

引用本文:李文峰,潘强强,李博,等. 弹性光前传中的功能分割选择与资源分配优化[J]. 光通信技术, 2024, 48(5): 60–66.

弹性光前传中的功能分割选择与资源分配优化

李文峰¹, 潘强强^{1*}, 李博², 丁书浩², 赵翰林¹

(1. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 西安 710054; 2. 陕西陕煤黄陵矿业有限公司 救护消防大队, 陕西 黄陵 727307)

摘要: 为了显著提升弹性光前传(EOF)网络的能效, 提出了一种 EOF 中的功能分割选择与资源分配优化方案。该方案通过引入改进的 Lyapunov 漂移技术, 解决了功能分割与资源分配中复杂的时间平均随机优化难题, 实现了网络资源的动态高效调配。此外, 还深入探讨了天线端口数量扩增与光纤频谱粒度细化对方案性能产生的积极效应。仿真结果表明: 相较于传统的基于光前传的云无线接入网(C-RAN), 该方案不仅大幅降低了平均功耗, 降幅高达 70%, 而且确保了前传延迟维持在 250 μ s 以下, 展现了卓越的性能优势。

关键词: 弹性光网络; 前传网络; 功能分割; 资源分配

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)05-0060-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Function segmentation selection and resource allocation optimization in elastic optical pretransmission

LI Wenfeng¹, PAN Qiangqiang^{1*}, LI Bo², DING Shuhao², ZHAO Hanlin¹

(1. College of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Ambulance Fire Brigade, Shanxi Coal Huangling Mining Co., Ltd., Huangling Shanxi 727307, China)

Abstract: In order to significantly improve the energy efficiency of elastic optical forward(EOF) networks, a functional segmentation selection and resource allocation optimization scheme in EOF is proposed. This scheme solves the complex time averaged stochastic optimization problem in functional segmentation and resource allocation by introducing improved Lyapunov drift technology, achieving dynamic and efficient allocation of network resources. In addition, the positive effects of increasing the number of antenna ports and refining the fiber spectrum granularity on the performance of the scheme were also thoroughly explored. The simulation results show that compared with the traditional cloud wireless access network based on optical fronthaul (C-RAN), this solution not only significantly reduces average power consumption by up to 70%, but also ensures that the forward latency is maintained below 250 μ s, demonstrating excellent performance advantages.

Key words: elastic optical network, fronthaul network, function split, resource allocation

收稿日期: 2024-07-06。

基金项目: 陕西省重点产业创新链项目(2020ZDLGY15-07)资助; 陕西煤业化工集团有限责任公司科技研发类投资项目(2023SMHKJ-B-51)资助。

作者简介: 李文峰(1969—), 男, 工学博士, 教授, 中国矿山救护专委会副秘书长、中国煤炭工业安全科学技术学会理事、教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会协作委员。主要研究方向为矿山应急通信、光纤通信以及电路与系统。

* 通信作者: 潘强强(1998—), 男, 硕士研究生, 现就读于西安科技大学信息与通信工程专业, 主要研究方向为矿山应急通信和光纤通信。



0 引言

在第四代(4G)移动网络中, 云无线接入网(C-RAN)被引入, 其中基带功能由一个集中的基带单元池来执行。这使得小区站点的射频单元(RU)能够通过成本更低廉的硬件来实现其无线电通信功能。在 C-RAN 架构中, RU 与基带单元池之间的数据传输有着严格的延迟和带宽要求^[1]。

下一代无线网络采用了一种新的 RAN 架构, 该架构引入了集中单元(CU)和分布单元(DU)的设计。这一设计能够实现更高的频谱效率和更快的网络数据传输速率。连接 RU 到 DU 的子网络被称为“前传”

网络,而 DU 与 CU 之间的子网络则被称为“中传”网络。部分基带处理可以在 DU 中完成,以此来减轻 RU 和 CU 的处理负担^[2]。功能分割确定了无线协议栈中的一个分界点,分界点之前的基带功能在 RU 本地执行,之后的功能则在 CU 中处理。有效选择功能分割点需要了解网络状态,这可以通过软件定义网络(SDN)来实现^[3]。网络功能虚拟化(NFV)的出现使灵活的功能分割选择成为可能,流量波动和网络状态等因素可以动态地驱动功能分割的选择。NFV 让灵活选择功能分割点成为现实,流量波动和网络状态等因素能够实时影响这一选择^[4]。弹性光网络(EON)可以灵活分配频谱,并且结合光器件具备的可切片优势进行灵活交换,实现相应的功能,在实现功能的过程中还需与业务传输要求紧密连接^[5]。通过利用带宽可变转发器(BVT)和带宽可变交叉连接器(BVXC)可以提供细粒度的带宽分配。与波分复用(WDM)网络相比,EON 能够根据时变和服务质量(QoS)的流量需求重新配置传输参数,如调制格式、编码速率和子载波数量^[6]。弹性光前传(EoF)将 EON 技术应用于前传网络,通过细粒度的带宽分配和动态重新配置,实现对移动网络多样化和动态服务需求的高效支持。EoF 中的能耗问题是一个关键挑战,需要高效的资源分配方案来降低功耗^[7]。通过网络历史数据指导优化方案,结合动态调整机制和设备硬件、传输距离、带宽限制,确保方案的可行性和稳定性。综合这些因素,可以实现 EoF 的动态重配置,提升网络能效。

本文提出一种 EOF 中的功能分割选择与资源分配优化方案,旨在降低由 EOF 提供服务的 RAN 中的功耗。

1 系统模型

本文的网络架构如图 1 所示,其中 I 个小区站点覆盖一个地理区域。每个小区站点都有一个 RU, 负责无线和基带处理功能(BPF), 并通过 EOF 连接到 CU。为了简化模型, 本文不考虑 DU 和中传网络。EOF 的特点在于支持任意拓扑结构, 其光纤链路由 M 个连续频隙组成, 频隙带宽为 $W^{[8]}$ 。光节点配备了 BVT, 可在任意频谱位置执行连续频隙的切换、添加和删除操作。SDN 控制器负责确定每个 RU 的功能划分, 并在每个时间间隔 T 内调整 E-

OF 的可重新配置元素。

本文考虑了第三代合作伙伴计划(3GPP)在上行链路路径上引入的 5 种功能分割选项^[9]如图 2 所示。为了简化描述和分析,本文只考虑上行路径。

在第 n 个时间间隔内, RU_i 中的用户数为 $u_i[n]$, 每个用户 $j \in \{1, u_i[n]\}$ 通过空口接口向其对应的 RU 发送 $l_{i,j}[n]$ b/s 的流量负载。RU 的功能分割和 BVT 的工作带宽分别从 V 个不同的 3GPP 功能选项和 M 个相同带宽的频隙中选择。假设每个 RU 扇区的开销为 6.7%, 根据所选的功能分割 K , 部分 BPF 在 RU_i 本地执行, 以满足表 1 中的严格前传比特率要求。5 种功能分割及其功耗、速率和延迟值^[10]如表 1 所示。其中, R_K 为 EOF 比特率值, Γ_K 为上行链路无线电开销, L 为每个传输层的最大流量负载, Y 为传输层数。

图 1 中,每个数据流在位于 BVT 之前的队列 i 中累积,其中积压的比特等待传输到 EOF。每个 BVT 工作在连续频率间隙 $h_i[n], \dots, h_i[n] + b_i[n] - 1$ 上, $h_i[n]$ 和 $b_i[n]$ 分别表示起始频率间隙和分配给每个 BVT 的连续频谱中的频率间隙的数量。发送 BVT 通过 EOF 上的最短路径连接到与 CU 关联的接收 BVT。保护频率间隙 G 将 2 个相交路径的频谱分开。

除了严格的前传比特率要求外,每个功能分割在其到 CU 路径上的单向延迟也应低于表 1 中的最大延迟^[10]。根据所选择的功能划分,部分 BPF 将在 RU 上执行,其余的 BPF 则将在 CU 上执行。RU_i 中功能分割 K 的 BPF 消耗功率为 $\eta_A p_{i,k}[n]$, 其中 $p_{i,k}[n]$ 在表 1 给出, η_A 为维护与冷却功率耗散的比例系数, 即功率使用效率 (PUE)^[12]。功耗 P_k 的值取决于空中接口参数和

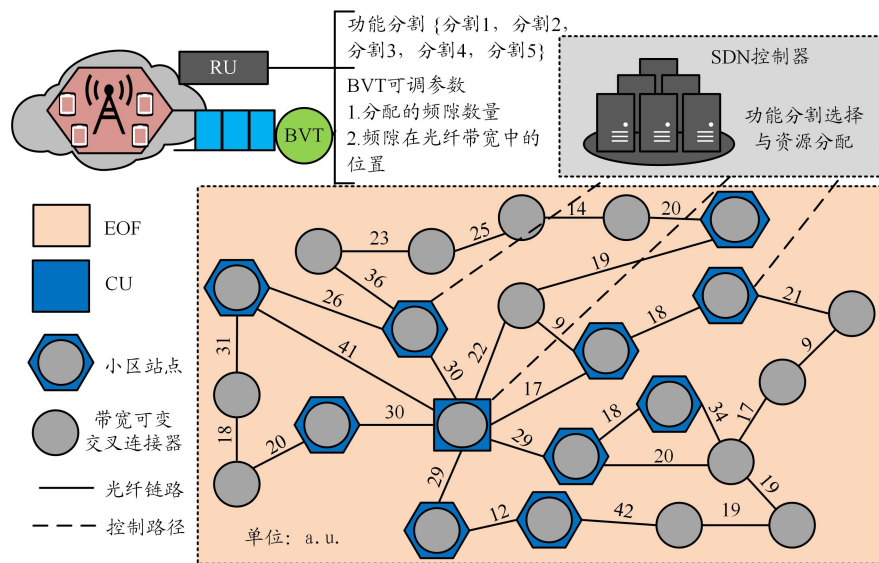


图 1 网络架构

无线协议栈规范。

剩余 BPF 在 CU 上的功耗为 $\eta_c(P_0 + P_{i,1}[n] - P_{i,k}[n])$, 其中 η_c 是 CU 的 PUE 系数。 $P_0 + P_{i,1}[n]$ 表示处理整个图 2 协议栈所需的功率^[13], P_0 为处理分组数据汇聚协议 (PDCP) 所需的功率, $P_{i,1}[n]$ 为 RU 中其它协议组成成分割 1 的功率。BVT 的功耗是 EOF 中功耗的主要来源, 大小取决于它们的配置, 由 $\eta_F b_i[n]$ (E+FC) 给出, 其中, C 为 BVT 频谱调制效率, BVT 偏置功率 E 和 BVT 功率斜率 F 为常数^[14]。同样, 在评估 BVT 的 PUE 系数 η_F 时, 也将冷却系统与维护设施额外消耗的电力需求纳入考虑, 确保了评估的全面性和准确性。

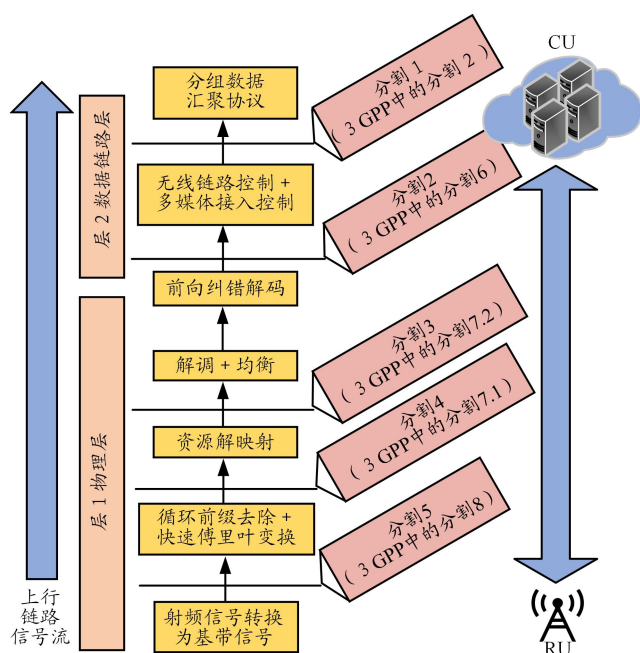


图2 功能分割选项

表1 功能分割及其功耗、速率和延迟值

功能分割	3GPP中的分割	功耗	前传比特率/(Gb/s)	最大单时延/ μ s
1	2	$P_{i,1}[n] = P_1 + P_{i,2}[n]$	$r_{i,1}[n] = R_1 \sum_{j=1}^{u[n]} l_{i,j}[n] + \Gamma_1$	1 500~10 000
2	6	$P_{i,2}[n] = P_2 \sum_{j=1}^{u[n]} \frac{l_{i,j}[n]}{LY} + P_{i,3}[n]$	$r_{i,2}[n] = R_2 \sum_{j=1}^{u[n]} l_{i,j}[n] + \Gamma_2$	250
3	7.2	$P_{i,3}[n] = P_3 \sum_{j=1}^{u[n]} \frac{l_{i,j}[n]}{LY} + P_{i,4}[n]$	$r_{i,3}[n] = R_3 \sum_{j=1}^{u[n]} l_{i,j}[n] + \Gamma_3$	250
4	7.1	$P_{i,4}[n] = P_4 + P_{i,5}[n]$	$r_{i,4}[n] = R_4 + \Gamma_4$	250
5	8	$P_{i,5}[n] = P_5 + P_6 \sum_{j=1}^{u[n]} \frac{l_{i,j}[n]}{LY}$	$r_{i,5}[n] = R_5 + \Gamma_5$	250

2 问题建模

2.1 传统 Lyapunov 方法 (简称 CLF 方法)

CLF 方法, 即 Lyapunov 漂移加惩罚技术, 是专为应对大型系统中时间平均与非时间平均双重约束而设计的一种高效随机优化手段, 旨在最小化时间平均目标函数。队列稳定性保证是时间平均约束的一个常见示例^[15]。

在本文的 EOF 系统中, 时间被划分为连续的时间间隔。在每个时间间隔内, 根据系统状态采取适当的行动, 例如配置转发器以应对系统状态的变化。最优动作是一组时间平均和非时间平均约束下的大规模随机优化问题的解决方案。通常, 给定时间间隔内的最优动作取决于系统在先前和未来时间间隔内的状态, 这种依赖性由时间平均约束来描述。时间平均约束使得动作决策变得非因果且非常复杂。CLF 方法允许将复杂的决策过程分解为一系列因果关系明确且简单的子过程, 每个子过程根据当前时间间隔和先前时间间隔的状态信息确定正确的动作。

CLF 方法的一个主要缺点是在延迟约束严格的场景中响应缓慢。尽管该方法最终能满足所需的时间平均值, 但在某些时间段内, 瞬时延迟值可能远高于其相应的时间平均值, 从而导致不可接受的延迟方差。

2.2 改进的 Lyapunov 方法 (简称 ALF 方法) 及其优化流程

为了解决 CLF 方法存在的问题, 本文对其进行优化和改进, 引入了延迟控制模块, 提出一种 ALF 方法, 其流程图如图 3 所示。在状态变量完成初始化之后, 系统将在每个时间间隔内顺序执行一系列进程。而在决策制定的关键步骤中, 瞬时优化策略确保了原问题中所有瞬时性约束的满足, 但它并未涵盖对时间平均

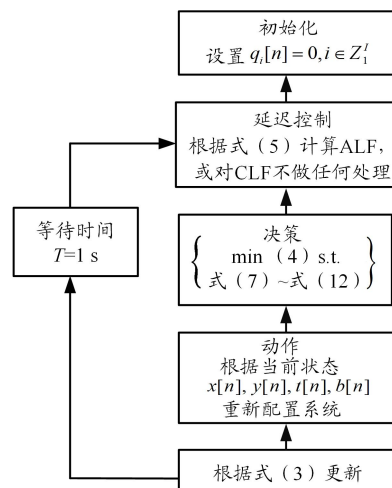


图3 ALF方法流程图

约束的处理。瞬时优化的目标函数是两项之和: 一项是由 Lyapunov 系数加权的原问题目标, 另一项是与原问题的时间平均约束相关的漂移惩罚项。状态变量包括实时反映系统状态的信息, 如队列长度和功率消耗, 这些变量用于计算 Lyapunov 函数和漂移惩罚项。在某些时间间隔内, 优先考虑漂移惩罚项可以确保系统稳定性并防止队列过长。ALF 方法通过在这些间隔内最小化漂移惩罚项来控制队列长度, 保证系统在长期运行中的稳定性和效率。解决瞬时优化后, 确定适当的动作并相应地重新调整系统。最后, 在更新状态时, 状态变量的值通过一些涉及系统当前和先前状态以及所采取动作的递归表达式来更新。递归更新表达式和漂移惩罚项之间的相互作用确保了原始问题的时间平均约束得到满足。

对于所描述的 EOF 系统模型, 本文使用网络拓扑、用户数量 $u_i[n]$ 和用户流量 $l_{i,j}[n]$ 作为输入, 将 BVT 的功能分割和配置作为输出, 以便在满足物理约束的同时将时间平均总功耗降至最低。ALF 方法将优化问题分解成若干简单、可处理且相互关联的子优化问题。优化二进制变量 $x_{i,k}[n]$ 、 $y_i[n]$ 、 $t_{i,r}[n]$ 以及非负整数变量 $h_i[n]$ 、 $b_i[n]$ 。若 RU_i 在时间间隔 n 中使用功能分割 K , 则 $x_{i,k}[n]$ 为 1, 否则为 0; 若 RU_i 的 BVT 在时间间隔 n 中处于激活状态, 则 $y_i[n]$ 等于 1, 否则为 0。相对频谱位置 $t_{i,r}[n]$ 在 $h_i[n] \leq h_r[n]$ 的时间间隔 n 中取值为 1, 否则取 0。时间间隔 n 内的总功耗 $P[n]$ 为

$$P[n] = \sum_{j=1}^J \{ \eta_F b_j[n] (E+FC) + \eta_A \sum_{k=1}^K x_{i,k}[n] p_{i,k}[n] + \eta_C \sum_{k=1}^K x_{i,k}[n] (P_0 + p_{i,j}[n] - p_{i,k}[n]) \} \quad (1)$$

其中, $x_{i,k}[n]$ 为选择的功能分割, $p_{i,k}[n]$ 为功能分割 K 的功耗。将转发器、RU 和 CU 的功耗相加, 作为主要与流量相关的功耗来源。根据所选的功能分割, 前传到比特 $a_i[n]$ 在间隔 n 中到达队列 i , $a_i[n]$ 与前传提供比特 $s_i[n]$ 可根据式(2)计算。

$$a_i[n] = T \sum_{k=1}^K x_{i,k}[n] r_{i,j}[n] \quad (2)$$

$$s_i[n] = TW C b_i[n] \quad (3)$$

其中, $i \in Z_1^J$, T 为时间间隔宽度, W 为频隙带宽, $r_{i,j}[n]$ 为前传比特率。理想情况下, 如果对于时间间隔序列 $n=1, 2, \dots, N$, RU 中的用户数量 $u[n]$ 和用户流量需求 $L[n]$ 是预先已知的, 则整个资源块可以通过非因果公

式联合优化, 对应的优化策略可以表示为问题 S_1 。

$$S_1: \min_{x[n], y[n], d[n], b[n], a_i[n], n \in Z_1^N} \bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathcal{E}\{p[n]\} \quad (4a)$$

$$\text{s.t. } q_i[n+1] = \max\{q_i[n] + a_i[n] - s_i[n], 0\} \quad (4b)$$

$$\bar{a}_i \leq \bar{s}_i \quad (4c)$$

$$h_i[n] + b_i[n] \leq M \quad (4d)$$

$$a_i[n] - s_i[n] \leq D_i \quad (4e)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{i,k}[n] = 1 \quad (4f)$$

$$W b_i[n] \leq B y_i[n] \quad (4g)$$

$$t_{i,r}[n] + t_{r,i}[n] = 1 \quad (4h)$$

$$h_i[n] + b_i[n] + G \leq h_r[n] + M(4 - t_{i,r}[n] - y_i[n] - y_r[n] - Q_{i,r}) \quad (4i)$$

其中, $i' \in Z_1^J$ 且 $i \neq i'$ 。式(4a)中的目标函数 $\bar{p}$ 是随机变量 $u_i[n]$ 和 $l_{i,j}[n]$ 期望的时间平均总功耗, $p[n]$ 为总功耗。队列积压 $q[n]$ 由式(4b)递归更新, 队列稳定性由约束式(4c)决定, 保证每个队列的平均服务比特率大于等于相应的平均到达比特率^[15]。式(4c)中, $\bar{a}_i$ 和 $\bar{s}_i$ 的计算与 $\bar{p}$ 具有相同的表达式。式(4d)保证所分配的时隙保持在光纤带宽内。为了满足严格的前传延迟要求, 式(4e)将每个间隔 n 中队列 i 的存储比特数 $a_i[n] - s_i[n]$ 保持在延迟 D_i 以下。每个 RU 恰好选择一个被式(4f)分割的功能。式(4g)中, 如果 RU_i 的 BVT 在时间间隔 n 内不被激活, 即 $y_i[n] = 0$, 则不占用频隙; 否则 $y_i[n] = 1$, 则占用的带宽小于等于最大 BVT 带宽 B 。分配给每对 BVT 的频隙的相对位置由式(4h)给出。式(4i)在分配给 RU_i 和 i' 的 BVT 的频率间隙之间放置最少 G 个保护频率间隙, 其中相交的最短路径 $Q_{i,r} = 1$ 表示最少有一条公共链路。

式(4a)~式(4i)具有很强的通用性和灵活性, 可以包含更多关于路由、容量、信噪比、服务质量、网络切片等约束^[16]。除了与 N 成正比的大量约束和变量之外, 非因果结构使得所构建的优化公式难以在实际中部署。本文采用 CLF 方法可以将该公式近似为一系列因果序列的简单子优化问题, 这些子优化问题通过一些递归更新的方程相互关联。在每个时间间隔 n , SDN 控制器处理式(4d)~式(4i)和目标函数如下的优化问题 S_2 。

$$S_2: \min_{x[n], y[n], d[n], b[n], a_i[n]} V p[n] + \sum_{i=1}^I q_i[n] (a_i[n] - s_i[n]) \quad (5)$$

求解式(5)后,根据式(4b)更新队列长度,初始化 $q_i[n]=0$ 。由于式(4e)的存在,这种逐步优化与数学收敛证明所需的严格条件有所偏离。但是在许多实际场景中,它仍然接近由 Lyapunov 系数 V 控制的时间平均总功耗 $\bar{p}^{[17]}$ 。式(5)中的惩罚项与式(4b)的相互作用确保了式(4c),从而保证了队列的稳定性。为了解决 CLF 方法无法满足 EOF 所需的严格延迟问题,本文增加了式(4e)。为了进一步控制延迟要求,式(4e)中的 D_i 可以根据已知的状态参数来选择如式(6)所示,第 i 个 RU 的平均数据速率 U_{vi} 如式(7)所示。

$$D_i = D_0 + \alpha \max\{v_i - v_0, 0\} \quad (6)$$

$$U_{vi} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{u_i[n]} l_{i,j}[n] \quad (7)$$

其中,延迟配置 D_0 、延迟配置因子 α 以及延迟配置偏移 v_0 均为常数。若采用 CLF 方法,到达的比特会在队列中积累,直到积压使得式(5)中的惩罚项占主导地位。此时,优化过程必须服务队列以减少惩罚项。如果数据速率和相应的到达速率较低,惩罚项需要很长时间才能变得显著,这会导致不可接受的延迟。式(4c)在式(4e)中收紧 D_i ,使惩罚项不够显著也能加速队列服务。另一方面,当数据速率增加时,式(4c)可以使 D_i 取得较高值。这使得式(4e)得以放松,从而通过避免匆忙处理队列来提高功率效率。对于高数据速率,队列积压的快速增长使惩罚项的作用变得显著,并迫使队列积压在可接受的延迟范围内得到处理。

3 仿真结果

3.1 收敛性仿真分析

本文通过应用图 1 的网络拓扑对所提出方案的性能进行评估。其中,RU 数量 $I=10$,每个 RU 连接到一个 CU。假设链路传播延迟系数为 $5 \mu\text{s}/\text{km}$ 。每个 RU 中的用户数量服从平均值为 ρ 的泊松分布。用户的流量每个负载独立且都服从对数正态分布,平均值为 μ ,标准差为 σ 。因此,每个 RU 的总流量负载为复合泊松分布,流量负载均值 $\nu=\rho\mu$,标准差为 $\sqrt{\rho} \exp(\mu+\sigma^2)$ 。变化系数 G_{cv} 为标准差与平均值的比值,表示每个 RU 中流量的变化情况。通过调整 ρ 可以产生不同的平均流量负载 ν ,并通过调整 μ 和 σ 保持所需的 G_{cv} 。默认情况下, $G_{cv}=2$ 。当固定 μ 和 ρ 的值时,改变 σ 可以在固定的 ν 下生成不同的 G_{cv} 。

仿真参数设置为:空中接口带宽为 100 MHz、采样频率为 153.6 MHz、4 个天线端口、4 个传输层、无信道编

码、64 正交幅度调制(64QAM)、采样位宽为 16, R_k 为 1.067、1.067、7.68、11.47、20.97, RU 功率 P_b 为 14.2、5.8、160、30、40、100、180, Γ_k 为 0.025 6、1.4084、0.128、0.86、0。在这种配置下,每个传输层的最大可接收上行链路流量负载 L 为 375 Mb/s。设置 D_0 为 0.1 Mb, α 为 2.4 s, v_0 为 50 Mb/s,以保持排队延迟在几微秒内,从而将包括传播延迟在内的前传链路总延迟控制在 $250 \mu\text{s}$ 以下。为满足表 1 中所考虑的功能分割严格的延迟要求,平均排队延迟通过 Little's 定理计算^[15]。针对所考虑的网络拓扑预先计算从每个 RU 到 CU 的最短路径,然后通过查找公共链路的最短路径来确定相交的最短路径 $Q_{i,i}$ 。

仿真实验在配备 Core i7-9700K 处理器和 16 GB 物理内存的台式计算机上运行,每次迭代中解决优化问题大约需要 28 ms。使用 YALMIP 在 Matlab 中对优化问题进行建模,CPLEX 用于在 $t=1 \text{ s}$ 的情况下,对具有 $N=200$ 个时间间隔的优化模型进行数值求解。

本文对 ALF 方法的收敛性的相关数值进行验证,结果如图 4 所示。可以看出,在初始瞬态之后,各功率曲线收敛到恒定值,符合预期收敛。

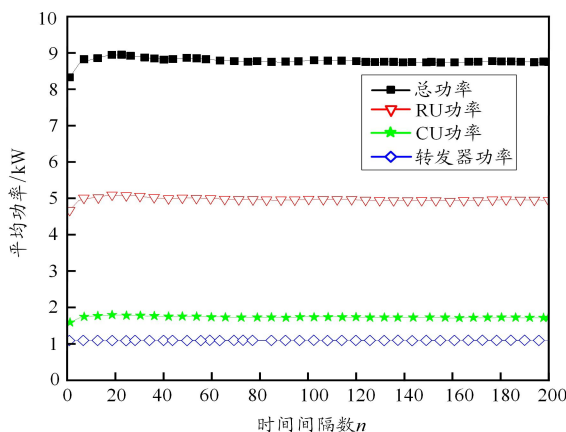


图 4 收敛性验证

3.2 动态方案的节能效率仿真分析

采用集中式功能分割要求更高的前传数据速率,这将导致 EOF 消耗大量功率。CU 的集中化使得 BPF 的功耗降低。相比之下,采用相对集中的功能分配策略能够有效降低前传所需的数据速率,从而显著减少 EOF 中的功耗。BPF 是在具有较高 PUE 的 RU 上实现的,其功耗会增加。因此,需要在 EOF 和 BPF 的功耗之间取得平衡,这种平衡由所选功能分割动态控制。本文的优化方法可以灵活地改变功能分割类型和 EOF 配置,以利用这种权衡关系来最小化总功耗。

当只有 EOF 可以灵活地重新配置而功能分割部分固定不变时,这种方案被称为半刚性方案;当既能

灵活地重新配置 EOF 又能灵活调整功能分割时,这种方案则被称为动态方案,即本文提出的方案。

在平均 RU 流量下,动态方案和半刚性方案的节能效率如图 5 所示。可以看出,动态方案和半刚性方案最高可获得 70% 的节能效率。由于需要更多的处理能力来处理更高的流量负载,因此节能效率会随着平均 RU 流量的增加而下降。在半刚性方案中,实施功能分割将会导致节能效果下降。当半刚性方案采用功能分割 1 时,与动态方案相比,其节能效果会降低 5%~11%。然而,在半刚性方案中固定选择功能分割 5 时,其节能效果则与动态方案几乎相当。但是,这种仿真结果并不适用于流量负载和网络配置变化较大的场景中。

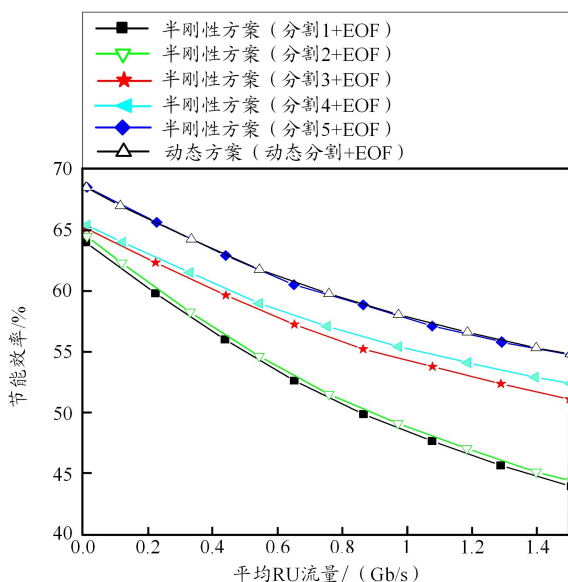


图5 在平均RU流量下,2种方案的节能效率

在变化RU流量下,动态方案和半刚性方案的节能效率如图6所示。图中RU负载为全部流量容量的三分之一。可以看出,随着变化RU流量增加,功耗节能最多提高3%。这是因为在流量波动加剧的情况下,灵活性的正面效应变得尤为显著。

3.3 技术发展对动态方案节能效率的影响

本文提出的动态方案的节能效果随着技术的发展而变化,变化情况如图7所示。红色曲线对应传统技术情况,其参数在仿真设置时给出。通过细化频谱资源的分配粒度,可以更有效地利用频谱资源,进而实现功耗的降低。可以看出,当频隙带宽 $W=3.125$ GHz 时,比传统技术情况节省了 2% 的功耗。当 RU 维护设施效率 $\eta_A=1.7$ 时,比传统技术情况节省了 4% 的功耗。由于高阶调制格式的 BVT 只需分配较少的频隙数就能保证严格的前传速率,因此其功耗较低。当 BVT 采

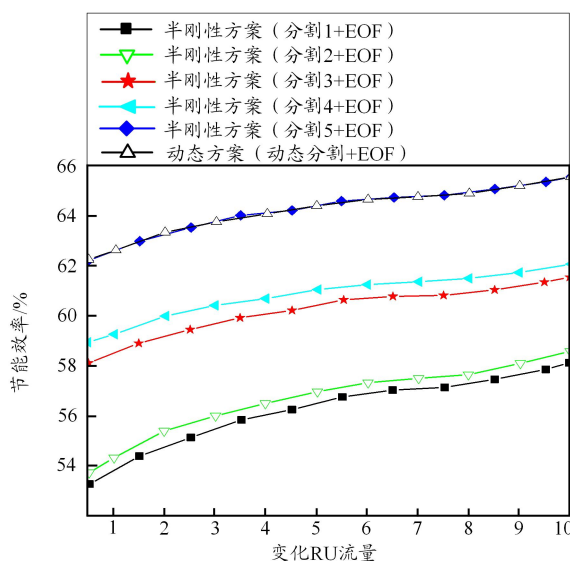


图6 在变化RU流量下,2种方案的节能效率

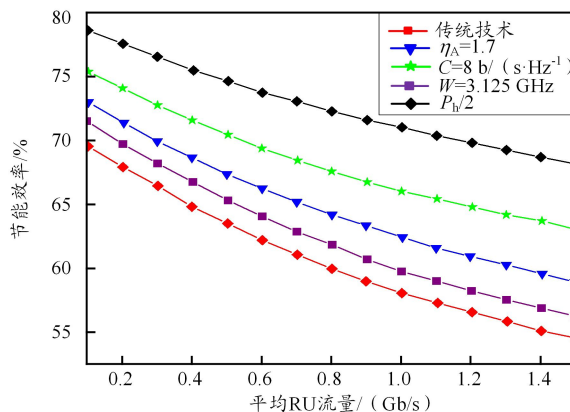


图7 在平均RU流量下,新技术对动态方案节能效率的影响

用更高阶调制格式时(频谱效率 $C=8$ b/(s·Hz⁻¹)的双极化 16QAM),比传统技术情况节省了 15% 的功耗。当基带处理能力加倍等效为将 RU 功率 P_h 减半,比传统技术情况节省了 12% 的功耗。

为了在保证 5G 网络高数据速率的同时降低 BPF 功耗,本文设计一种 5G 网络方案,该方案设定频隙带宽 $W=3.125$ GHz, Y 值为 8,天线端口数量增加至 8 个,并将 P_h 值减半,仿真结果如图 8 所示。可以看出,采用功能分割 5 的半刚性方案比动态方案的节能效率差 10%。在平均 RU 流量低于 80 Mb/s 的情况下,功能分割 1 和 2 的节能效率优于功能分割 5,这是因为它们的带宽要求较低,只需分配 1 个频率间隙即可完全满足功能分割 5 的要求。

同时,变化RU流量对2种方案的节能效率的影响如图9所示。可以看出,动态方案的节能效果最多可提高4%。

李文峰,潘强强,李博,等:弹性光前传中的功能分割选择与资源分配优化

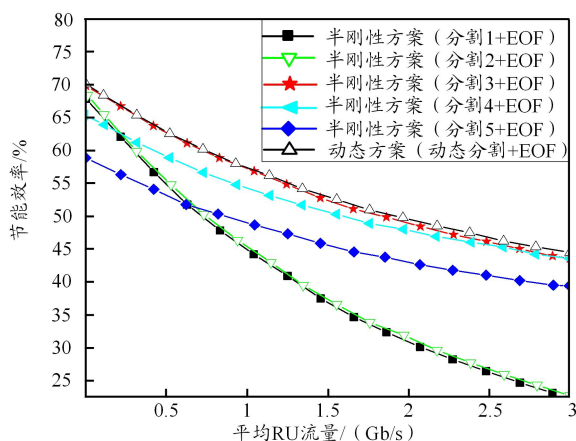


图8 改进技术下平均RU流量对2种方案节能效率的影响

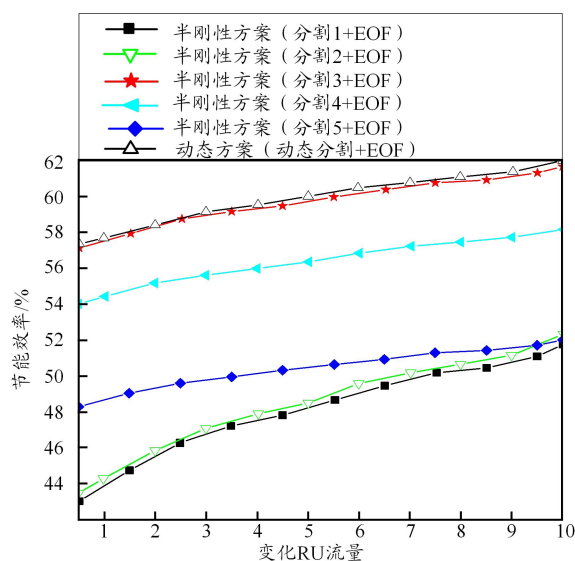


图9 改进技术下变化RU流量对2种方案节能效率的影响

在所有仿真场景中,EOF延迟均保持在 $250\ \mu\text{s}$ 以下,这展示了ALF方法在延迟控制方面的卓越性能。采用更复杂的系统模型和更细致的约束条件有望进一步将实际改进值推向更接近理论上限的水平。

4 结束语

本文提出了一种EOF中的功能分割选择和资源分配优化方案,该方案旨在满足物理限制的情况下最小化系统总功耗。采用ALF方法在相互关联的简单优化链中,对联合功能分割选择和资源分配的复杂优化问题进行了数值求解,同时保证了极低的排队延迟。实验结果表明:半刚性方案和动态方案的节能效率为50%~70%。节能效果源于该方案在EOF配置和功能分割选择上所具备的灵活性。这种灵活的功能分割方法在满足EOF上的速率需求与CU中BPF的高效集中处理之间取得了平衡。与功能分割固定的竞争方案

相比,采用灵活功能分割的网络元素升级可以提高10%的能效。

参考文献:

- [1] LARSEN L M P, CHECKO A, CHRISTIANSEN H L. A survey of the functional splits proposed for 5G mobile crosshaul networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 21(1): 146–172.
- [2] 罗卓鸿. 5G网络架构标准化进展[J]. 通讯世界, 2019, 26(2): 6–7.
- [3] PARK K, SUNG S, KIM H, et al. Technology trends and challenges in SDN and service assurance for end-to-end network slicing[J]. Computer Networks, 2023: 109908.
- [4] 赵季红,冯晴,王智,等. 面向多业务场景的端到端网络切片安全部署算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(4): 1421–1428.
- [5] 朱红杰,何林宏,苏蓉,等. 弹性光网络中能耗与QoS均衡的路由算法分析[J]. 长江信息通信, 2021, 34(10): 151–153.
- [6] 陈亚鹏,刘朋矩,周振宇,等. 面向业务可靠承载的电力弹性光网络自主协同决策[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5821–5831.
- [7] GU J, ZHU M, WANG Y, et al. Resource-efficient and QoS guaranteed 5G RAN slice migration in elastic metro aggregation networks using heuristic-assisted deep reinforcement learning[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(11): 854–870.
- [8] SUDHAKAR, KHAN A M, BATHAM D. Future generation elastic optical networks: a state-of-art review[C]//Springer Nature Singapore. Proceedings of International Conference on Data Science and Applications. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 397–410.
- [9] MARSCH P, DA SILVA I, BULAKCI O, et al. 5G radio access network architecture: design guidelines and key considerations[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(11): 24–32.
- [10] DÖTSCH 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.
- [11] 高音,韩济任,刘壮. NR中集中式网元和分布式网元架构现状与进展[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(1): 73–82.
- [12] DEBAILLIE B, DESSET C, LOUAGIE F. A flexible and future-proof power model for cellular base stations[C]//IEEE. Proceedings of 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Glasgow: IEEE, 2015: 1–7.
- [13] MATOUSSI S, FAJJARI I, COSTANZO S, et al. 5G RAN: functional split orchestration optimization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(7): 1448–1463.
- [14] ZHU Q, YU X, ZHAO Y, et al. Auxiliary-graph-based energy-efficient traffic grooming in IP-over-fixed/flex-grid optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(10): 3011–3024.
- [15] NEELY M. Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems[M]. Springer Nature, 2022.
- [16] HADI M, PAKRAVAN M R, AGRELL E. Dynamic resource allocation in metro elastic optical networks using Lyapunov drift optimization[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(6): 250–259.
- [17] HADI M, AGRELL E. Joint power-efficient traffic shaping and service provisioning for metro elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(12): 578–587.