

龚子超,赵鑫.一种5G IAB资源分配与链路保护算法[J].智能计算机与应用,2025,15(10):150-155. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.251023

一种5G IAB资源分配与链路保护算法

龚子超¹, 赵 鑫²

(1南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003; 2中国电信股份有限公司 徐州分公司, 江苏 徐州 221003)

摘要: 针对5G接入和回程一体化(IAB)的网络可靠性问题,提出一种基于RSRP的1:1链路保护(RSRPLP)基本算法,以应对无线回程链路的突发中断,提高服务质量(QoS)。考虑IAB网络的资源分配,采用基于负载的动态带宽分配策略,推导了多跳IAB网络平均业务吞吐量的计算公式。进一步提出了一种基于资源分配的1:1链路保护(RALP)算法,以吞吐量最大为目标求取备份链路。针对算法的保护能力,设置2种复杂程度不同的拓扑场景来进行验证。数值仿真结果显示RALP算法可以覆盖所有的单链路故障,同时能将吞吐量提高23.9%。与RSRPLP算法相比提高了9.3%,展现出优越性能。

关键词: 接入和回程一体化; 资源分配; 多跳; 链路保护

中图分类号: TN915 文献标志码: A 文章编号: 2095-2163(2025)10-0150-06

A resource allocation and link protection algorithm for 5G IAB

GONG Zichao¹, ZHAO Xin²

(1 School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2 Xuzhou Branch, China Telecom Stocks Co., Ltd., Xuzhou 221003, Jiangsu, China)

Abstract: With regard to the problem of the reliability of integrated access and backhaul network, a basic RSRP-based link protection algorithm is proposed to cope with the sudden interruptions of wireless backhaul links and improve QoS. Considering the resource allocation of IAB networks, a dynamic load-based bandwidth allocation strategy are used to derive the formulas for calculating the average service throughput of multi-hop IAB network. Further, A RA-based 1:1 link protection algorithm is proposed to select the backup link with the objective of maximizing the throughput. To verify the protection capability of the algorithm, two topology scenarios with different levels of complexity are set. Numerical simulation results show that the RALP algorithm can cover all single-link failures while improving the throughput by 23.9% compared with the unprotected condition. This is an additional 9.3% improvement over the RSRPLP algorithm. Therefore, the superiority of the algorithm is demonstrated.

Key words: integrated access and backhaul; resource allocation; multi-hop; link protection

0 引言

移动流量需求的不断增长需要基站的密集部署。接入和回程一体化(Integrated Access and Backhaul, IAB)技术是一种有前景的解决方案。与传统的光纤回程网络相比,IAB网络有着更高的部署灵活性和更低的部署成本^[1]。

得益于5G新无线电(New Radio, NR)的宽频带,运营商可以将整个无线电资源分成2部分,分别用于无线回程和接入。IAB网络由IAB-donor和IAB-node组成,两者使用相同的基础设施和无线信

道资源。IAB-donor既为IAB-node提供无线回程功能,又为用户提供接入功能。

目前的研究大多集中在提高IAB网络有效性上^[2-5]。文献[6]研究了不同回程模式的最优接入/回程频谱分配问题。文献[7]开发了一个基于IAB网络的分析框架,以准确地描述其下行速率覆盖概率,并且利用此框架研究了3种回程带宽分配策略的性能:平均划分、基于瞬时负载划分和基于平均负载划分。文献[8]考虑了一个更加普遍的模型,并且提出了2种带宽分配策略:

(1)综合资源分配。为接入和回程动态分配

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX21_0724)。

作者简介:龚子超(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:5G接入与回程一体化,网络规划。Email:gzc_work1@163.com;赵鑫(1995—),男,硕士,主要研究方向:低轨卫星通信与网络规划。

收稿日期:2024-01-23

哈尔滨工业大学主办 ◆专题设计与应用

带宽;

(2) 正交资源分配。为接入和回程带宽分配定义了一个静态分区。

文献[9]研究了 IAB 毫米波蜂窝网络的带宽和功率分配,考虑了用户数据速率的要求,以提高吞吐量。然而这些研究都没有考虑到 IAB 网络可靠性问题。

与光纤回程链路相比,无线回程链路传输会出现严重的自由空间路径损耗和穿透损耗^[10-11],链路质量远不及光纤回程链路,导致突发中断的概率上升。若中断的回程链路没有得到及时的恢复,将影响大范围内所有用户的业务。因此为了保证服务质量(Quality of Service, QoS),需要链路保护^[12-13]。文献[14]提出了一种在 5G 毫米波网络中结合概率延迟约束和流量分割技术的多跳多路径调度技术支持可靠的通信。文献[15]开发了一个能够在半双工和干扰约束下联合传输路径选择和无线电资源分配的优化框架,并验证了与单跳系统相比,多跳 IAB 拓扑在端到端 UE 吞吐量方面具有优势。本文考虑了多跳的 IAB 拓扑,提出一种基于资源分配(Resource Allocation, RA)的链路保护(RA-based Link-Protection, RALP)算法用于解决无线回程链路的突发中断,同时提高业务吞吐量,满足 QoS 需求。

1 系统模型

1.1 应用场景

该场景为带备份链路的多跳 IAB 网络。带备份链路的多跳 IAB 网络如图 1 所示。考虑了多个 IAB-donor,表示为 $D = \{1, 2, 3, \dots, M\}$,所有的节点都可以无线连接到 IAB-donor,只有 IAB-donor 可以通过光纤连接到核心网络。3GPP 支持多跳回程的 IAB,而回程跳数的增加会使回程带宽占用更多的可用带宽,影响吞吐量,增加延迟,在基站密集部署的情况下,两跳回程已经能够满足覆盖需求,因此这里只将讨论扩展到两跳回程的 IAB 上。以 IAB-donor 为父节点的 IAB-node 称为 FIAB-node,将其表示为 $FN = \{1, 2, 3, \dots, I\}$,以 FIAB-node 为父节点的 IAB-node 称为 SIAB-node,将其表示为 $SN = \{1, 2, 3, \dots, J\}$ 。IAB-node 可以连接一个 IAB-donor 作为工作链路,并将与另一个 IAB-donor 或 FIAB-node 的连接作为备份链路。当工作链路发生链路故障时,可以切换到备份链路,保证传输不中断。假设所有的无线链路都在毫米波波段运行。

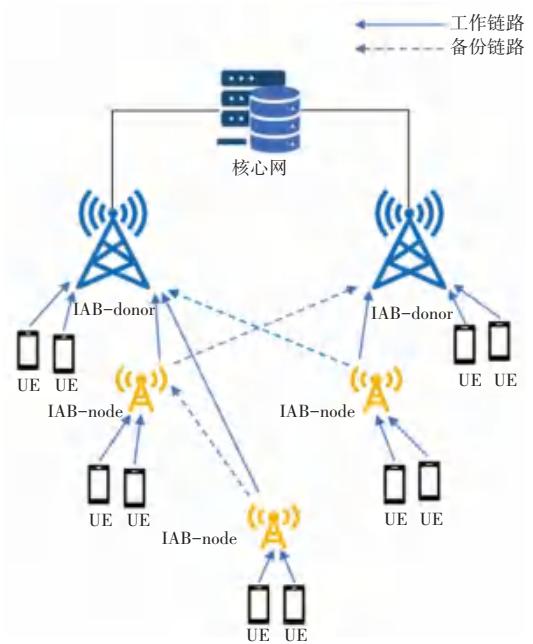


图 1 带备份链路的多跳 IAB 网络

Fig. 1 Multi-hop IAB network with backup link

1.2 毫米波传播模型

毫米波信号很容易受到网络中的建筑物和树木等障碍的影响。毫米波信号的视距(Line-Of-Sight, LOS)和非视距(Non-Line-Of-Sight, NLOS)路径损耗特性存在显著差异。因此,在分析中应同时包括 LOS 和 NLOS 的路径损耗特征。使用文献[16]中的 3GPP 指数阻塞模型,每条链路为 LOS 的概率为:

$$P_{\text{LOS}}(d) = e^{-\frac{d}{\kappa}} \quad (1)$$

其中, d 表示发送机到接收机的距离, κ 表示 LOS 范围常数,这由阻塞物的几何形状和密度决定。因此,自由空间路径损耗被定义为:

$$\text{PL}(d) [\text{dB}] = \gamma + 10 \beta \log_{10}(d) + \chi \quad (2)$$

其中, χ 表示阴影衰落项,满足正态分布, $\chi \sim (10, \xi^2)$; d 表示发射机和接收机之间的距离。本文的分析包含了 LOS 和 NLOS 不同的 β 和 ξ 值。

由于毫米波信号波长较小,路径损耗大,因此可以利用发射机和接收机的定向波束形成来补偿路径损耗。假设 IAB-donor 和 IAB-node 都配备定向天线,天线增益被确定为转向角 θ ^[5] 的函数,如下所示:

$$G(\theta) = \begin{cases} G_{\max}, & |\theta| \leq \theta_b \\ G_{\min}, & |\theta| > \theta_b \end{cases} \quad (3)$$

其中, θ_b 表示主瓣宽度; G_{\max} 表示期望链路上的有效增益; G_{\min} 表示侧瓣增益。因此,从发射功率为 P_t 的发射机接收到的功率为:

$$P_r = P_t \cdot G \cdot \text{PL}^{-1} \quad (4)$$

1.3 吞吐量模型

为了更好地利用可用带宽和提高频谱效率,对带宽资源的分配进行了研究^[4]。本次研究基于负载的回程带宽分配策略,以及在回程带宽和接入带宽之间采取一种动态的带宽分配策略。IAB-donor 根据 IAB-node 上的负载按比例分配带宽,为回程链路和接入链路分配的带宽的比例可以表示为:

$$\begin{aligned}\varphi_{m,i}^{\text{BH}} &= \frac{K_i + \sum_{j=1}^J K_j l_{i,j}^{(2)}}{K_m + \sum_{i=1}^I K_i l_{m,i}^{(1)} + \sum_{j=1}^J K_j l_{i,j}^{(2)}} l_{m,i}^{(1)} \\ \varphi_m^{\text{AC}} &= \frac{1}{K_m + \sum_{i=1}^I K_i l_{m,i}^{(1)} + \sum_{j=1}^J K_j l_{i,j}^{(2)}}\end{aligned}\quad (5)$$

其中, K_m 表示第 m 个 IAB-donor 上的用户数量; K_j 表示第 j 个 FIAB-node 上的用户数量; K_i 表示第 i 个 SIAB-node 上的用户数量; $l_{m,i}^{(1)}$ 和 $l_{i,j}^{(2)}$ 是二进制变量, 分别表示从 D_m 到 FN_i 的链路和从 FN_i 到 SN_j 的链路。

在 IAB 网络中, 节点受到半双工约束, 这意味着节点不能使用相同的频谱在回程和接入链路上同时发送和接收数据包。因此, FIAB-node 动态地给其相关联的用户和 SIAB-node 分配带宽, 对此可以表示为:

$$\begin{aligned}\varphi_{m,i,j}^{\text{BH}} &= l_{m,i}^{(1)} (1 - \varphi_{m,i}^{\text{BH}}) \frac{K_j l_{i,j}^{(2)}}{K_i + \sum_{j=1}^J K_j l_{i,j}^{(2)}} \\ \varphi_{m,i}^{\text{AC}} &= l_{m,i}^{(1)} (1 - \varphi_{m,i}^{\text{BH}}) \frac{1}{K_i + \sum_{j=1}^J K_j l_{i,j}^{(2)}}\end{aligned}\quad (6)$$

同理可得 SIAB-node 动态地给接入链路分配带宽的比例为:

$$\varphi_{m,i,j}^{\text{AC}} = l_{m,i}^{(1)} l_{i,j}^{(2)} (1 - \varphi_{m,i,j}^{\text{BH}}) \frac{1}{K_j} \quad (7)$$

假设所有的 IAB-donor 和 IAB-node 都配备了可操纵的定向天线, 并且用户设备都配有全向天线。假设完美的波束对齐, 回程和接入链路的有效增益分别为 G_{\max}^2 和 G_{\max} 。文中假设系统是受噪声限制的, 即在任何接收机上, 与具有功率谱密度 N_0 的热噪声相比, 扰扰可以忽略不计。因为具有窄光束的毫米波频率是受噪声限制的, 而不是受干扰限制的^[17]。IAB-donor、FIAB-node 和 SIAB-node 的回程链路和接入链路的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)定义公式为:

$$\begin{aligned}\text{SNR}^{\text{BH}} &= \frac{P G_{\max}^2 PL^{-1}}{N_0 \varphi_B^{\text{BH}}} \\ \text{SNR}^{\text{AC}} &= \frac{P G_{\max} PL^{-1}}{N_0 \varphi_B^{\text{AC}}}\end{aligned}\quad (8)$$

其中, B 表示可用带宽, N_0 表示功率谱密度为 -174 dBm/Hz 的加性高斯白噪声。

由于接入链路的速率是被回程链路所限制的。因此, 回程链路和接入链路的可实现下行速率可以表示为:

$$\begin{aligned}R_{m,k_m}^{\text{AC}} &= \varphi_m^{\text{AC}} B \log_2 (1 + \text{SNR}_{m,k_m}^{\text{AC}}) \\ R_{m,i}^{\text{BH}} &= \varphi_{m,i}^{\text{BH}} B \log_2 (1 + \text{SNR}_{m,i}^{\text{BH}}) \\ R_{m,i,k_i}^{\text{AC}} &= \min \left(\varphi_{m,i}^{\text{AC}} B \log_2 (1 + \text{SNR}_{m,i,k_i}^{\text{AC}}), \frac{R_{m,i}^{\text{BH}}}{K_i + \sum_{j=1}^J K_j l_{i,j}^{(2)}} \right) \\ R_{m,i,j}^{\text{BH}} &= \min \left(\varphi_{m,i,j}^{\text{BH}} B \log_2 (1 + \text{SNR}_{m,i,j}^{\text{BH}}), \frac{R_{m,i}^{\text{BH}} \sum_{j=1}^J K_j l_{i,j}^{(2)}}{K_i + \sum_{j=1}^J K_j l_{i,j}^{(2)}} \right) \\ R_{m,i,j,k_j}^{\text{AC}} &= \min \left(\varphi_{m,i,j}^{\text{AC}} B \log_2 (1 + \text{SNR}_{m,i,j,k_j}^{\text{AC}}), \frac{R_{m,i,j}^{\text{BH}}}{K_j l_{i,j}^{(2)}} \right)\end{aligned}\quad (9)$$

最后, 可以获得业务吞吐量:

$$T = \sum_{m=1}^M \left(\sum_{i=1}^I l_{m,i}^{(1)} \left(\sum_{k_i=1}^{K_i} R_{m,i,k_i}^{\text{AC}} + \sum_{j=1}^J l_{i,j}^{(2)} \sum_{k_j=1}^{K_j} R_{m,i,j,k_j}^{\text{AC}} \right) + \sum_{k_m=1}^{K_m} R_{m,k_m}^{\text{AC}} \right) \quad (10)$$

2 算法设计

在 IAB 网络中, IAB-node 通过毫米波无线回程的方式连接到 IAB-donor, 毫米波链路的脆弱性导致传输时链路会产生突发中断。对此, 本文提出一种以吞吐量最大为目标来选择备份链路的链路保护算法, 并且引入多跳回程, 允许 IAB-node 以第一跳 IAB-node 作为父节点来建立备份链路。基于 RSRP 的链路保护算法描述详见如下。

算法 1 基于 RSRP 的链路保护算法

输入 IAB-node 集合 N , IAB-donor 集合 D

输出 $P_{N_i}^{\text{work}}$

1. for $N_i \in N$ do
2. for $D_m \in D$ do
3. 计算 IAB-donor 与 IAB-node 之间链路的 RSRP _{N_i}

4. end for

5. 选取 RSRP 最大的链路为工作链路, 保存工作父节点 $P_{N_i}^{\text{work}}$

6. 假设工作链路中断

7. 选取此时 RSRP 最大的链路为备份链路, 保存备份父节点 $P_{N_i}^{\text{backup}}$

8. end for

在网络拓扑初始化的阶段, 基于参考信号接收功率 (Reference Signal Receiving Power, RSRP) 来选择链路初始化单跳 IAB 拓扑^[17], 并保存每个 IAB-node 的父节点 $P_{N_i}^{\text{work}}$ 。容易想到, 依然可以依据 RSRP 来选择备份链路, 只需要假设工作链路中断, 可以得到每个节点的备份的父节点 $P_{N_i}^{\text{backup}}$ 。然而, 这种链路保护方式只考虑了链路的质量, 没有考虑 IAB 网络的资源分配, 并且将回程限制在单跳。在相同带宽分配策略的前提下, 引入多跳回程以期望提高吞吐量。

在式(4)~式(9)中, $l_{m,i}^{(1)}$ 和 $l_{i,j}^{(2)}$ 决定了带宽的分配, 并进一步决定业务吞吐量。而 $l_{m,i}^{(1)}$ 和 $l_{i,j}^{(2)}$ 由 IAB 网络的拓扑结构所决定。因此基于 RSRP 初始单跳 IAB 拓扑来简化这个模型, 得到简化后的备份链路求取的最优化模型:

$$P1 \quad \max_{l_{m,i}^{(1)}, l_{n,i}^{(2)}} T$$

$$\text{s. t. C1: } l_{p_{N_i}^{\text{work}}, i}^{(1)} = 0$$

$$\text{C2: } \sum_{m \in D \setminus P_{N_i}^{\text{work}}} l_{m,i}^{(1)} + \sum_{n \in N \setminus N_i} l_{n,i}^{(2)} = 1$$

约束 C1, C2 保证了求取的备份链路与工作链路不相交。算法 2 为每一个 IAB-node 求取一条备份链路, 即为每一个 IAB-node 求解 P1。通过遍历单跳回程以及多跳回程的全部链路, 利用式(1)~式(9)来计算业务吞吐量, 比较得到使吞吐量最大的链路, 设置为备份链路, 并保存每个节点的备份父节点 $P_{N_i}^{\text{backup}}$ 。基于 RA 的链路保护算法描述详见如下。

算法 2 基于 RA 的链路保护算法

输入 IAB-node 集合 N , IAB-donor 集合 D

输出 $P_{N_i}^{\text{backup}}$

1. for $N_i \in N$ do

2. for $D_m \in D$ do

3. 计算每一个 IAB-donor 与 IAB-node 之间链路的 RSRP_{m,i}

4. end for

5. 选取 RSRP 最大的链路为回程工作链路, 保存工作父节点 $P_{N_i}^{\text{work}}$

6. end for

7. for $N_j \in N$ do

8. for $D_m \in D$ do

9. 假设工作链路中断, N_i 选择 D_m 为父节点, 进行单跳回程

10. 根据式(1)~式(9)计算业务吞吐量 T_{D_m}

11. end for

12. for $N_j \in N \setminus N_i$

13. 假设工作链路中断, N_i 选择 N_j 为父节点, 进行多跳回程

14. 根据式(1)~(9)计算业务吞吐量 T_{N_j}

15. end for

16. 选择 T 最大的链路为回程备份链路, 保存备份父节点 $P_{N_i}^{\text{backup}}$

17. end for

3 仿真及分析

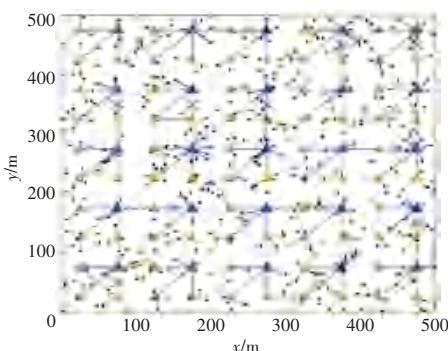
本节将通过 Matlab 数值仿真来验证算法的保护能力。为了运行算法, 需要获得 IAB 网络的拓扑结构^[18~20]。为了更精确地评估算法的运行结果, 设置了 2 种场景, 一种为随机拓扑的场景, 一种为固定拓扑的场景。研究考虑一个 $500 \times 500 \text{ m}^2$ 的区域。随机拓扑场景下, IAB-donor 和 IAB-node 在这个区域内随机分布, 而在固定拓扑场景下, IAB-donor 和 IAB-node 在这个区域内呈均匀的网格状分布。IAB-donor 和 IAB-node 数量为 100, 其中 IAB-donor 占总数的 $1/4$ 。设置用户密度为 λ , 即平均每个单元 UE 的数量。假设用户在这个区域内是随机分布的, 用户选择最大 RSRP 与基站关联。仿真参数见表 1。

仿真中, 对回程链路的中断进行了约束, 以保证发生的都是单链路故障。通过仿真, 可以得到场景一固定拓扑和场景二随机拓扑下, RALP 算法的拓扑快照, 如图 2 所示。图 2 中, 蓝色三角表示 IAB-donor, 黄色三角表示 IAB-node, 黑色圆点表示用户, 红色的叉表示随机发生的链路中断, 红色点划线表示链路中断后, IAB-node 的备份链路。可以清晰地看到, 该算法能有效应对每一个单链路中断, 对工作链路起到了有效的保护作用。

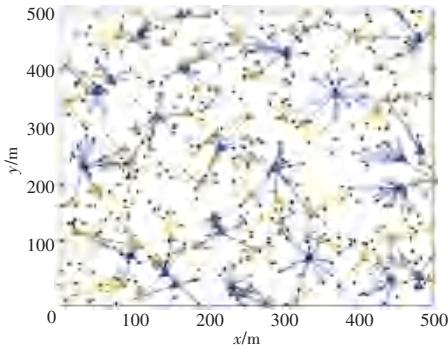
表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

标号	参数	参数值
P	IAB-donor 和 IAB-node 发送功率	23 dBm
f_c	中心频率	28 GHz
G_{\max}, G_{\min}	主瓣增益, 旁瓣增益	18 dB, -2 dB
ξ	路径损耗标准差	LOS = 5.2, NLOS = 7.6
γ	1 m 的路径损耗	61.4 dB
β	路径损耗指数	LOS = 2.2, NLOS = 3.3
κ	LOS 范围常数	170 m
θ_b	波束宽度	10°
NF	噪声系数	10 dB
B	可用带宽	500 MHz



(a) 固定拓扑



(b) 随机拓扑

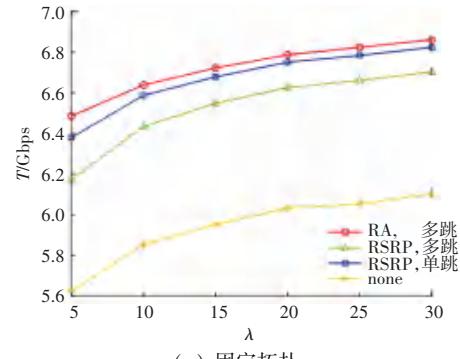
图 2 2 种场景下, 中断概率为 0.2, 用户密度 (λ) 为 5, RALP 算法在链路中断后进行保护的拓扑快照

Fig. 2 Topological snapshots of the RALP algorithm for protection after a link outage in two scenarios where outage probability is 0.2 and user density (λ) is 5

2 种场景下, 平均业务吞吐量 (T) 和用户密度 (λ) 的关系曲线如图 3 所示。由图 3(a) 可知, 在固定拓扑场景下, 中断概率为 0.2, 用户密度 λ 为 5 时, 多跳 IAB 拓扑下 RSRPLP 算法较没有链路保护算法提高了 10.3%, 而在单跳 IAB 拓扑下 RSRPLP 算法和在多跳 IAB 拓扑下 RALP 算法对吞吐量的提高比较相近, 分别为 13.4%, 15.7%。这可能是由于在节点分布均匀的情况下, 吞吐量受回程容量、而不是链路质量的限制更多。

由图 3(b) 可知, 在随机拓扑场景下, 中断概率为

0.2, 用户密度 (λ) 为 5 时, 单跳 IAB 拓扑下 RSRPLP 算法虽然能有效地进行链路的保护, 使传输不中断, 但吞吐量较没有链路保护算法只提高了 14.6%。而引入多跳回程后, RSRPLP 算法能够进一步提高业务吞吐量, 可达 17.4%。本文提出的 RALP 算法, 在多跳 IAB 拓扑中能够将吞吐量提高 23.9%。



(a) 固定拓扑

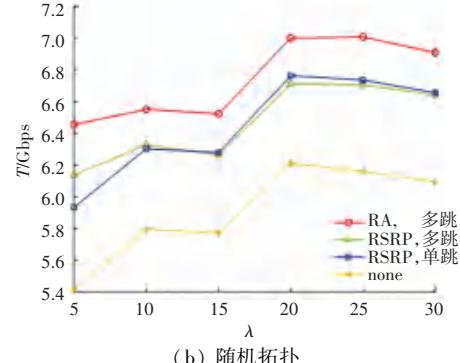


图 3 2 种场景下, 中断概率为 0.2, 在有不同链路保护算法和无保护算法的情况下, 平均业务吞吐量 (T) 和用户密度 (λ) 关系

Fig. 3 The relationship between the average service throughput (T) and the user density (λ) with different link protection algorithms and without protection algorithm where outage probability is 0.2 in two scenarios

可见, 本文提出的 RALP 算法效果最好。在城市网格型的拓扑场景中, 本文提出的 RALP 算法都能够覆盖所有单链路故障。在更为复杂的随机拓扑场景中, 该算法也能够覆盖所有单链路故障, 并能够

更好地兼顾吞吐量, 相比 RSRPLP 算法额外提高了 9.3%。

4 结束语

基站和光纤高成本的部署给网络致密化带来了巨大的挑战。而 IAB 作为一种有效提高基站覆盖范围并且能够降低部署成本的技术被广泛关注, 并成为了新的研究热点。在过去的研究中, 往往关注 IAB 网络的有效性, 而忽略了 IAB 网络的可靠性。无线链路的脆弱性使得在回程时必须考虑可靠性来满足 QoS 的需求。本文提出了一种基于资源分配的链路保护算法, 并通过仿真证明了该算法能够覆盖所有的单链路故障, 同时提高了 23.9% 的业务吞吐量, 提高了 QoS。这也为今后的工作奠定了基础。在此基础上可以对考虑资源分配的更加高效的链路保护算法进行研究。

参考文献

- [1] SADOVAYA Y, MOLCHANOV D, MAO Wei, et al. Integrated access and backhaul in millimeter-wave cellular: Benefits and challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(9): 81–86.
- [2] LIM B, LEE J, KWON J, et al. Joint association and resource allocation for multi-hop integrated access and backhaul (IAB) network [J]. Journal of Communications and Networks, 2023, 25(4): 440–455.
- [3] KWON J, LIM B, KO Y. Resource allocation and system design of out-band based integrated access and backhaul network at mmWave band [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(6): 6503–6517.
- [4] YADAV I, CHAPORKAR P, JHA P, et al. Spectrum allocation in IAB networks: A hierarchical auction-based approach [C]// Proceedings of 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 1–5.
- [5] SHARMA A, GANTI R K, MILLETH J K. Joint backhaul-access analysis of full duplex self-backhauling heterogeneous networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1727–1740.
- [6] SIDDIQUE U, TABASSUM H, HOSSAIN E. Downlink spectrum allocation for in-band and out-band wireless backhauling of full-duplex small cells [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(8): 3538–3554.
- [7] SAHA C, AFSHANG M, DHILLON H S. Bandwidth partitioning and downlink analysis in millimeterwave integrated access and backhaul for 5G [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(12): 8195–8210.
- [8] SAHA C, DHILLON H S. Millimeter wave integrated access and backhaul in 5G: Performance analysis and design insights [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(12): 2669–2684.
- [9] ZHANG Shumeng, XU Xiaodong, SUN Mengying, et al. Joint spectrum and power allocation in 5G integrated access and backhaul networks at mmWave band [C]//Proceedings of the IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1–6.
- [10] YIN Hao, ROY S, CAO Liu. Routing and resource allocation for IAB multi-hop network in 5G advanced [J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(10): 6704–6717.
- [11] HUANG C, WANG X, WANG X. Effective-capacity-based resource allocation for end-to-end multi-connectivity in 5G IAB networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 6302–6316.
- [12] 耿海军, 施新刚, 王之梁, 等. 基于逐跳方式的单链路故障保护算法 [J]. 计算机科学, 2017, 44(7): 68–73.
- [13] IOVA O, THEOLEYRE F, NOEL T. Using multiparent routing in RPL to increase the stability and the lifetime of the network [J]. Ad Hoc Networks, 2015, 29: 45–62.
- [14] VU T K, BENNIS M, DEBBAH M, et al. Joint path selection and rate allocation framework for 5G self-backhauled mm-wave networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(4): 2431–2445.
- [15] TAFINTSEV N, MOLCHANOVET D, YEH S, et al. Joint path selection and resource allocation in multi-hop mmWave-based IAB systems [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 4194–4199.
- [16] ANDREWSA J G, BAI T, KULKARNI M N, et al. Modeling and analyzing millimeter wave cellular systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(1): 403–430.
- [17] SINGH S, KULKARNI M N, ANDREWS J G. A tractable model for rate in noise limited mmWave cellular networks [C]// Proceedings of 2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1911–1915.
- [18] RANJAN S, CHAPORKAR P, JHA P, et al. Backhaul-aware cell selection policies in 5G IAB networks [C]//Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 1–6.
- [19] HUANG Cheng, WANG Xudong. A bayesian approach to the design of backhauling topology for 5G IAB networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22(4): 1867–1879.
- [20] SIMSEK M, ORHAN O, NASSAR M, et al. IAB topology design: A graph embedding and deep reinforcement learning approach [J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(2): 489–493.