 4~7）。

**算法 1** 比例公平资源分配算法

输入：一个用户请求

输出：所有 V-CRAN 的资源分配结果

1) 当用户请求到达时，执行以下操作

2) 判断请求的连接类型  $m=\{-1,1\}$  和服务类型

$j\in[1,S]$

3) 记录上一请求到达时所有 V-CRAN 的 BBU 资源配置和负载情况为  $W'=(W'_1,\dots,W'_j,\dots,W'_S)$  和  $L'=(L'_1,\dots,L'_j,\dots,L'_S)$

4) if  $(W'_1:\dots:W'_j:\dots:W'_S)=(1\pm\alpha)(L'_1:\dots:(L'_j-m*b_j):\dots:L'_S)$

5) 令当前 BBU 资源配置与上一请求到达时的

配置保持不变，即  $\text{current}(W_1:\dots:W_j:\dots:W_S)=\text{upper}(W'_1:\dots:W'_j:\dots:W'_S)$

6) else

7) 基于新的负载按照比例公平的原则进行重新分配，即  $\text{current}(W_1:\dots:W_j:\dots:W_S)=(1\pm\alpha)(L'_1:\dots:L'_j-m*b_j:\dots:L'_S)$

**5.2 RRH 能量共享机制**

在混合能量支持的 CRAN-NV 网络架构中，RRH 的能量包括可再生能源和传统能量 2 个部分。为了最小化在 RRH 处产生的传统能耗，考虑最大化使用可再生能源。RRH 能耗包括已激活设备能耗和传输信号能耗。对于激活能耗来说，当 RRH<sub>n</sub> 的剩余可再生能源不足以支持 RRH 正常激活运转时，考虑由其他 RRH 提供所需的能量。因此，将  $a_{s,n}^{s_1,n_1}(t)$  定义为二进制变量，当第  $s$  个 V-CRAN 中的 RRH<sub>n</sub> 在时隙  $t$  向第  $s_1$  个 V-CRAN 中的 RRH<sub>n<sub>1</sub></sub> 借调激活所需的可再生能源时为 1。为了简便，本文考虑第  $s$  个 V-CRAN 中的 RRH<sub>n</sub> 最多向同一或不同 V-CRAN 中的一个 RRH 借调能量，所以

$$\sum_{n_1\in N_{s-n}} a_{s,n}^{s_1,n_1}(t) + \sum_{s_1\in S-s} \sum_{n_1\in N_{s_1}} a_{s,n}^{s_1,n_1}(t) \leq 1, \forall s\in S, n\in N_s \quad (23)$$

令  $\theta_n^s(t)$  表示为第  $s$  个 V-CRAN 中的 RRH<sub>n</sub> 为了正常激活运转在自身所使用的可再生能源。当第  $s$  个 V-CRAN 中的 RRH<sub>n</sub> 自身所储备的可再生能源能够支持它所分得的激活能耗时， $\theta_n^s(t)$  为 RRH<sub>n</sub> 所分配的激活能耗；否则， $\theta_n^s(t)$  为 RRH<sub>n</sub> 所存储的可再生能源。那么，

$$\theta_n^s(t) = \begin{cases} e_n^s(t), e_n^s(t) \leq rrrh_n(t) \frac{P_{RRH}}{\|S\|} \\ \frac{P_{RRH}}{\|S\|}, \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

基于上述变量  $a_{s,n}^{s_1,n_1}(t)$  和  $\theta_n^s(t)$ ，可知时隙  $t$  第  $n$  个 RRH 被激活时的能耗占比变量为

$$\rho_{RRH\_G}^{n,act}(t) = \frac{P_{RRH} - \sum_{s\in S} \left( \theta_n^s(t) + \left( \frac{P_{RRH}}{\|S\|} - \theta_n^s(t) \right) \left( \sum_{n_1\in N_{s-n}} a_{s,n}^{s_1,n_1}(t) + \sum_{s_1\in S-s} \sum_{n_1\in N_{s_1}} a_{s,n}^{s_1,n_1}(t) \right) \right)}{P_{RRH}} \quad (25)$$

类似地，对于传输信号能耗来说，当某新用户所在的 RRH 的剩余可再生能源不足以支持用户请求时，考虑由同一 SP 下的 RRH 或其他 SP 下的 RRH 提供所

需的能量。因此，将  $c_{s,n,k,m,tras}^{s_1,n_1}(t)$  定义为二进制变量，当第  $s$  个 V-CRAN 中的 RRH<sub>n</sub> 在时隙  $t$  向第  $s_1$  个 V-CRAN 下的 RRH<sub>n<sub>1</sub></sub> 借调其占用  $k$  信道向用户  $m$  发送

信号所需的可再生能量时为 1, 同样, 也最多向同一或不同 SP 下的一个 RRH 借调能量;  $\xi_{n,k,m}^s(t)$  定义为第  $s$  个 V-CRAN 中的 RRH<sub>n</sub> 占用信道  $k$  向用户  $m$  发送信息

$$\rho_{RRH\_G}^{s,n,k,m,tras}(t) = \frac{P_{RRH}^{s,n,k,m,tras}(t) - \xi_{n,k,m}^s(t) - (P_{RRH}^{s,n,k,m,tras}(t) - \xi_{n,k,m}^s(t)) \left( \sum_{n_1 \in N_s - n} c_{s,n,k,m,tras}^{s_1, n_1}(t) + \sum_{s_1 \in S - s} \sum_{n_1 \in N_{s_1}} c_{s,n,k,m,tras}^{s_1, n_1}(t) \right)}{P_{RRH}^{s,n,k,m,tras}(t)} \quad (26)$$

$$\xi_{n,k,m}^s(t) = \begin{cases} e_n^s(t), e_n^s(t) \leq u e_m^{s,k,h}(t) P_{RRH}^{s,n,k,m,tras}(t) \\ P_{RRH}^{s,n,k,m,tras}(t), \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

$$\sum_{n_1 \in N_s - n} c_{s,n,k,m,tras}^{s_1, n_1}(t) + \sum_{s_1 \in S - s} \sum_{n_1 \in N_{s_1}} c_{s,n,k,m,tras}^{s_1, n_1}(t) \leq 1, \quad \forall s \in S, n \in N_s, k \in K_s, m \in M_s \quad (28)$$

在以上约束的基础上, 若实现最小化 RRH 所消耗的传统电能, 需要设计合理的 RRH 能量共享机制, 对 RRH 能量进行合理调用。因此, 当某新用户请求所关联 RRH 的剩余可再生能量不足以支持激活能耗或传输信号能耗时, 三级控制器执行以下算法, 其伪代码如算法 2 所示。

### 算法 2 能量共享算法

1) 判断用户请求的服务类型  $j \in [1, S]$ , 并依据式(24)和式(27)计算用户关联 RRH<sub>n</sub> 所需的借调能量  $EG(n)$

2) 基于剩余可再生资源对第  $j$  个 V-CRAN 的所有 RRH 进行降序排序

3) if  $EG(n) \leq \text{REGSUR\_RRHJ\_MAX}$

4) 在集合 RRH\_J 中选择具有最大剩余能量的 RRH 给予 RRH<sub>n</sub> 所需的能量

5) else

6) 对其他类型 V-CRAN  $i$  ( $i \neq j, i \in [1, S]$ ) 执行以下操作:

7) 基于剩余可再生资源对第  $i$  个 V-CRAN 的 RRH 进行降序排序

8) if  $EG(n) \leq \text{REGSUR\_RRHI\_MAX}$

9) 在 RRH\_I 中选择具有最大剩余能量的 RRH 供给 RRH<sub>n</sub> 所需的能量, 并结束算法

10) else

11) 跳转到 6) 对下一类型 V-CRAN 进行判断

12) 若在所有 V-CRAN 中均不存在 RRH 可为 RRH<sub>n</sub> 提供所需的可再生能量, 则考虑用传统电网能量替代可再生能量, 并执行以下操作

13) if  $EG(n) \leq \text{EGSUR\_G\_RRHN}$

14) 选择 RRH<sub>n</sub> 提供传统电网能量

15) else

时在自身所使用的可再生能量, 其选择策略与  $\theta_n^s(t)$  相似。因此, 第  $s$  个 V-CRAN 中的 RRH<sub>n</sub> 在时隙  $t$  占用信道  $k$  发送信号到用户  $m$  的能耗占比变量具有如下约束:

16) 依据可再生能量分配过程为 RRH<sub>n</sub> 寻求不足能量的供给

17) 若不存在任何 RRH 可为 RRH<sub>n</sub> 提供可再生能量和电网能量, 则拒绝此用户请求

在算法中, 首先判断新用户请求的服务类型  $j$ , 并计算用户请求关联 RRH<sub>n</sub> 所需借调的能量  $EG(n)$  (算法 2 中 1))。接着, 对第  $j$  个 V-CRAN 中的 RRH (不包含请求所关联的 RRH) 按照剩余可再生能量由大到小排列, 并放入集合 RRH\_J 中 (算法 2 中 2))。然后, 将请求 RRH 所需能量  $EG(n)$  与集合 RRH\_J 中的最大剩余能量进行对比, 若出现小于或等于的情况, 则选择具有最大剩余能量的 RRH 给予请求 RRH<sub>n</sub> 所需的能量; 否则, 当集合 RRH\_J 中不存在 RRH 可以支持请求 RRH<sub>n</sub> 所需能量时, 考虑从其他 V-CRAN 中的 RRH 借调能量。那么, 对所有类型 V-CRAN 执行以下循环操作: 将第  $i$  个 V-CRAN 中的 RRH 按照剩余可再生能量由大到小排列, 并放入集合 RRH\_I 中。如果集合 RRH\_I 中的 RRH 最大剩余能量大于或等于请求 RRH<sub>n</sub> 所需能量, 则选择具有最大剩余能量的 RRH 给予请求 RRH<sub>n</sub> 所需的能量, 并停止循环; 如果小于, 则对第  $i+1$  个 V-CRAN 中的 RRH 执行以上操作 (算法 2 中 3)~11))。如果遍历完所有 V-CRAN 的 RRH 之后, 仍未存在合适的 RRH 为请求 RRH<sub>n</sub> 提供可再生能量时, 为了保障链路的可靠连接, 考虑使用传统能量。那么, 首先判断请求 RRH<sub>n</sub> 自身所储存的传统能量能否完成能量  $EG(n)$  的供给, 如果不足, 则按照可再生能量借调过程依次向同一 V-CRAN 中、不同 V-CRAN 中的 RRH 寻求不足能量的供给 (算法 2 中 12)~16))。最终, 若不存在任何 RRH 可为其提供所需的能量时, 则拒绝此用户请求 (算法 2 中 17))。

### 5.3 能耗感知的 V-CRAN 动态资源分配机制

由第 4 节可知, V-CRAN 的总能耗包括 3 个部分, 即 CO 网络设备计算能耗、RRH 通信设备能耗、RRH 和 RAP-UE 通信能耗。为了使总能耗最小化, 本文考虑使各部分能耗分别最小化。为了最小化

RRH 和 RAP-UE 的传统能耗且在不增加能耗的基础上提高吞吐量, 本文依据信道状态信息和 RRH 与用户的剩余能量及资源信息, 为新业务请求选择合理的 RAP-UE 和关联 RRH。而对于 CO 网络设备来说, 它们仅靠传统电网提供能量, 所以要想使其能耗最小, 需要使激活 CO 网络设备的数量最小。因此, 本节首先基于能量和信道状态为用户请求选择接入模式和关联 RRH; 然后依据波长资源剩余情况并以能耗最少为原则为用户请求分配小区处理 (PHY-cell, cell processing) 资源, 即为其服务的主 BBU 和 VPON; 最后基于能耗和处理时延最少选择合适的用户处理 (UP, user processing) 模块对其进行基带处理, 从而完成 V-CRAN 中用户请求的整个资源分配。

### 5.3.1 基于特殊接入模式的关联机制

在 V-CRAN 中, 针对 RRH 与用户之间的关联机制, 本文考虑 2 种情况: 第一种情况是当新用户请求到达时, 如果存在空闲信道, 则普通用户不通过 RAP-UE 中继而是直接连接 RRH; 第二种情况是依据剩余能量和资源寻找合适 RAP-UE 间接接入 RRH。为了使 RRH 能耗最小, 在接入 RAP-UE 时, 首先使用储存的可再生能源, 当可再生能源不足时才使用自身的传统能量。

对于第  $s$  个 V-CRAN 中的 RAP-UE 来说, 为了保证服务质量, 其承担的负载流量不大于资源容量且能耗不大于存储的可用能量, 即

$$\sum_{m \in M_s} \sum_{k \in K} \delta_{s,m,k}^{m'}(t) b_{s,m',k} \leq \rho_1 \Omega_m^s(t), \forall s \in S, m' \in M'_s \quad (29)$$

$$\sum_{m \in M_s} \sum_{k \in K} \delta_{s,m,k}^{m'}(t) P_{\text{UE2}}^{s,m,k,m',\text{tras}}(t) \leq \rho_2 E_{m'}^s(t), \quad \forall s \in S, n \in N_s, m' \in M'_s \quad (30)$$

接着, 为了合理分配 RAP-UE 的能量, 定义  $\zeta_{m,k,m'}^s(t)$  为在  $t$  时隙 RAP-UE $_{m'}$  占用信道  $k$  向第  $s$  个 V-CRAN 中的用户  $m$  发送信息时在自身所使用的可再生能源, 其选择策略与  $\theta_n^s(t)$  相似。那么,

$$\zeta_{m,k,m'}^s(t) = \begin{cases} e_m^s(t), e_{m'}^s(t) \leq \delta_{s,m,k}^{m'}(t) \cdot P_{\text{UE2}}^{s,m,k,m',\text{tras}}(t) \\ P_{\text{UE2}}^{s,m,k,m',\text{tras}}(t), \text{其他} \end{cases} \quad (31)$$

由上可得, 在  $t$  时隙第  $s$  个 V-CRAN 中的 RAP-UE $_{m'}$  占用信道  $k$  发送信号到用户  $m$  的能耗占比变量为

$$\rho_{\text{UE2-G}}^{s,m,k,m',\text{tras}}(t) = \frac{P_{\text{UE2}}^{s,m,k,m',\text{tras}}(t) - \zeta_{m,k,m'}^s(t)}{P_{\text{UE2}}^{s,m,k,m',\text{tras}}(t)} \quad (32)$$

对于第  $s$  个 V-CRAN 中的 RRH 来说, 它与 RAP-UE 类似, 其负载流量小于资源容量且总能耗不大于可用能量, 即

$$\sum_{m \in M_s} \sum_{k \in K} u e_m^{s,n,k}(t) b_{s,n,m,k} \leq \rho_3 \Omega_n^s(t), \forall s \in S, n \in N_s \quad (33)$$

$$\frac{rrh_n(t) P_{\text{RRH}}}{\|S\|} + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} (u e_m^{s,n,k}(t) \cdot P_{\text{RRH}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t)) \leq \rho_4 E_n^s(t), \forall s \in S, n \in N_s \quad (34)$$

其中, 与 RAP-UE 不同, RRH 能耗包括激活能耗和通信能耗, 且 RRH 收集的可用能量包含共享其他 RRH 的能量。

此外, 在 RRH 与用户之间的无线信道占用资源必须不超过无线信道资源总量, 那么

$$\sum_{n \in N_s} \sum_{m \in M_s} \sum_{k \in K} (u e_m^{s,n,k}(t) + \sum_{m' \in M'_s} \delta_{s,m,k}^{m'}(t)) \leq \|K_s\|, \forall s \in S \quad (35)$$

为了避免用户间的过度同频干扰, 本文假设物理层采用正交频分复用技术, 在时隙  $t$  每个信道最多被一个用户占用, 则 RRH 与 RAP-UE 占用信道时相互独立, 不产生干扰。并且, 每个用户在每个时隙最多由连接 RRH 的一个信道传输。因此, 第  $s$  个 V-CRAN 的无线信道资源分配有如下约束, 即

$$\sum_{n \in N_s} \sum_{m \in M_s} (u e_m^{s,n,k}(t) + \sum_{m' \in M'_s} \delta_{s,m,k}^{m'}(t)) \leq 1, \forall s \in S, k \in K_s \quad (36)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{n \in N_s} \sum_{k \in K} (u e_m^{s,n,k}(t) + \sum_{m' \in M'_s} \delta_{s,m,k}^{m'}(t)) \leq 1, \forall m \in M \quad (37)$$

接着, 为了保证用户的服务质量, 分配功率时不同 V-CRAN 的传输速率大于所设置的最低传输速率, 则

$$\sum_{n \in N_s} \sum_{k \in K} \left( u e_m^{s,n,k}(t) W \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{\text{RRH}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t) \cdot h_{s,n,k,m}^2}{N_0 W} \right) + \sum_{m' \in M'_s} \delta_{s,m,k}^{m'}(t) W \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{\text{UE2}}^{s,m,k,m',\text{tras}}(t) \cdot h_{s,m,k,m'}^2}{N_0 W} \right) \right) \geq R_{\min}^s, \forall s \in S, m \in M_s \quad (38)$$

其中,  $W$  是信道子载波带宽,  $h_{s,n,k,m}$  是第  $s$  个 V-CRAN 中的 RRH $_n$  占用信道  $k$  向用户  $m$  发送信息时的信道增益,  $N_0$  表示高斯白噪声的功率谱密度,  $h_{s,m,k,m'}$  表示第  $s$  个 V-CRAN 中的 RAP-UE $_{m'}$  占用信

道  $k$  向用户  $m$  发送信息的信道增益。

最后, 为了在满足以上约束条件的基础上, RRH 和 UE 之间的传统能耗最小化且提高吞吐量, 本文设计了 RAP-UE 和 RRH 选择机制, 其伪代码如算法 3 所示。

### 算法 3 用户关联算法

输入: 一个用户请求

输出: 用户的关联 RRH 和 RAP-UE

- 1) 当用户请求到达时, 执行以下操作
- 2) 统计剩余无线信道资源  $H\_SUR$
- 3) if  $H\_SUR > 0$
- 4) 遍历第  $j$  个 V-CRAN 中的 RRH  $n$  且  $n \in [1, \|N_s\|]$ , 并执行以下判断
  - 5) if  $RRH\_SUR\_RES(n) > REQUEST\_BW$
  - 6) 将 RRH  $n$  放入集合  $OVER\_RRH$  中, 然后令  $n=n+1$ , 并跳转到步骤 4)
  - 7) else, 直接令  $n=n+1$ , 并跳转到步骤 4)
  - 8) 基于剩余可再生资源对集合  $OVER\_RRH$  中的 RRH 进行降序排序
  - 9) if  $RRH\_SUR\_EG(\max) < REQUEST\_EG$
  - 10) 执行 RRH 能量共享机制 (即算法 2)
  - 11) else
  - 12) 选择具有  $RRH\_SUR\_EG(\max)$  能量的 RRH 作为关联 RRH
  - 13) else
  - 14) 遍历第  $j$  个 V-CRAN 中的 RAP-UE  $u$  且  $u \in [1, \|M_s\|]$ , 并执行以下判断
    - 15) if  $RAP\_UE\_SUR\_RES(u) > REQUEST\_BW$
    - 16) 将 RAP-UE  $u$  放入集合  $RELAY\_M$  中
    - 17) 令  $u=u+1$ , 并跳转到 14)
    - 18) if  $RELAY\_M = NULL$ , 则拒绝新用户请求
    - 19) else
    - 20) 基于剩余可再生能量对集合  $RELAY\_M$  中的 RAP-UE 进行降序排序
    - 21) 选择具有  $RAP\_UE\_SUR\_EG(\max)$  能量的 RAP-UE 作为中继

- 22) 执行 4)~12) 为用户选取关联 RRH

在算法 3 中, 当用户请求到达时, 统计剩余无线信道资源算法中 2)。如果存在空闲信道, 则直接为用户请求选择关联 RRH (算法 3 中 3)~12))。选择 RRH 时执行以下操作: 首先将第  $j$  个 V-CRAN 中剩余资源大于新用户负载的 RRH 放入集合  $OVER\_RRH$  中, 并按照剩余可再生能量由大到小对集合元素进行排序。然后, 将最大剩余可再生能量与发送新用户所需的能量进行对比, 若最大剩余可再生能量小于新用户所需的能量, 则调用 RRH 能量共享机制从合适的 RRH 购买所需的可再生能量, 否则, 选择具有最大剩余可再生能量的 RRH 作为新用户关联 RRH。如果不存在空闲信道, 则为用户请求选择 RAP-UE 间接接入 RRH (算法 3 中 13)~22))。那么, 执行以下操作: 首先将第  $j$  个 V-CRAN 中所有剩余资源大于新用户负载资源的 RAP-UE 放入集合  $RELAY\_M$  中, 如果集合为空, 则不存在合适的 RAP-UE 为新用户进行中继, 即放弃新用户的服务请求; 否则, 将集合  $RELAY\_M$  中的 RAP-UE 按照剩余可再生能量由大到小排序, 然后选择排序后集合中具有最大剩余可再生能量的 RAP-UE 作为中继。接着, 按照 RRH 选择机制选取关联 RRH, 从而完成新用户请求的合理关联。

### 5.3.2 TWDM-PON 波长资源共享机制

在 V-CRAN 中, TWDM-PON 波长信道具有大容量特征, 一个 TWDM-PON 可支持多个 VPON, 每个 VPON 都由一个连接 BBU 的 LC 和多个共享相同波长的 ONU 组成。并且, BBU 基带处理被虚拟化为两种类型的功能实体, 即 PHY-cell 和 UP。其中, PHY-cell 模块用于标记所属 VPON。本节的 TWDM-PON 波长资源共享机制主要是为未配置 PHY-cell 的小区选择适当的主 BBU 和 VPON。首先, 为了保证包含多个 PHY-cell 标识的 VPON 负载不大于 VPON 最大容量限制, 即

$$\sum_{n \in N_s} x_{n,w}^s(t) \left( \sum_{m \in M_s} \sum_{k \in K} u e_m^{s,n,k}(t) b_{s,n,m,k}(t) \right) \leq \rho_s C_{VPON}, \forall w \in W_s, s \in S \quad (39)$$

其中,  $W_s$  是第  $s$  个 V-CRAN 的 VPON 波长集合;  $S$  是所有的服务类型集合;  $N_s$  是第  $s$  个 V-CRAN 的小区集合, 同时也是 RRH 的集合;  $C_{VPON}$  表示 VPON 波长容量;  $\rho_s$  是为了保证 VPON 可靠性设置的容量约束参数;  $x_{n,w}^s(t)$  是二进制变量, 若第  $s$  个

V-CRAN 中的小区  $n$  在 VPON  $w$  进行基带数据传输, 其值为 1。本文假定一个 V-CRAN 的一个小区只能在一个 VPON 中进行基带数据传输, 那么,

$$\sum_{w \in W_s} x_{n,w}^s(t) = 1, \forall s \in S, n \in N_s \quad (40)$$

接着, 只要有任意的小区在 VPON 上进行数据传输, 则 LC 始终保持激活状态, 即

$$lc_w^s(t) = \left\lceil \frac{\sum_{n \in N_s} x_{n,w}^s(t)}{\|N_s\|} \right\rceil, \forall w \in W_s, s \in S \quad (41)$$

其中,  $\|\cdot\|$  表示某集合元素的总数;  $\lceil \cdot \rceil$  是向上取整。

对于基于以上约束的 TWDM-PON 波长资源共享机制, 其具体伪代码如算法 4 所示。在算法中, 首先对属于第  $j$  个 V-CRAN 中的 VPON 按照剩余带宽资源由大到小排列 (算法 4 中 1))。然后, 将最大剩余带宽资源与请求带宽进行对比, 若最大剩余带宽资源小于请求带宽, 则激活新的 BBU 和与之相连的 VPON 进行服务, 并将小区 PHY-cell 写入到 BBU 中; 否则将与具有最大剩余带宽资源的 VPON 相连的 BBU 作为主服务 BBU (算法 4 中 2)~7))。

#### 算法 4 TWDM-PON 波长资源共享算法

- 1) 基于剩余资源对服务类型  $j$  的所有 VPON 进行降序排序
- 2) 将 SURPLUS\_RES( $m$ ) 表示排序后的第  $m$  ( $m \in [1, W_i\_active]$ ) 个剩余资源
- 3) 令 SURPLUS\_RES(max) = SURPLUS\_RES(1)
- 4) if SURPLUS\_RES(max) < REQUEST\_BW
- 5) 激活一个新的 BBU 和 VPON 进行服务
- 6) else
- 7) 考虑具有最大剩余带宽资源的 VPON 进行服务

#### 5.3.3 BBU 计算资源共享机制

由 5.3.2 节可知, UP 是 BBU 的计算资源模块。为了合理地为服务请求选择在 BBU 中的基带处理单元, 需要设计高效的 BBU 计算资源共享机制。本文结合能耗和时延 2 种因素选取合适的 UP, 从而实现数据的高效传输, 同时降低网络运营商的成本。首先, 在 BBU 上的处理负载必须不超过 UP 容量限制, 即

$$\sum_{n \in N_s} \sum_{m \in M_{s,n}} u_{n,m,w}^s(t) \left( \sum_{h \in H} u e_m^{s,n,k}(t) b_{s,n,m,k}(t) \right) \leq \rho_6^s C_{UP}, \forall w \in W_s, s \in S \quad (42)$$

其中,  $C_{UP}$  表示 UP 带宽容量,  $\rho_6^s$  是为了保证第  $s$  个 V-CRAN 负责服务的处理时延限制而设置的容量约束参数,  $u_{n,m,w}^s(t)$  也是二进制变量。若第  $s$  个 V-CRAN 中的小区  $n$  的服务请求  $m$  是在 BBU UP  $w$  进行基带处理, 其值为 1。又因为本文假设一个小区用户的一种服务类型请求只能在一个 BBU UP 中进行基带数据处理, 则

$$\sum_{w \in W_s} u_{n,m,w}^s(t) = 1, \forall n \in N_s, m \in M_{s,n}, s \in S \quad (43)$$

其次, 若任意小区的一个请求在 BBU UP 上进行基带数据处理, 则 BBU 保持激活状态, 那么,

$$up_w^s(t) = \left\lceil \frac{\sum_{n \in N} \sum_{m \in M_{s,n}} u_{n,m,w}^s(t)}{\|N\| \sum_{n \in N} \|M_{s,n}\|} \right\rceil, \forall w \in W_s, s \in S \quad (44)$$

接着, 对于交换机来说, 交换机服务的所有 BBU UP 中迁移的总负载不大于交换机能承受的最大容量,

$$\sum_{n \in N_s} \sum_{m \in M_{s,n}} k_{n,m}^s(t) \cdot \left( \sum_{h \in H} u e_m^{s,n,k}(t) \cdot b_{s,n,m,k}(t) \right) \leq \rho_7 C_{SWITCH}, \forall s \in S \quad (45)$$

其中,  $C_{SWITCH}$  表示交换机最大负载容量,  $k_{n,m}^s(t)$  表示若第  $s$  个 V-CRAN 的小区  $n$  的服务请求  $m$  发生了 UP 迁移, 其值为 1。本文定义当用户服务请求的主 BBU 与请求基带处理 UP 所在 BBU 不是同一个 BBU 时, 请求服务 UP 发生迁移, 即

$$z_{n,m,w}^s(t) = |u_{n,m,w}^s(t) - x_{n,w}^s(t)|, \forall w \in W_s, s \in S \quad (46)$$

其中,  $z_{n,m,w}^s(t)$  表示若第  $s$  个 V-CRAN 的小区  $n$  的服务请求  $m$  是在 BBU  $w$  进行 UP 处理迁移, 其值为 1。那么, 可得

$$k_{n,m}^s(t) = \left\lceil \frac{\sum_{w \in W_s} z_{n,m,w}^s(t)}{\|W_s\|} \right\rceil, \forall n \in N_s, m \in M_{s,n}, s \in S \quad (47)$$

进一步, 当无任何 UP 迁移时, 所有交换机端口处于休眠状态, 且交换机也退出激活状态, 进入休眠, 即

$$p_t^s(t) = \left[ \frac{\sum_{n \in N} \sum_{m \in M_{s,n}} z_{n,m,w}^s(t)}{\|N\| \sum_{n \in M} \|M_{s,n}\|} \right], \forall w \in W_s, s \in S \quad (48)$$

$$sw(t) = \left[ \frac{\sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M_{s,n}} k_{n,m}^s(t)}{\|N\| \sum_{n \in N} \|M_{s,n}\| \|S\|} \right] \quad (49)$$

最后，对于时延限制，本文设置小区中服务请求的总时延均不大于标准最大时延  $T_{\max}^s$ ，即

$$\sum_{w \in W_s} \left( u_{n,m,w}^s(t) \left( \frac{\sum_{h \in H} u e_m^{s,n,k}(t) b_{s,n,m,k}(t)}{RB_w^{n,m}(t)} + z_{n,m,w}^s(t) T_{\text{switch}} \right) \right) + \frac{\sum_{h \in H} u e_m^{s,n,k}(t) b_{s,n,m,k}(t)}{\mu_s - \lambda_s} + \sum_{h \in H} u e_m^{s,n,k}(t) b_{s,n,m,k}(t) T_{\text{tras}}^{\text{MB}} \leq T_{\max}^s, \forall n \in N_s, m \in M_{s,n}, s \in S \quad (50)$$

其中，不等式左边第一项表示基带处理时延， $RB_w^{n,m}$  表示 BBU<sub>w</sub> 在小区  $n$  中的服务请求  $m$  到达前的剩余 UP 资源， $T_{\text{switch}}$  表示交换机接口打开时延；第二项表示集中控制器调度时延， $\lambda_s$  是第  $s$  个 V-CRAN 的业务到达率， $\mu_s$  是在第  $s$  个 V-CRAN 控制器中的平均业务处理率；第三项表示传输时延， $T_{\text{tras}}^{\text{MB}}$  是常量，表示每 MB 传输时延。

基于以上约束条件，BBU 计算资源共享机制的伪代码如算法 5 所示。在算法中，首先对第  $j$  个 V-CRAN 中的激活 BBU 按照 UP 剩余带宽资源由大到小排列（算法 5 中 1）。然后，计算请求数据在活动 BBU 中的处理时间。考虑将请求数据大小与排序后的 BBU UP 剩余带宽资源进行对比，若出现第  $n$  个 BBU 剩余资源小于请求数据最小带宽的情况，则将  $n$  至  $W\_J\_ACTIVE$  的 BBU 处理时延均设置为无穷大，这样可以有效降低算法执行的时间复杂度（算法 5 中 2)~8)。接着，如果存在处理时延小于无穷大的 BBU，将请求的主 BBU 的处理时延与最小的其他 BBU 处理时延加上交换机端口时延作对比，从而选择合适的 BBU 进行处理；否则，当所有的激活 BBU 处理时延均是无穷大时，激活一个新的 BBU 专用于 UP 服务，其中，这个 BBU 没有 PHY-cell 模块，且与之相连的 PON 模块不被激活（算法 5 中 9)~17)）。

**算法 5** BBU 计算资源共享算法

1) 基于剩余资源对第  $j$  类服务中激活 BBU 的所有 UP 进行降序排序

- 2) 计算请求在第  $j$  类服务所有激活 BBU 中( $n \in [1, W\_J\_ACTIVE]$ )的处理时间，即执行以下操作
- 3) if BBU\_SUR\_RES( $n$ ) > REQ\_SIZE/DELAY\_J\_MAX
- 4) PROCESS\_DELAY( $n$ ) ← REQ\_SIZE/BBU\_SUR\_RES( $n$ )
- 5)  $n = n + 1$
- 6) else
- 7) PROCESS\_DELAY( $t$ ) ← ∞ ( $t = [n, W\_J\_ACTIVE]$ )
- 8) 跳转到步骤 7)
- 9) if 存在 PROCESS\_DELAY( $t$ ) < ∞
- 10) 基于处理时延对第  $j$  类服务的激活 BBU 进行升序排序
- 11) 将 PROCESS\_DELAY(min) 表示最小的处理时延
- 12) if PROCESS\_DELAY(CURRENT\_BBU) < PORT\_DELAY + PROCESS\_DELAY(min)
- 13) 选择当前的主 BBU UP 作为用户请求 UP
- 14) else
- 15) 选择具有最小处理时延的 BBU UP 作为请求 UP
- 16) else
- 17) 激活一个新的 BBU 专用于 UP 服务

**6 性能测试与分析**

为了有效衡量所提资源分配机制的性能，本节主要将其与其他 3 种架构进行比较，即传统型 C-RAN 架构、D-RAN 架构和能耗感知的 C-RAN 架构<sup>[22]</sup>。首先对 3 个架构的能耗模型进行阐述。

在传统型 C-RAN 架构中，虽然所有 BBU 集中于中心局的 BBU 池，但却没有实现资源共享，即每个小区仍需要一个专用的 BBU 和 LC 为之服务。因此，此种架构下的能耗为

$$P_{\text{CRAN}}(t) = P_{\text{cooling,pool}} + (P_{\text{RRH}} + P_{\text{ONU}})g + \sum_{s=1}^{|S|} (P_{\text{LC}} + P_{\text{BBU}}) \cdot \|W_s\| + \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{n=1}^{\|N_s\|} \sum_{m=1}^{\|M_{s,n}\|} \sum_{k=1}^{\|K_{s,n}\|} u e_m^{s,n,k}(t) P_{\text{RRH\_G}}^{s,n,k,m,\text{tras}}(t) \quad (51)$$

其中，等式右边第一项表示冷却设施能耗，第二项表示小区站点设备能耗，第三项表示激活 LC 和 BBU 能耗，显然 BBU 和 LC 一直处于激活状态；第四项

表示信号发送能耗，其他参数设置如前所述。

在 D-RAN 架构中，BBU 和 RRH 均位于小区站点，固定关联组成基站。所以，BBU 必须时刻处于激活状态。为保证 BBU 正常运行，每个 BBU 均需要配置一个专用冷却设施。因此，D-RAN 能耗模型为

$$P_{DRAN}(t) = (P_{cooling,pool} + P_{BBU} + P_{RRH})g + \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{n=1}^{|N_s|} \sum_{m=1}^{|M_s|} \sum_{k=1}^{|K_s|} u e_m^{s,n,k}(t) P_{RRH\_G}^{s,n,k,m,tras}(t) \quad (52)$$

其中，右边第一项是设备能耗，第二项是发送能耗。

能耗感知 C-RAN 架构的能耗模型与本文能耗模型具有相似性，最大的区别是能耗感知 C-RAN 架构在资源分配时不考虑能量共享。因此，能耗感知 C-RAN 架构能耗模型如下

$$P_{EA\_CRAN}(t) = P_{cooling,pool} + sw(t)(P_{base} + P_{port} n_{port}(t)) + \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{w=1}^{|W_s|} (P_{LC} l c_w^s(t) + P_{BBU} u p_w^s(t)) + (P_{RRH} + P_{ONU})g + \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{n=1}^{|N_s|} \sum_{m=1}^{|M_s|} \sum_{k=1}^{|K_s|} u e_m^{s,n,k}(t) P_{RRH\_G}^{s,n,k,m,tras}(t) \quad (53)$$

其中，等式右边第一项是基础冷却设施能耗，第二项是交换机能耗，第三项是激活 LC 和 BBU 的能耗，第四项是激活 ONU 和 RRH 所消耗的能量，第五项是发送能耗。

### 6.1 仿真参数设置

本文采用 Matlab R2016a 仿真平台对所提出的资源分配机制进行性能评估。为了有效评估时延性能，考虑 4 种服务，即 VoIP 业务服务、IPTV 业务服务、网页搜索服务和视频会议服务。由 C-RAN 白皮书可知，网页业务流量占总流量的 38%，视频业务流量占 45%<sup>[23]</sup>。为了简便起见，假定采用的 3 种视频业务分别各占 15%。因此，可以得出 4 种业务的分布信息，以繁华区域为例，4 种业务在繁华区域的流量变化如图 2 所示。本文考虑小规模网络场景，即设置 11 个 BBU 和 11 个小区。每个波长容量为 10 Gbit/s，BBU UP 容量为 5 Gbit/s，每个小区中的用户业务流量服从[100 Mbit/s,1 Gbit/s]之间的均匀分布。对于无线资源来说，每个子载波的波长为 15 MHz，高斯白噪声的功率谱密度是 10<sup>-10</sup> W/Hz，信道增益服从在[5,14]之间的随机分布。对于能量收集来说，每个 RRH 和 RAP-UE 收集的再生能量在[0, 5000] W 之间均匀分布<sup>[24]</sup>。

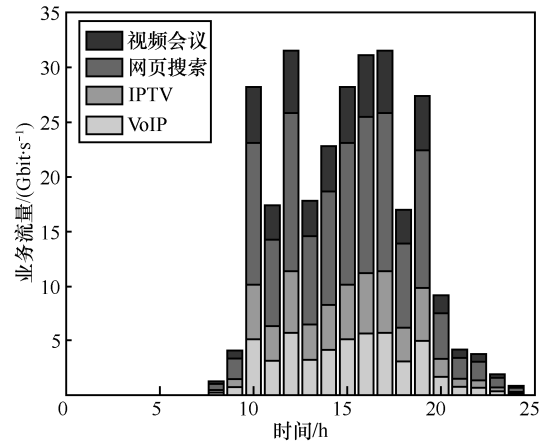


图 2 4 种业务在繁华区域的流量变化

然后，通过文献[25-26]可看出，能耗值以及 4 种延迟敏感服务的请求数据大小设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数设定	参数数值
$P_{base}, P_{port}, P_{cooling\_pool} / W$	50, 15, 500
$P_{RRH}, P_{ONU} / W$	20, 7.7
$P_{LC}, P_{BBU} / W$	5, 100
$b_{VoIP}, b_{IPTV}, b_{web}, b_{video} / MB$	3, 5, 2, 7
$T_{max}^{VoIP}, T_{max}^{IPTV}, T_{max}^{web}, T_{max}^{video} / ms$	150, 200, 1 000, 150
$T_{tras}^{MB} / \mu s$	250

而且，本文考虑动态业务场景，以一个小时为一个时间段，考虑 24 个时段的业务流量，业务请求到达时间服从泊松分布，到达时间的间隔独立且服从负指数分布。下面，对 4 种架构从能耗性能、时延性能以及吞吐量性能等 3 个方面进行仿真分析。

### 6.2 不同算法的能耗性能比较

4 种架构在小规模网络场景中一天期间的能耗比较如图 3 所示。显然，随着时间的不同，4 种架构的能耗表现出不同的特性，这是因为不同时间段内到达的业务流量不同，从而产生能量消耗不同。从整体来看，4 种架构按能耗由高到低排序分别为 D-RAN 架构、传统型 C-RAN 架构、能耗感知 C-RAN 架构和 AU-EADA 架构。

4 种架构在不同业务流量下的能耗比较如图 4 所示。显然，4 种架构的能耗均随流量的增加而增加。另外，D-RAN 架构由于在小区端单独设置 BBU 冷却设施且不具有能量收集功能，导致其能量消耗是最大的。传统型 C-RAN 架构和能耗感知 C-RAN

架构由于 BBU 池的集中，所以只有一个冷却设施，其能耗比 D-RAN 架构少。而本文分布式算法的能耗与前 3 种算法相比减少了 50%，因为所提架构中的每个 RRH 和 RAP-UE 均具有能量收集功能，可以收集来自周围环境中的可再生能源，从而减少了传统电能的消耗。

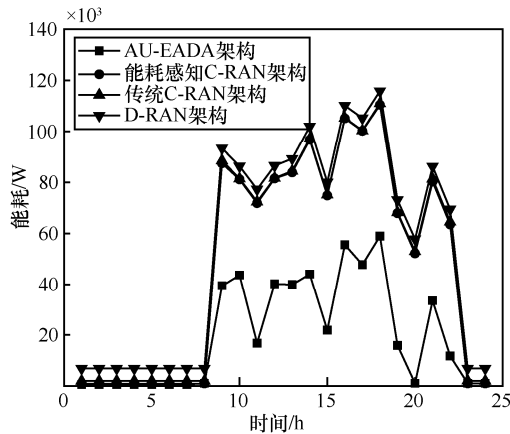


图 3 小规模网络中 4 种架构在不同时刻下的能耗比较

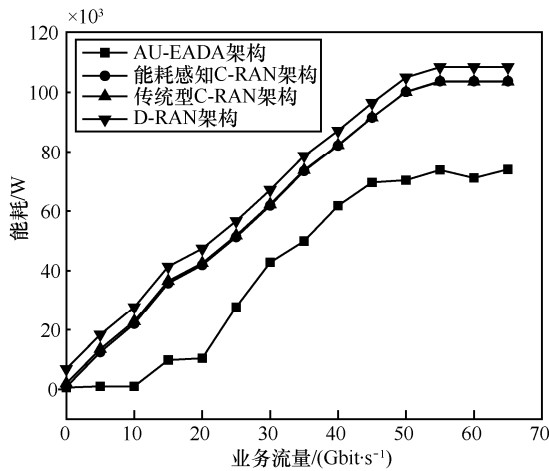


图 4 小规模网络中 4 种架构在不同业务流量下的能耗比较

### 6.3 电池容量对能耗性能的影响

本节给出分布式算法在 12 点时刻时小规模网络中电池容量对能耗的影响。从图 5 可以看出，随着电池容量的增加，能耗先呈现下降趋势，然后趋于稳定，这是因为电池容量越大，每个 RRH 和 RAP-UE 可储存的可再生能源就越多，从而导致传统能耗下降，但又因为能量收集在一定范围内，当电池容量超过范围界限时，RRH 和 RAP-UE 不能收集更多的能量，所以传统能耗趋于稳定。另外，随着能量收集上界的增加，传统能耗逐渐减少，这是因为上界越大，收集的可再生能源越多，从而传统电能的消耗越少。

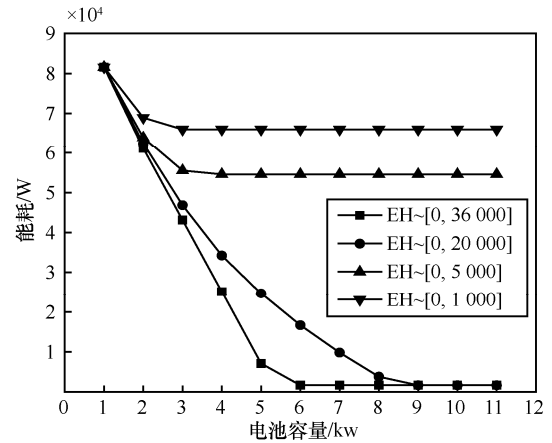


图 5 12 点时刻电池容量对所提算法能耗的影响

### 6.4 不同算法的时延性能比较

为了清晰地观察 4 种算法的时延变化趋势，本节将时延性能进行归一化处理，即归一化平均时延 = 实际平均时延 / 最大平均时延。4 种架构在小规模网络场景下不同最大平均时延

时间段的时延比较如图 6 所示。显然，随着时间的不同，4 种架构的时延同样表现出不同的特性，这是因为不同时间段内到达的业务流量不同，从而处理业务的时间不同。从整体来看，4 种架构按时延由高到低排序分别为能耗感知 C-RAN 架构、AU-EADA 架构、传统型 C-RAN 架构和 D-RAN 架构。

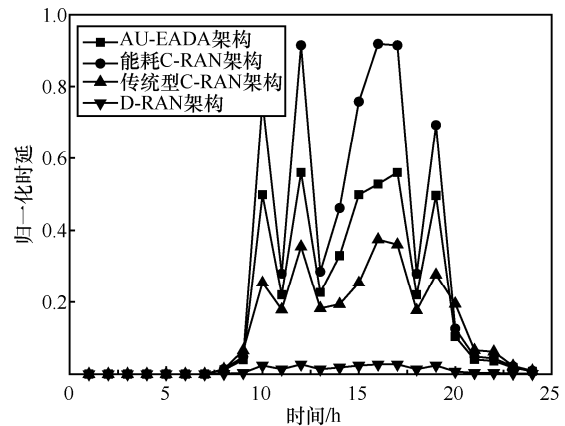


图 6 小规模网络中 4 种架构在不同时刻下的时延比较

4 种架构在不同业务流量下的时延比较如图 7 所示。显然，4 种架构的时延均随流量的增加而增加。D-RAN 架构由于 BBU 和 RRH 均在小区端，没有传输时延和集中控制器调度时延，所以 D-RAN 架构的时延是最小的。传统型 C-RAN 架构将所有 BBU 集中在中心局的 BBU 池，通过光纤传输基带信号，所以具有传输时延和调度时延；但是 BBU

池的 BBU 没有共享资源，每个小区仍需要一个专用的 BBU 和 LC 为之服务，导致所有的 BBU 均处于激活状态，所以传统型 C-RAN 架构的时延是次小的。接着，能耗感知的 C-RAN 架构通过关闭一些不必要的 BBU 去节省能耗，但同时也使相同 BBU 处理更多的业务请求，导致 C-RAN 架构的时延增加。而本文算法在考虑能耗的同时，又考虑时延的影响，采用分布式机制去合理分配资源，从而可以有效降低时延。

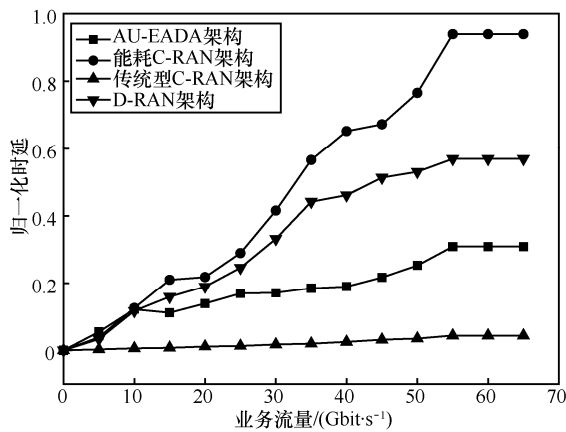


图 7 小规模网络中 4 种架构在不同业务流量下的时延比较

### 6.5 不同算法的吞吐量性能比较

本节给出 4 种架构在小规模网络场景下不同时间段的吞吐量比较。从图 8 可以看出，D-RAN 架构与传统 C-RAN 架构具有相同的吞吐量，因为 2 种架构有相似的功能，只是传统型 C-RAN 架构的 BBU 进行集中放置，但它的每个小区却仍需要一个专用的 BBU 和 LC 为之服务，因此 D-RAN 架构与传统 C-RAN 架构吞吐量相同。能耗感知 C-RAN 架构由于其其在中心局集中的 BBU 计算资源可以共享

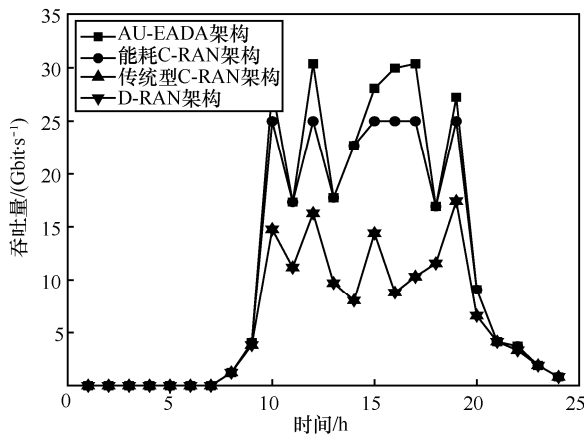


图 8 小规模网络中 4 种架构的吞吐量比较

分配，所以吞吐量优于前 2 种架构。而在本文的分布式算法中，不仅 BBU 计算资源可以共享，而且无线模块采用特殊接入模式，从而有效提高吞吐量，所以吞吐量最优。

## 7 结束语

为了解决现有虚拟化 C-RAN 资源利用率低、能耗高、用户服务质量无法得到保证等问题，本文提出了一种新的带有混合能量供电的能耗感知虚拟化 C-RAN 资源分配机制。首先，给出基于 TWDM-PON 和特殊接入模式的 C-RAN 与 NV 相联合的新框架，然后根据虚拟化 C-RAN 中各网络设备的能量来源和能量消耗情况，建立能量到达和能耗模型，最后提出一个基于异步更新的能效感知分布式优化机制解决资源分配问题，一级控制器基于负载情况公平地为不同服务类型 V-CRAN 分配总能量和资源，二级控制器针对用户的不同服务请求，为其在相应服务 V-CRAN 中基于能耗和时延最小分配计算和波长资源，三级控制器考虑能量共享和吞吐量最大为用户选择接入模式和关联 RRH，从而完成 C-RAN 网络中的整体资源优化配置，并有效地提高网络能量效率。通过仿真验证，所提出的机制与 D-RAN 架构、传统型 C-RAN 架构、能耗感知的 C-RAN 架构相比，能够有效地降低能耗和时延，提高吞吐量。

### 参考文献:

- [1] CISCO. Global Mobile data traffic forecast update, 2016–2021 White Paper[R]. San Jose: CISCO, 2017.
- [2] AROUK O, KSENTINI A, TALEB T. Group paging-based energy saving for massive MTC accesses in LTE and beyond networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(5): 1086-1102.
- [3] HOSSAIN E, HASAN M. 5G Cellular: Key enabling technologies and research challenges[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2015, 18(3): 11-21.
- [4] China Mobile Research Institute. C-RAN-the road towards green RAN[R]. Beijing: CMRI, 2011.
- [5] THOMAS P. Next generation mobile fronthaul architectures[C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2015: 1-3.
- [6] DAISUKE I, SHIGERU K, JUN-ICHI K, et al. Dynamic TWDM-PON for mobile radio access networks[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26209-26218.
- [7] LIU J J, GUO H Z, KATO N, et al. Energy consumption minimization for FiWi enhanced LTE-A HetNets with UE connection constraint[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(11): 56-62.
- [8] ZHANG D Y, CHEN Z G, REN J, et al. Energy-harvesting-aided

- spectrum sensing and data transmission in heterogeneous cognitive radio sensor network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(1): 831-843.
- [9] REN J, ZHANG Y X, DENG R L, et al. Joint channel access and sampling rate control in energy harvesting cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2017, pp(99): 1-1.
- [10] SUTO K, NISHIYAMA H, KATO N, et al. Postdisaster user location maneuvering method for improving the QoE guaranteed service time in energy harvesting small cell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 9410-9420.
- [11] MOHAMAD K, ARAFAT A-D, MOHAMED S, et al. A framework for joint wireless network virtualization and cloud radio access networks for next generation wireless networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20814-20827.
- [12] LIANG C C, YU F.R. Wireless network virtualization: a survey, some research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 358-380.
- [13] NIU B L, ZHOU Y, HAMED S-M, et al. A dynamic resource sharing mechanism for cloud radio access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 15(12): 8325-8338.
- [14] IMAD A-S, MATTEO A, HENRIK C, et al. Envisioning spectrum management in virtualised C-RAN[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017: 1-6.
- [15] ZHAO Y S, VICTOR C.M.L, ZHU C S, et al. Energy-efficient sub-carrier and power allocation in cloud-based cellular network with ambient RF energy harvesting[J]. IEEE Access, 2017, 5: 1340-1352.
- [16] ZHANG D Y, CHEN Z G, ZHOU H B, et al. Resource allocation for green cloud radio access networks powered by renewable energy[C]//2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2016: 1-6.
- [17] ZHANG D Y, CHEN Z G, ZHOU H B, et al. Resource allocation for green cloud radio access networks with hybrid energy supplies[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2): 1684-1697.
- [18] QIAO G H, LENG S P, ZHANG Y, et al. Multiple time-scale energy scheduling with energy harvesting aided heterogeneous cloud radio access networks[C]//2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), 2016: 1-6.
- [19] YANG Y. Understanding switch latency[R]. SanJose: CISCO, 2012.
- [20] CHANDRAKASAN A.P, SHENG S, BRODERSEN R.W. Low-power CMOS digital design[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1992, 27(4): 473-484.
- [21] DANTZIG G B. 回顾线性规划的起源[J]. 运筹学杂志, 1984, 3(1): 71-78.
- DANTZIG G B. Review the origin of linear programming[J]. Chinese Journal of Operations Research, 1984, 3(1):71-78.
- [22] WANG X B, THOTA S, TORNATORE M, et al. Energy-efficient virtual base station formation in optical-access-enabled cloud-RAN[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(5): 1130-1139.
- [23] CMRI. C-RAN radio access network green evolution[R]. China Mobile Research Institute, 2010.
- [24] SHENG M, ZHAI D S, WANG X J, et al. Intelligent energy and traffic coordination for green cellular networks with hybrid energy supplies[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1631-1646.
- [25] WANG X B, THOTA S, TORNATORE M, et al. Green virtual base station in optical-access-enabled cloud-RAN[C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2015: 5002-5006.
- [26] AMEL A, SOUMAYA H, LOUTFI N, et al. Minimization of delays in multi-service cloud-RAN BBU pools[C]//13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017: 1846-1850.

#### [作者简介]



王汝言(1969-), 男, 湖北浠水人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为泛在网络、多媒体信息处理等。



徐宁宁(1993-), 女, 河南漯河人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为光无线融合网络。