

5G 毫米波回传与接入一体化网络中用户关联与资源分配联合优化方法

马忠彧^{1,2}, 李波¹, 闫中江¹, 杨懋¹

(1.西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072; 2.兰州工业学院 电子信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:由于毫米波回传与接入一体化网络(mm-Wave IBAN)能够按需划分接入和回传链路之间的资源比例而在提升5G通信网络资源利用率方面有巨大优势。从最大化全网传输业务量的角度出发提出并实现一种mm-Wave IBAN用户关联和资源分配的联合优化方法。首先将mm-Wave IBAN中用户关联和资源分配的联合问题建模为一个组合非凸优化问题,然后将其分解为2个子问题,即在接入速率和回传速率匹配约束情况下以全网接入速率最大化为目标的用户关联子问题(即子问题1)和以传输业务最大化为目标的接入与回传时间资源比例分配的子问题(即子问题2)。利用人工免疫优化算法求解子问题1,再通过对全网业务量表达式求导而得各小区接入和回传链路上的最优传输时间比例。仿真结果表明:与基于最近距离用户关联机制相比,在提升网络吞吐量方面有更大增益。

关键词:5G毫米波;回传与接入一体化;用户关联;资源分配;免疫优化

中图分类号:TN929.53

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2019)05-0943-09

现有技术方案在解决提升5G系统吞吐量方面的问题时主要从两方面着手:一方面,通过部署低能耗、高密度的微小区(small cell, SC)以提升频谱利用率,形成超密集部署网络(ultra-dense deployment network, UDN);另一方面,使用可用带宽更大的毫米波(30~300 GHz)通信^[1-2]。将毫米波通信与UDN技术相结合即形成了毫米波超密集部署网络。显然,让每个微小区基站(small-cell base station, SBS)通过光纤进行数据回传在成本上是无法估量的。因此,业内提出使用毫米波无线回传而形成毫米波无线回传与接入一体化网络(millimeter-wave integrated backhaul and access network, mm-Wave IBAN),其典型特征就是接入和回传链路共享无线资源^[3]。

mm-Wave IBAN接入与回传链路之间的无线资源复用的方式有2种:①全双工共享时域和频域资

源,但使用该方式的技术瓶颈在于自干扰消除;②单独地在时域或者频域共享资源,即时分复用模式(time division multiplexing, TDM)或频分复用模式(frequency division multiplexing, FDM)^[4]。但是, FDM在基于空间复用的点对点传输场景中的频谱利用率受限,因此TDM是一种更为有效的方式。在mm-Wave IBAN的接入和回传链路之间使用TDM的方式有2种:①异步方式,即SBS可按需独立地分配其接入和回传链路间的时间比例,其特点在于系统灵活性强、资源利用率高,但系统控制较为复杂;②同步方式,即要求全网所有SBS的接入和回传时间比例统一,虽然全网统一地接入回传时间分配比例未必有利于每个SBS最大化其自身的吞吐量,但其优势在于系统控制简单、可有效避免SBS接入时间与其他SBS回传时间重叠而造成的干扰。因此,本文主要针对基于时间同步的mm-Wave IBAN,确

收稿日期:2018-10-26

基金项目:国家自然科学基金(61771392,61771390,61501373,61271279)、国家科技重大专项(2015ZX03002006-004,2016ZX03001018-004)与航空科学基金(20185553035)资助

作者简介:马忠彧(1986—),西北工业大学博士研究生,主要从事无线通信与网络技术研究。

通信作者:闫中江(1983—),西北工业大学副教授,主要从事宽带无线网络组网协议设计、片上网络协议设计与实现研究。

e-mail: zhjyan@nwpu.edu.cn

定使全网传输业务最大化的用户关联和资源分配方法。

在 mm-Wave IBAN 设计与优化方面,现有文献往往从移动性管理^[5-6]、路径选择^[7-8]、资源调度^[9-10]、回传路径规划^[11-12]等多方面进行设计与优化,而文献[13]最新调研了 mm-Wave IBAN 优化设计中面临的关键挑战与问题,并讨论了 mm-Wave IBAN 网络标准化和部署的进展。实际上,mm-Wave IBAN 的用户关联往往和其网络负载、资源利用等方面有较强的关联性而成为网络联合优化与设计的研究热点^[14]。文献[15]研究了用户关联和功率分配的联合优化问题;文献[16]中 Ma 等人研究了大规模多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)系统网络中的用户关联和资源分配问题,实现回传容量受限的 α 公平网络效用的最大化。文献[17]中 Ren 等人在假设 SBS 有缓存支持功能的前提下,研究了 IBAN 的用户关联和资源分配联合优化问题;Mesodiakaki 等人在文献[18]中提出了多跳回传网络用户关联和频谱分配联合优化方法,实现了能量效率和频谱效率的最大化。Feng 等人在文献[19]中研究了大规模 MIMO 异构网络中帧结构、资源分配和用户关联的联合优化与设计问题,并在无线回传速率和公平感知的约束条件下实现了所有用户总下行链路速率的最大化。但是,文献[16-19]在处理用户关联与资源分配的联合问题时仅考虑接入层面的约束因素,并未充分考虑接入和回传层面互耦合特性,从而并未充分挖掘回传链路与接入链路之间的网络资源动态分配的性能增益。为了解决该问题,提出一种 mm-Wave IBAN 中用户关联和资源分配的联合优化方法,并将联合优化问题分解为用户关联子问题(即子问题 1,在 SBS 接入速率和回传速率匹配的情况下,使全网 SBS 的接入速率最大化的问题)和资源分配子问题(即子问题 2,有效分配 SBS 的接入链路与回传链路的时间资源比例,最大化全网 SBS 的传输业务量)。利用免疫优化算法求解子问题 1 后再通过对全网业务量表达式求导获得子问题 2 的解,进而实现 mm-Wave IBAN 中传输业务量最大化的用户关联与资源分配联合优化。

1 系统模型

本文使用文献[20]中的用户数据平面与信令控制平面为相互分离的网络架构。其中,控制平面

负责控制信令传输,数据平面负责业务传输,本文主要聚焦于数据平面,不涉及控制平面的内容。系统采用同步 TDM 方式,即每个单位传输时间间隔(unit transmission interval, UTI)被划分为回传时间和接入时间,且 UTI 内全网各 SBS 的接入和回传时间比例都是统一的。每个 UTI 的长度固定,但不同 UTI 之间全网 SBS 的接入和回传时间比率根据网络用户移动情况动态变化。从数据传输方向上,可将 mm-Wave IBAN 中的传输阶段分为上行接入、上行回传、下行回传、下行接入等阶段。由于网络下行运行机制和上行运行机制对称一致,本文仅主要针对下行传输场景进行用户关联与资源分配的联合优化,但本文的联合优化方法在上行传输场景中也同样适用。

假设网络中有 1 个毫米波宏基站(macro base station, MBS),MBS 通过光纤传输的方式连接至核心网,在 MBS 的覆盖范围内分布着 N 个毫米波微站(SBS),其集合表示为 $N = \{1, 2, \dots, N\}$ 。 M 个用户(user equipment, UE),其集合表示为 $M = \{1, 2, \dots, M\}$ 。其中,MBS 通过毫米波无线通信将数据一跳传输至网络中的各 SBS,各 SBS 再将数据传输到关联至其上的各 UE。在每个 SBS 通信资源总量一定的情况下,各 SBS 的接入链路和回传链路共享通信资源。此外每个 SBS 在接入时间内都能为关联至其内的每个用户波束赋形一个通信波束,SBS 和 UE 的波束赋形模型采用文献[21]中的扇区模型,如图 1 所示。该模型刻画了二维空间中实际波束的主要特征,如方向增益、前后比、半功率带宽等。

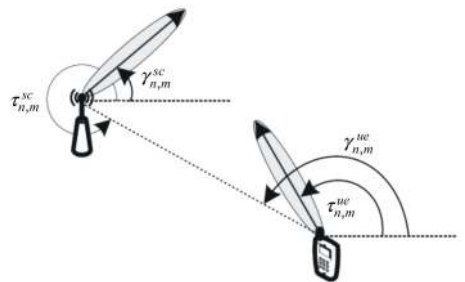


图 1 节点天线模型图

理想天线模型中,主瓣定向增益为较大的恒定常数,而旁瓣定向增益为较小的恒定常数。为简化计算,假设网络中所有 SBS 的主瓣波束宽度是相等的常数。用 $\gamma_{n,m}^{sc}$ ($n \in N, m \in M$) 表示第 n 个微小区基站 SBS_n 的波束视轴角(即 SBS_n 的主瓣波束中心

对称轴与水平正轴方向的夹角), $\gamma_{n,m}^{ue}$ ($n \in N, m \in M$) 表示第 m 个用户 UE_m 的波束视轴角(即 UE_m 的主瓣波束中心对称轴与水平正轴方向的夹角)。用 $\tau_{n,m}^{sc}$ ($n \in N, m \in M$) 表示从 SBS_n 处到 UE_m 处的方向向量与水平正轴之间的夹角, $\tau_{n,m}^{ue}$ ($n \in N, m \in M$) 表示从 UE_m 处到 SBS_n 处的方向向量与水平正轴之间的夹角; θ_n^{sc} ($n \in N$) 表示 SBS_n 的波束宽度, θ_m^{ue} ($m \in M$) 表示 UE_m 的波束宽度。另外, 分别用 $g_{n,m}^{sc}$ ($n \in N, m \in M$) 和 $g_{n,m}^{ue}$ ($n \in N, m \in M$) 表示 SBS_n 和 UE_m 之间定向发送增益和定向接收增益, 利用图 1 中的波束模型, 可将发送点 SBS_n 的定向发送增益 $g_{n,m}^{sc}$ 表示为

$$g_{n,m}^{sc}(\theta_n^{sc}, \gamma_{n,m}^{sc}, \tau_{n,m}^{sc}) = \begin{cases} c, & \text{if } \frac{\theta_n^{sc}}{2} \leq |\gamma_{n,m}^{sc} - \tau_{n,m}^{sc}| \leq 2\pi - \frac{\theta_n^{sc}}{2} \\ \frac{2\pi - (2\pi - \theta_n^{sc}) * c}{\theta_n^{sc}}, & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

式中, Sc_n 是旁瓣增益, 当波束非常细时则。同理, 接收点 UE_m 的定向接收增益 Sc_m 可表示为

$$g_{n,m}^{ue}(\theta_m^{ue}, \gamma_{n,m}^{ue}, \tau_{n,m}^{ue}) = \begin{cases} c, & \text{if } \frac{\theta_m^{ue}}{2} \leq |\gamma_{n,m}^{ue} - \tau_{n,m}^{ue}| \leq 2\pi - \frac{\theta_m^{ue}}{2} \\ \frac{2\pi - (2\pi - \theta_m^{ue}) * c}{\theta_m^{ue}}, & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

因此, 在用户 UE_m 处接收到其所关联的 SBS_n 的信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR) $SINR_{n,m}$ 可表示为

$$SINR_{n,m} = \frac{P_n^{sc} * g_{n,m}^{sc} * g_{n,m}^{ue} * g_{n,m}^h}{\sum_{l \in N, l \neq n} P_l^{sc} * g_{l,m}^{sc} * g_{l,m}^{ue} * g_{l,m}^h + N_o} \quad (3)$$

式中, P_n^{sc} 表示 SBS_n 的发送功率(在单位传输间隔 UTI 内, 假定该值是一个恒定的常数); $g_{n,m}^h$ 表示 SBS_n 与 UE_m 之间信道增益, $g_{n,m}^h$ 主要建模描述 SBS_n 和 UE_m 之间链路上的路径损耗和阴影效应; N_o 表示网络背景噪声功率。

2 问题描述

用 $x_{n,m}$ 表示 UE_m 是否被关联至 SBS_n 的决策变量($x_{n,m} = 1$ 表示 UE_m 关联至 SBS_n , $x_{n,m} = 0$ 则表示 UE_m 未被关联至 SBS_n)。对于任意的 UE_m 只能与网络中的一个 SBS_n 关联, 而任意的 SBS_n 可关联多个

UE_m , 因此有 $\sum_{n=1}^N x_{n,m} = 1$; 假设传输时间间隔 UTI 为 t , t_n^{AC} 表示 SBS_n 在该传输时间间隔内的接入时间, t_n^{BH} 表示 SBS_n 在该传输时间间隔内的回传时间, $t_n^{AC} + t_n^{BH} = t$ 。 W 表示传输带宽, 则 SBS_n 在 UTI 内的回传业务量 T_n^{BH} 可以表示为

$$T_n^{BH} = t_n^{BH} * W * \log_2(1 + SINR_{n,o}) \quad (4)$$

SBS_n 在 UTI 内的接入业务量 T_n^{AC} 可表示为

$$T_n^{AC} = t_n^{AC} * \sum_{m=1}^M x_{n,m} * W * \log_2(1 + SINR_{n,m}) \quad (5)$$

式中, $SINR_{n,o}$ 为 SBS_n 与宏基站 MBS 之间的信干噪比。对于 SBS_n , 在传输时间间隔 UTI 内实际能够传输的业务量 T_n 取决于其回传业务量 T_n^{BH} 和接入业务量 T_n^{AC} 的最小值, 即

$$T_n = \min\{T_n^{AC}, T_n^{BH}\}, n \in N \quad (6)$$

因此 mm-Wave IBAN 中, 以全网传输业务量最大化为目标的用户关联和资源分配联合优化问题可被建模为问题 Q_p

$$Q_p: \max \sum_{n=1}^N T_n$$

s.t. C1: $\sum_{n=1}^N x_{n,m} = 1, x_{n,m} \in \{0, 1\}, \forall m \in M;$

C2: $0 \leq \gamma_{n,m}^{sc} \leq \gamma_{\max}^{sc}, \forall m \in M, \forall n \in N;$

C3: $0 \leq \tau_{n,m}^{ue} \leq \tau_{\max}^{ue}, \forall m \in M, \forall n \in N;$

C4: $t_n^{AC} + t_n^{BH} = t, \forall n \in N$

(7)

Q_p 中, C_1 是关于用户关联的约束条件, C_2-C_3 是关于 SBS 和 UE 波束视轴角变量的约束条件, C_4 为资源分配有关的约束, 该约束表明对于任意的 SBS_n , 其下行接入时间与回传时间的总和为给定的传输时间间隔时间 t 。通过分析, 可将 Q_p 定性为非凸组合优化问题, 其组合性是主要体现在约束条件 C_1 中, 而非凸性主要体现在约束条件 C_2-C_3 , 这是一个 NP-hard 问题, 很难直接求解。因此, 将 Q_p 分解为 2 个子问题, 并依次求解每个子问题, 以求获得的 Q_p 次优解。

3 问题求解

3.1 基于免疫优化的用户关联算法

实际上, 由于对于拓扑给定的 mm-Wave IBAN 是一个静态的网络, 即 SBS_n 与宏基站 MBS 之间的

回传速率在主要取决于 SBS_n 与宏基站之间的路径损耗,因此可假定 SBS_n 与 MBS 之间的回传链路速率是稳定不变的。由文献[22]中的分析可知:就 mm-Wave IBAN 中的任意微小区基站 SBS_n 而言,当 SBS_n 的接入速率 $R_n^{AC} (\forall n \in N)$ 和回传速率 $R_n^{BH} (\forall n \in N)$ 相匹配时,其传输业务量 T_n 可达到最大值。因此,为了使网络中各微小区基站 $SBS_n (1 \leq n \leq N)$ 的接入速率 $R_n^{AC} (\forall n \in N)$ 与其回传速率 $R_n^{BH} (\forall n \in N)$ 相匹配,特引入一个新的约束条件,即 $R_1^{AC} : R_2^{AC} : \dots : R_n^{AC} = R_1^{BH} : R_2^{BH} : \dots : R_n^{BH}$, 则 mm-Wave IBAN 下行接入速率最大化问题可建模为问题 Q_p^1

$$\begin{aligned}
 & Q_p^1: \max \sum_{n=1}^N R_n^{AC} \\
 & \text{s.t. } C1: \sum_{n=1}^N x_{n,m} = 1, x_{n,m} \in \{0,1\}, \forall m \in M; \\
 & \quad C2: 0 \leq \gamma_{n,m}^{sc} \leq \gamma_{\max}^{sc}, \forall m \in M, \forall n \in N; \\
 & \quad C3: 0 \leq \tau_{n,m}^{ue} \leq \tau_{\max}^{ue}, \forall m \in M, \forall n \in N; \\
 & \quad C4: R_1^{AC} : R_2^{AC} : \dots : R_n^{AC} = \\
 & \quad R_1^{BH} : R_2^{BH} : \dots : R_n^{BH}, \forall n \in N \quad (8)
 \end{aligned}$$

其中, C_1-C_3 的物理意义与 Q_p 中的相同, C_4 表示各 $SBS_n (\forall n \in N)$ 的无线接入速率 R_n^{AC} 与其回传速率 R_n^{BH} 的匹配约束。由于免疫优化算法 (immune optimization algorithm, IOA) 在求解非凸优化问题和非线性多目标优化问题时克服了一般寻优过程难以处理的“早熟”问题(即过早地求得局部最优解而失去全局最优解的问题),从而能够最终求得全局最优解。因此使用 IOA 对 Q_p^1 进行求解。

IOA 算法在最优解搜索过程主要依赖于 5 个重要的元素,即抗原、抗体、浓度、克隆和适应度。其中,抗原代表所要解决的问题(具体表现为目标函数,本文中主要表示全网总接入速率的函数表达式);抗体代表问题所对应欧式空间中的可行解(具体表现为一个具有真值属性的字符串,本文中主要表示由用户关联变量 $x_{n,m}, SBS_n$ 与 UE_m 波束视轴角 $\gamma_{n,m}^{sc}, \gamma_{n,m}^{ue}$ 所构成的编码字符串);浓度代表抗体多样性的度量(具体表现为编码后的抗体群中各抗体取值相同的位置数);克隆代表子代抗体完全复制父代抗体(具体表现为子代字符串完全复制父字符串);适应度代表抗体与抗原的适应性(具体表现抗体所代表的解与抗原所代表的目标函数的匹配程度)及抗体与抗体的适应性(具体表现为抗体与抗

体的匹配程度,即各解之间的相似程度);在本文中,一个抗体代表用户关联变量 $x_{n,m}, SBS_n$ 与 UE_m 的主瓣视轴角度变量 $\gamma_{n,m}^{sc}$ 和 $\gamma_{n,m}^{ue}$ 的联合可行解,具体的 IOA 算法抗体编码如图 2 所示。

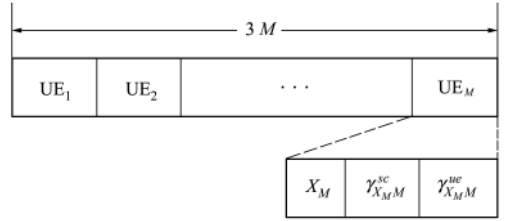


图 2 抗体编码图

抗体种群中,第 i 个抗体的期望繁殖概率 P_i 同时取决于亲和度函数 A_i 和抗体浓度函数 C_i

$$P_i = \varepsilon \frac{A_i}{\sum_{i=1}^{S_c} A_i} + (1 - \varepsilon) \frac{C_i}{\sum_{i=1}^{S_c} C_i} \quad (9)$$

式中, ε 为多样性估计参数, S_c 为抗体种群大小, P_i 表示用户关联决策变量 $x_{n,m}, SBS_n$ 与 UE_m 波束视轴角变量 $\gamma_{n,m}^{sc}$ 和 $\gamma_{n,m}^{ue}$ 组成的抗体种群的繁殖概率, A_i 是第 i 个抗体的亲和度, C_i 是第 i 个抗体的相似比例,即浓度。亲和度函数 A_i 定义为

$$A_i = \sum_{n=1}^N R_n^{AC} - \beta(1 - Y) \quad (10)$$

式中, β 为一个很大的正常数, $Y (0 \leq Y < 1)$ 为 SBS_n 测量接入速率 R_n^{AC} 与其回传速率 R_n^{BH} 匹配程度的匹配指数,具体如(11)式所示。那么, $\beta(1 - Y)$ 代表违反 Q_p^1 中 C_4 的罚函数。

$$Y = \frac{\left[\sum_{n=1}^N \left(\frac{R_n^{AC}}{R_n^{BH}} \right) \right]^2}{N * \sum_{n=1}^N \left(\frac{R_n^{AC}}{R_n^{BH}} \right)^2} \quad (11)$$

代表抗体种群中相似比例的抗体浓度 C_i 为

$$C_i = \frac{1}{S_c} * \sum_{i=1, i \neq i'}^{S_c} T_{ii'} \quad (12)$$

式中, $T_{ii'}$ 代表抗体种群中的相似度,其具体定义如(13)式所示

$$T_{ii'} = \begin{cases} 1, & \text{if } S_{ii'} > T_h \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (13)$$

T_h 是预先定义的相似度阈值, $S_{ii'}$ 代表第 i 个抗体和第 i' 个抗体编码中取值相同的位置数

$$S_{ii'} = \frac{\sum_{j=1}^{3M} |b_i^j - b_{i'}^j|}{3M} \quad (14)$$

式中, b_i^j 和 $b_{i'}^j$ 表示第 i 个抗体和第 i' 个抗体的第 j 位的值。

3.2 资源分配算法

在不考虑同步 TDM 约束条件的情况下,对于 mm-Wave IBAN 中的任意某个微小区基站 SBS_n 而言,将(4) ~ (5) 式带入(6) 式中可得 SBS_n 在 UTI 内的传输业务量 $T_n(t_n^{\text{BH}})$ 的表达式为

$$T_n(t_n^{\text{BH}}) = \begin{cases} R_n^{\text{BH}} * t_n^{\text{BH}}, & \text{if } t_n^{\text{BH}} < t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}} \\ R_n^{\text{AC}} * t & \text{if } t_n^{\text{BH}} = t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}} \\ R_n^{\text{BH}} + R_n^{\text{AC}} * R_n^{\text{BH}}, & \text{if } t_n^{\text{BH}} = t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}} \\ R_n^{\text{AC}} * (t - t_n^{\text{BH}}), & \text{if } t_n^{\text{BH}} > t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}} \end{cases} \quad (15)$$

从(15)式可以看出, $T_n(t_n^{\text{BH}})$ 是一个以回传时间 t_n^{BH} 为自变量的分段线性三角函数。将该函数取最大值时的回传时间称为最佳回传时间 $t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}}$ 。通过分析可得, $T_n(t_n^{\text{BH}})$ 首先以斜率 R_n^{BH} 呈线性增长趋势,这时 SBS_n 的回传业务量 T_n^{BH} 小于接入业务量 T_n^{AC} ,即 SBS_n 的整体传输业务量处于回传受限的状态;当 SBS_n 的回传时间 t_n^{BH} 达到最佳回传时间 $t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}}$

时(即 $t_n^{\text{BH}} = t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}} = \frac{R_n^{\text{AC}}}{R_n^{\text{AC}} + R_n^{\text{BH}}}t$),函数 $T_n(t_n^{\text{BH}})$ 的值达到最大,即 SBS_n 的整体传输业务量达到最大值。此后, $T_n(t_n^{\text{BH}})$ 以斜率 R_n^{AC} 降低,这时 SBS_n 的接入业务量 T_n^{AC} 小于回传业务量 T_n^{BH} ,即 SBS_n 的整体传输业务量处于接入受限的状态。因此,对于任意的 SBS_n 而言,其最佳回传时间 $t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}}$ 和最佳接入时间 $t_{n,\text{opt}}^{\text{AC}}$ 可表示为

$$\begin{cases} t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}} = \arg \max_{t^{\text{BH}}} T_n = \frac{R_n^{\text{AC}}}{R_n^{\text{AC}} + R_n^{\text{BH}}} t \\ t_{n,\text{opt}}^{\text{AC}} = t - t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}} \end{cases} \quad (16)$$

由于不同 SBS_n 的接入速率 R_n^{AC} 和回传速率 R_n^{BH} 是相互不同的,因此不同 SBS_n 在 UTI 内的传输业务量 $T_n(t_n^{\text{BH}})$ 所达到极值时所对应的最佳回传时间 $t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}}$ 和最佳接入时间 $t_{n,\text{opt}}^{\text{AC}}$ 也是不同的。但是,为了避免某些 SBS 的回传传输对另外一些 SBS 的接入传输 SBS_n 的干扰,在采用同步 TDM 的 mm-Wave IBAN 中要求所有 SBS 的回传时间 t^{BH} 是相同的。通过对子问题 1 的求解,即获得了使 mm-Wave IBAN 全网

总接入速率最大化的 SBS 的接入速率和回传速率。在此基础上,通过对子问题 2 的求解,即找到全网 SBS 统一使用的、并使全网传输业务量达到最大化的接入链路与回传链路之间的时间资源比例有效分配方法。

首先,将所有 SBS 各自的理论最佳回传时间 $t_{n,\text{opt}}^{\text{BH}}$ 按照从小到大的顺序进行排序,设经过排序后的最佳回传时间序列为 $[\bar{t}_{1,\text{opt}}^{\text{BH}}, \bar{t}_{2,\text{opt}}^{\text{BH}}, \dots, \bar{t}_{N,\text{opt}}^{\text{BH}}]$,其中 $\bar{t}_{1,\text{opt}}^{\text{BH}}$ 和 $\bar{t}_{N,\text{opt}}^{\text{BH}}$ 分别表示所有 SBS 的最佳回传时间中的最小值和最大值,即

$$\begin{cases} \bar{t}_{1,\text{opt}}^{\text{BH}} = \min \{ t_{1,\text{opt}}^{\text{BH}}, t_{2,\text{opt}}^{\text{BH}}, \dots, t_{N,\text{opt}}^{\text{BH}} \} \\ \bar{t}_{N,\text{opt}}^{\text{BH}} = \max \{ t_{1,\text{opt}}^{\text{BH}}, t_{2,\text{opt}}^{\text{BH}}, \dots, t_{N,\text{opt}}^{\text{BH}} \} \end{cases} \quad (17)$$

与 $[\bar{t}_{1,\text{opt}}^{\text{BH}}, \bar{t}_{2,\text{opt}}^{\text{BH}}, \dots, \bar{t}_{N,\text{opt}}^{\text{BH}}]$ 所对应的各 SBS 的回传速率序列表示为 $[\bar{R}_1^{\text{BH}}, \bar{R}_2^{\text{BH}}, \dots, \bar{R}_N^{\text{BH}}]$,接入速率序列表示为 $[\bar{R}_1^{\text{AC}}, \bar{R}_2^{\text{AC}}, \dots, \bar{R}_N^{\text{AC}}]$ 。

然后,假定一个回传时间区间 $[t_{l^*-1}^{\text{BH}}, t_{l^*}^{\text{BH}}]$,该区间使得所有 SBS 的 $(l^* - 1)$ 个 SBS 是接入受限的, $(N - (l^* - 1))$ 个 SBS 是回传受限的,则全网总传输业务量 $\sum_{n=1}^N T_n$ 的一般表达式可表示为

$$\sum_{n=1}^N T_n = \sum_{n=1}^{l^*-1} (t - t_{uni}^{\text{BH}}) * \bar{R}_n^{\text{AC}} + \sum_{n=l^*}^N t_{uni}^{\text{BH}} * \bar{R}_n^{\text{BH}} \quad (18)$$

(18)式本质上是一种分段线性三角和函数且有 $t_{uni}^{\text{BH}} \in [t_{l^*-1}^{\text{BH}}, t_{l^*}^{\text{BH}}]$ 。由分段线性三角和函数最大化的相关理论可知, $\sum_{n=1}^N T_n$ 的峰值将出现在区间 $[t_{l^*-1}^{\text{BH}}, t_{l^*}^{\text{BH}}]$ 的端点上,那么问题的关键就是找出 l^* 。通过对 $\sum_{n=1}^N T_n$ 关于 t_{uni}^{BH} 求偏微分来确定 l^* 需要满足的条件,即:

$$\frac{\partial (\sum_{n=1}^N T_n)}{\partial t_{uni}^{\text{BH}}} = \sum_{n=l^*}^N \bar{R}_n^{\text{BH}} - \sum_{n=1}^{l^*-1} \bar{R}_n^{\text{AC}} = 0 \quad (19)$$

但是,考虑到 l^* 应该是一个整数,那么最终通过序列 $[\bar{R}_{l^*}^{\text{BH}}, \bar{R}_{l^*+1}^{\text{BH}}, \dots, \bar{R}_N^{\text{BH}}]$ 和 $[\bar{R}_1^{\text{AC}}, \bar{R}_{l^*+1}^{\text{AC}}, \dots, \bar{R}_N^{\text{AC}}]$ 确定的 l^* 应该满足的条件是使 $\sum_{n=l^*}^N \bar{R}_n^{\text{BH}} - \sum_{n=1}^{l^*-1} \bar{R}_n^{\text{AC}}$ 取值为正且最小,依据该条件我们就能够确定区间 $[t_{l^*-1}^{\text{BH}}, t_{l^*}^{\text{BH}}]$,从而获得(18)式的解,即使全网总传输业务量最大化并在各 SBS 中统一使用的最佳回传时间 t_{uni}^{BH} 。这说明区间 $[t_{l^*-1}^{\text{BH}}, t_{l^*}^{\text{BH}}]$ 是 $\sum_{n=1}^N T_n$ 的最后一段

增区间,因此选择 $t_{uni}^{BH} = t_{l^*}^{BH}$ 。

4 仿真分析

为仿真验证本文所提出的联合优化算法性能,我们将联合优化算法与现有文献中普遍使用的基准算法^[11,17,23](即基于最近距离的用户关联算法)进行对比分析。为公平起见,基准算法中的关联决策变量由每个用户接入到距离自己最近的 SBS 所确定,而在求解 SBS 及 UE 的波束视轴角变量时也采用 IOA 算法。

仿真中,设置每个 SBS 的覆盖范围内有 4 个随机分布的用户,所有 SBS 都部署在 MBS 的覆盖范围内,MBS 和各 SBS 的发送功率都是恒定的;抗体种群数量为 30,抗体记忆内存为 10,交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 分别为 0.5 和 0.4;算法中使用转轮盘法进行抗体的选择,并用与繁殖概率成比例的概率进行抗体个体选择;算法根据随机均匀分布的方式来选择抗体交叉的基因位置,并随机选择抗体字符串中的一个位置作为变异位。算法仿真中所用到的其他主要参数在表 1 中给出。

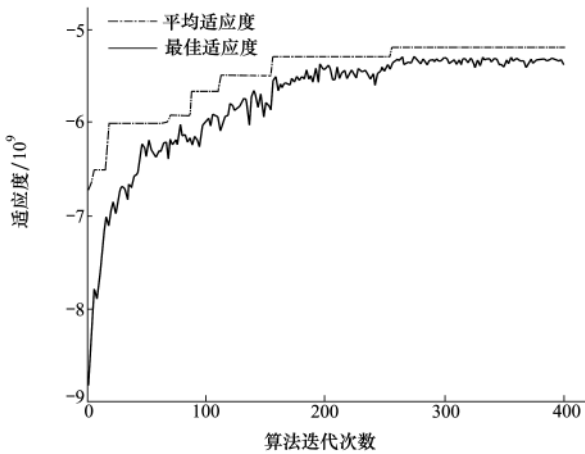


图 3 算法收敛性

图 4 给出了当网络中 SBS 数为 50 时,本文算法和基于最近距离接入的算法中全网各 SBS 的接入吞吐量、回传吞吐量的累计分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 图。观察图 4 中可得出以下结论:①由于网络中各 SBS 和 MBS 之间的路径损耗和阴影衰落不同,因此各 SBS 之间的回传吞吐量存在差异,即有些 SBS 的回传吞吐量较大(距离 MBS 较近),有些 SBS 的回传吞吐量较小(距离 MBS

表 1 算法仿真参数设置

参数名	取值
载波频率/带宽/Hz	60G/2G
sink 节点覆盖半径/m	500
SBS 覆盖半径/m	50
SBS 数	10/20/30/40/50/100/150/200
sink 节点发送功率/dBm	50
SBS 发送功率/dBm	30
噪声功率谱密度/(dBm · Hz ⁻¹)	-174
阴影标准差/dB	12
路径损耗/dBm	157.4+32log ₂ R, R 以 km 为单位

图 3 是最大迭代次数 $L_{max}^{iteration} = 400$ 时的算法收敛性曲线。图 3 中的最优适应度值是每轮迭代中根据 (10) 式对所有抗体计算后所得各值中的最小值;平均适应度是每轮迭代中所有抗体适应度的平均值。从图中可以明显看出;基于 IOA 的求解算法大约经过 260 次迭代即可求得稳定的最优解,基于 IOA 的用户关联求解算法有很好的收敛性。

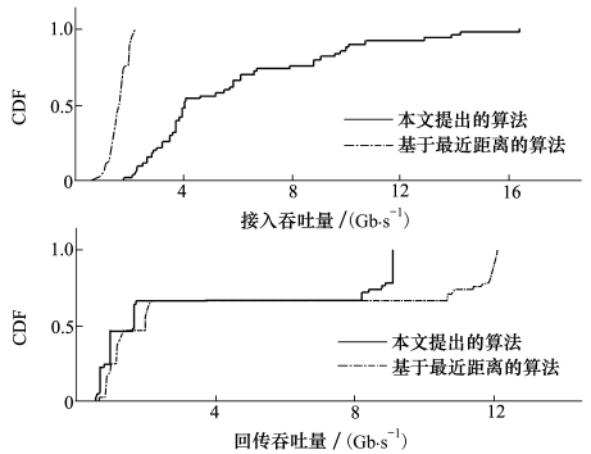


图 4 网络中各 SC 的接入吞吐量和回传吞吐量

较远),具体表现为图 4b) 中本文提出算法的 CDF 曲线的增长趋势;②相对于基于最近距离关联算法,本文提出的算法的各 SBS 的接入吞吐量更大,具体表现为图 4a) 中本文提出算法的 CDF 曲线相对于基于最近距离关联算法的 CDF 曲线整体右移;③与基准算法相比,本文提出的算法中各 SBS 的接入吞吐量和回传吞吐量匹配度较高,即回传吞吐量和接入吞吐量之间的差值相对较小,具体表现为,图 4a) 和

图4b)中本文提出算法的接入吞吐量和回传吞吐量CDF曲线整体匹配相对集中,即 $2\sim 8\text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间;而基于最近距离算法的回接入吞吐量与回传吞吐量CDF曲线整体匹配相对分散,即基于最近距离算法的接入吞吐量在 $2\text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,而回传吞吐量却大多在 $2\sim 12\text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,这也侧面表明为回传吞吐量较大的SBS关联更多用户,使得网络负载更加均衡,从而提升全网传输业务量。

从图5是当网络中SBS数为50时SBS端到端吞吐量CDF图。从图中可以看出:基于最近距离关联算法中各SBS的吞吐量大多在 $2\text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,本文所提出算法各SBS吞吐量大多在 $2\sim 9.16\text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,即本文所提出的联合优化算法在各SBS的实际端到端吞吐量方面性能更优。这是因为网络中各SBS的实际吞吐量取决于各SBS的回传吞吐量和接

入吞吐量二者中的较小者,本文提出算法使得用户尽量接入回传容量较大的SBS,以此降低SBS的接入吞吐量和回传吞吐量差异,使其达到相匹配,从而整体提升端到端吞吐量。

图6给出了给定覆盖区域中全网总吞吐量与网络中SBS数量的关系变化图。从图中可以看出:当网络SBS数量为100时,本文提出算法的网络总吞吐量比基于最近距离用户关联算法的网络总吞吐量高出近38%;随着网络中SBS数量的不断增加,全网总吞吐量呈下降趋势,这是因为随着网络节点密度的不断增加,毫米波波束之间的干扰也不断增加,网络从噪声受限网络变为干扰受限网络,引起网络性能下降。尽管如此,但是当SBS数量增加到200时,本文提出的联合优化算法的网络总吞吐量比基于最近距离关联算法的网络总吞吐量还高15.3%。

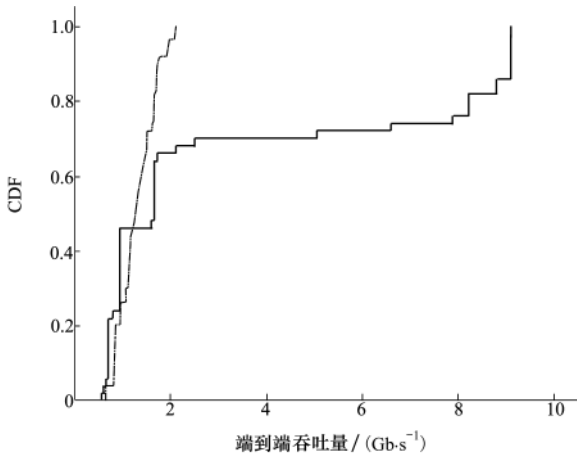


图5 网络中SC端到端吞吐量的CDF

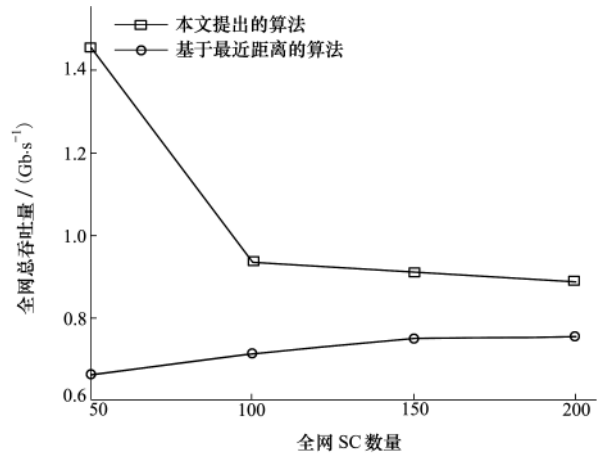


图6 网络总吞吐量与网络SC数关系变化图

5 结论

提出了mm-Wave IBAN中一种最大化网络吞吐量的用户关联和资源分配联合优化方法。首先用IOA算法求解用户关联决策变量、SC与用户的波瓣视轴角变量,然后通过总吞吐量一般表达式求导计算出SC接入链路和回传链路之间的最优时间分

配比例,最后用仿真证明了本文提出算法的收敛性和有效性。仿真结果表明:本文算法尽可能使用户与回传容量大的SC相关联,使SC接入速率与回程速率相匹配,从而使各SC吞吐量和全网总吞吐量也得以显著提高。本文仅研究了同步TDM模式下的用户关联与资源分配的联合优化方法,今后将进一步研究异步TDM模式下mm-Wave IBAN中的用户关联与资源分配联合优化方法。

参考文献:

- [1] OLWAL T O, DJOUANI K, KURIEN A M, et al. A Survey of Resource Management toward 5G Radio Access Networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3):1656-1686
- [2] PI Z, CHOI J, HEATH R. Millimeter-Wave Gigabit Broadband Evolution toward 5G: Fixed Access and Backhaul[J]. IEEE

- Communications Magazine, 2016, 54(4):138-144
- [3] ISLAM M N, SUBRAMANIAN S, SAMPATH A, et al. Integrated Access Backhaul in Millimeter Wave Networks[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, San Francisco, 2017: 1-6
- [4] MARSCH P, et al. 5G Radio Access Network Architecture: Design Guidelines and Key Considerations[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(11): 24-32
- [5] CACCIAPUOTI A S. Mobility-Aware User Association for 5G MmWave Networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 21497-21507
- [6] RONY R I, JAIN A, LOPEZ-AGUILERA E, et al. Joint Access-Backhaul Perspective on Mobility Management in 5G Networks [C]//Standards for Communications and Network, 2017
- [7] SAADAT S, CHEN D, JIANG T. Multipath Multi-Hop Mm-Wave Backhaul in Ultra-Dense Small-Cell Network[J]. Digital Communications and Networks, 2018, 4(2): 111-117
- [8] POLESE M, GIORDANI M, ROY A, et al. Distributed Path Selection Strategies for Integrated Access and Backhaul at mm-Waves[OL]. ArXiv Preprint ArXiv: 1805.04351, <https://arxiv.org/abs/1805.04351>
- [9] LI J, ZHU Y, WU D O. Practical Distributed Scheduling for QoS-Aware Small Cell mm-Wave Mesh Backhaul Network[J]. Ad Hoc Networks, 2017, 55: 62-71
- [10] YAO Y, TIAN H, NIE G, et al. Coloring Based Access-Backhaul Scheduling in Ultra Dense Networks with Flexible Duplex[C]//2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2018: 1-6
- [11] ZOLA E, KASSLER A J, KIM W. Joint User Association and Energy Aware Routing for Green Small Cell Mm-Wave Backhaul Networks[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2017: 1-6
- [12] HUERFANO D, DEMIRKOL I, LEGG P. Joint Optimization of Path Selection and Link Scheduling for Millimeter Wave Transport Networks[C]//2017 IEEE International Conference on Communications Workshops, 2017: 115-120
- [13] XIAO M, MUMTAZ S, HUANG Y, et al. Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(9): 1909-1935
- [14] SHOKRI-GHADIKOLAEI H, FISCHIONE C, FODOR G, et al. Millimeter Wave Cellular Networks: a MAC Layer Perspective [J]. IEEE Trans on Communications, 2015, 63(10): 3437-3458
- [15] YANG K, WANG L, WANG S, et al. Optimization of Resource Allocation and User Association for Energy Efficiency in Future Wireless Networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 16469-16477
- [16] MA H, ZHANG H, WANG X, et al. Backhaul-Aware User Association and Resource Allocation for Massive MIMO-Enabled HetNets[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(12): 2710-2713
- [17] REN G, QU H, ZHAO J, et al. A Distributed User Association and Resource Allocation Method in Cache-Enabled Small Cell Networks[J]. China Communications, 2017, 14(10): 95-107
- [18] MESODIAKAKI A, ADELANTADO F, ALONSO L, et al. Energy-and Spectrum-Efficient User Association in Millimeter-Wave Backhaul Small-Cell Networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1810-1821
- [19] FENG M, MAO S, JIANG T. Joint Frame Design, Resource Allocation and User Association for Massive MIMO Heterogeneous Networks with Wireless Backhaul[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2017(99):1-16
- [20] SIDDIQUE U, TABASSUM H, HOSSAIN E. Downlink Spectrum Allocation for In-Band and Out-Band Wireless Backhauling of Full-Duplex Small Cells[J]. IEEE Trans on Communication, 2017, 65(8): 3538-3554
- [21] Zhuang H, Chen J, Wu D O, et al. Joint Access and Backhaul Resource Management for Ultra-Dense Networks[C]//2017 IEEE International Conference on Communications, Paris, 2017: 1-6
- [22] SHI Z, WANG Y, HUANG L, et al. Dynamic Resource Allocation in Mm-Wave Unified Access and Backhaul Network[C]//International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, 2015: 2260-2264
- [23] LIU D, WANG L, CHEN Y, et al. User Association in 5G Networks: a Survey and an Outlook[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 18(2): 1018-1044

Joint Optimization of User Association and Resource Allocation for Millimeter-Wave Integrated Backhaul and Access Network

MA Zhongyu^{1,2}, LI Bo¹, YAN Zhongjiang¹, YANG Mao¹

(1.School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.College of Electronic Information Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Since the millimeter wave integrated backhaul and access network (mm-Wave IBAN) can divide the resource ratio between the access and the backhaul link as needed, there is a huge advantage in the improvement of the utilization rate for 5G communication network. A joint optimization method of user association and resource allocation is proposed and implemented for the mm-Wave IBAN from the perspective of the maximization of the transmission traffic in the whole network. The joint optimization problem of the user association and the resource allocation is formulated as a combined non-convex optimization problem, and then the problem is decomposed into two sub-problems. The first sub-problem, which is aimed at the maximization of the whole access rate, is the problem of the user association under the condition of the match between the access rate and backhaul rate. The second sub-problem, which is aimed at the maximization of the whole traffic of the network, is the problem of the resources allocation between the access link and backhaul link. The artificial immune optimization algorithm (IOA) is used to solve the first sub-problem. After that, the optimal transmission resource ratio between the access link and backhaul link is obtained according to the differentiating of the expression for the whole traffic. The simulation results show that the proposed method has more gains in the improvement of the whole network traffic when compared with the user association mechanism based on the nearest distance.

Keywords: 5G millimeter wave; integrated backhaul and access network (IBAN); user association; resource allocation; immune optimization