

区块链赋能的6G频谱共享技术



Blockchain Empowered Dynamic Spectrum Sharing for 6G

李祖广/LI Zuguang, 陈科/CHEN Ke,
王威/WANG Wei, 吴启晖/WU Qihui

(南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室, 中国 南京 211106)
(Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202205012

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20221013.1454.012.html>

网络出版日期: 2022-10-14

收稿日期: 2022-08-20

摘要: 6G无线网络将呈现资源协同化趋势, 全频谱统一接入无蜂窝技术已成为6G的关键技术之一。然而密集部署的无蜂窝基站在频谱共享时将产生严重的干扰。针对这一问题, 提出了一种基于联盟链的多基站协同功率控制方法。各基站共同组成一个联盟链网络, 并基于区块链共识机制实现基站间功率协调控制, 以降低因频谱共用而产生的干扰。以最大化系统的总吞吐量为目标, 优化各基站的发射功率, 并提出了一种等效变换方法以求解该非凸问题。仿真结果表明, 所提算法相较于最大功率分配和正交频分复用策略能显著减少基站的发射功率开销, 提升系统吞吐量。

关键词: 6G; 频谱共享; 协同功率控制; 联盟链

Abstract: 6G wireless networks will develop towards resource coordination, and unified access to the whole spectrum without cellular technology has become one of the key technologies of 6G. However, densely deployed base stations cause serious interference when they share spectrum resources. To solve this problem, a consortium blockchain based cooperative power control method for multiple small cell base stations is proposed. To reduce the interference due to spectrum sharing, base stations jointly form a consortium blockchain network, and achieve cooperative power control based on the consensus mechanism. Aiming at maximizing the total system throughput, the transmit power of each base station is optimized, and an equivalent transformation method is proposed to solve the non-convex problem. The simulation results show that compared with the maximum power allocation and orthogonal frequency division multiplexing strategies, our proposed algorithm can significantly reduce the whole power overhead of base stations and improve the system throughput in different scenarios.

Keywords: 6G; spectrum sharing; cooperative power control; consortium blockchain

IMT-2030 (6G) 推进组在《6G总体愿景与潜在关键技术白皮书》^[1]中指出, 6G将构建人机物智慧互联、智能体高效互通的新型网络, 实现空天地一体化的全球无缝覆盖。为支持这些应用, 6G必须实现以下性能指标: 50倍于5G的超高峰值速率 (1 Tbit/s)、10倍于5G的超大用户体验速率 (1 Gbit/s)、超低时延 (0.1 ms)、超高频谱利用率等。可以看出, 6G相较于5G需进一步提升系统容量和频谱利用率^[2]。然而, 当前频谱资源面临着两方面的矛盾: 一方面, 在当前无线通信业务增速快、基数大的背景下, 最适合无线通信的6 GHz以下的黄金频谱资源几乎分配殆尽^[3]; 另一方面, 现有的静态频谱分配及频谱独占方式导致频谱资源利用率普遍

较低^[4]。尽管6G计划引入太赫兹、可见光等更高频段的频谱, 但中低频段的频谱凭借路径损耗小、覆盖半径大、部署成本低等优势, 成为未来移动网络发展的重要资源。

3G、4G、5G主要采用多天线技术及密集组网的方法提高频谱效率。然而, 传统蜂窝架构增大天线规模遇到的物理实现问题和小区分裂遇到的干扰问题, 使得未来移动网络系统的频谱效率并不能持续性提升^[5]。作为6G的关键技术之一, 无蜂窝组网通过小区间多个基站的协作, 允许多个小区共享相同的时频资源, 进而大幅提升网络容量。无蜂窝系统可采用集中式架构和分布式架构。集中式架构将多个基带信号汇聚到中心化的资源池中进行联合处理, 但由于资源池的信号处理能力存在的瓶颈问题, 很难实现“无蜂窝”规模的无限扩大^[6]。此外, 集中式架构易发生单点故障, 从而导致整个系统的协作进程停滞。分布式架构虽能有效解决上述问题, 但也面临相互信任、身份认证、隐私安全等方面的

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB1005900); 国家自然科学基金 (62001220); 江苏省自然科学基金 (BK20200440); 江苏省未来网络创新基金 (FNSRFP-2021-YB-03)

问题。

区块链技术凭借区块奖励机制、历史记录防篡改、可追溯、用户隐私保护、分布式数据存储等性质,可以解决当前动态频谱共享中存在的共享动机不强、违规行为取证难、隐私安全性差的问题^[7-9]。区块链利用密码学原理和签名算法,在不需要参与者提供任何隐私信息的情况下,也可有效验证其身份;通过多方共同维护的分布式账本,使频谱资源所有权、使用权和交易信息可永久记录于链上,从而有效协助追责和维护交易双方权益;利用共识机制,可协助多方就某一策略达成共识,以实现各层级的协同合作。此外,链上部署的智能合约可自动执行频谱分配策略,从而保障频谱共享过程的公平性。与传统集中式数据库的方式相比,基于区块链的动态频谱共享在安全、效率方面具有巨大的潜力。在2018年世界移动通信大会(MWC)^[10]上,美国联邦通信委员会(FCC)认为基于区块链的动态频谱共享是6G的核心技术之一。

近年来,有不少学者对基于区块链的频谱共享进行了探索,并对区块链技术应用于6G无线网络的可行性进行了充分论证。文献[11]提出了一种双层区块链结构的频谱接入系统,该系统由区域链和全局链组成。其中,区域链主要服务于某一特定区域的频谱接入,全局链主要为服务器和监管节点在全域范围内提供服务。类似地,为降低系统复杂度和时延,文献[12]提出了一种基于区块链的动态资源共享模型,该模型同样由区域链和全局链组成。其中,区域链为公有链,由某一区域局部移动设备和一个基站组成;全局链为私有链,由该区域所有基站或其他网络实体组成。全局链上的节点定时同步区域链上的数据。文献[13]将区块链作为一个频谱分配平台,次用户可在该平台上购买主用户的空闲频谱。结合环签名算法,作者提出了一种隐私保护机制,以保证节点上传数据时的隐私安全。文献[14]提出了一种基于区块链的逆向拍卖机制,以用于无线网络中的动态频谱共享。其中,公有链用于记录用户提交的服务请求,私有链用于运营商和其他参与者共享频谱资源。

公有链(如比特币^[15]、以太坊^[16])主要通过工作证明(PoW)或股权证明(PoS)验证交易,但PoW和PoS等共识算法需要消耗大量电力和算力,甚至节点与节点之间可能演变成“算力竞赛”。联盟链相较于公有链仅允许授权用户加入,其共识算法主要为实用拜占庭容错算法(PBFT)、Kafka、Raft等,其共识过程通过节点对消息的审核和确认来实现,减少了算力开销。文献[17]提出了一种基于联盟链的物联网频谱共享架构,指出航空航天设备、运营商、地面移动设备、频谱管理部门等可通过联盟链实现可信的身份验

证和有效的数据映射。文献[18]利用联盟链实现多运营商之间的频谱共享,认为频谱管理者作为链上的高级节点,可对普通节点和分布式账本进行监管;此外,作者还提出了一种基于智能合约的双重拍卖机制,以激励运营商共享频谱。文献[19]提出了一种基于联盟链的5G频谱共享模型,并模拟了多运营商内部与外部的频谱共享与管理。文献[20]提出了用于5G异构网络中的联盟链架构,以满足人对人(H2H)通信和机器对机器(M2M)通信共存的场景,其中H2H用户作为主用户,可通过联盟链将频谱资源共享给M2M用户使用。

为解决分布式无蜂窝架构中相互信任、身份认证和隐私安全的问题,实现多个基站的协作,本文提出了一种基于联盟链的多小区基站协同功率控制方法,使各小区基站共同组成一个联盟链网络,在链上进行信息共享和功率协调控制,以减少各基站之间的相互干扰;此外,还提出了一种基站协同功率控制算法,以最大化系统的吞吐量。

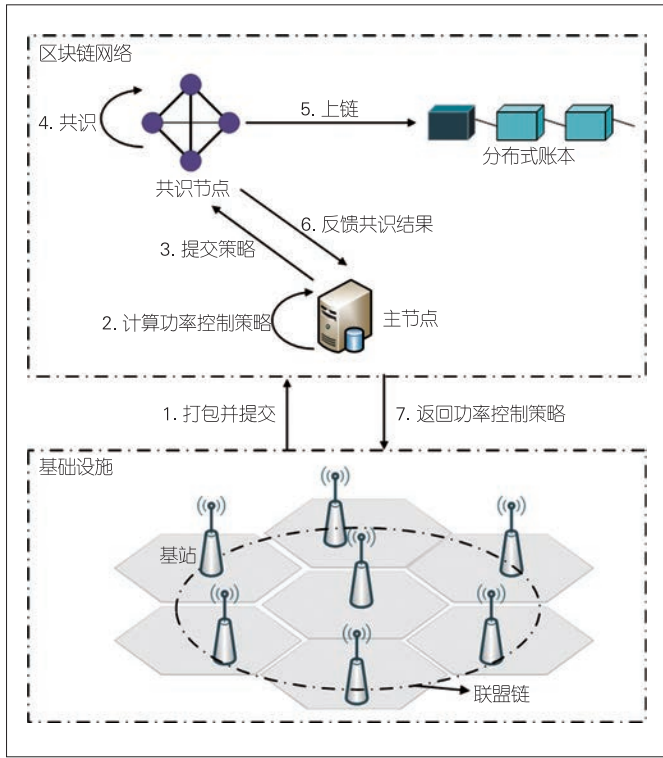
1 系统模型与流程描述

1.1 系统模型

如图1所示,假设在某一区域内共有 M 个基站,集合形式表示为 $\mathbf{M} = \{m|m = 1, \dots, M\}$,各基站共用同一中心频率和带宽的频谱。该区域共有 N 个用户,它们向所在小区的基站提交频谱接入申请,用户集合形式表示为 $\mathbf{N} = \{n|n = 1, \dots, N\}$ 。为便于分析,我们假设每个基站在时隙 T 内仅允许接入小区内的一个用户。为减少各小区基站因频谱共用而造成干扰,我们以各小区基站的发射功率为优化变量,使系统的吞吐量达到最大。该区域的所有基站共同组成一个联盟链网络。每个基站作为联盟链上的一个组织,在链上与其他基站进行信息共享并实现协同功率控制。

1.2 基站协同功率控制流程

在基于联盟链的多小区基站协同功率控制系统中,每个基站在申请成为联盟链上的一个组织前,必须首先获得证书颁发机构(CA)的认证。然后CA根据该组织角色为其生成数字身份证明。每个组织都拥有一对公私钥和相应的证书,以加密其共享的数据。在进行频谱接入时,每个用户可通过数字身份来展示自己的身份,联盟链上的成员服务管理员可验证每个用户数字身份的真实性和有效性。为减少通信开销,每次系统可选择一个主节点计算功率控制策略,即根据接入用户的地理位置、基站的地理位置和最大发射功率等,为基



▲图1 基于联盟链的多小区基站协同功率控制模型

站合理分配发射功率,以使系统的吞吐量达到最大。为激励主节点计算频谱分配任务,在完成任务后主节点可以获得各基站支付的相应报酬。为保证主节点选取的公平性和合理性,系统每次可通过信誉机制、算力等条件来选择合适的节点。

用户 n 将已签名的频谱接入请求 req_n 发送给临近的基站。这里 req_n 被定义为:

$$\text{req}_n = \{\text{id}_n, \text{sig}_n, \text{loc}_n, \text{dep}_n, \text{slot}_{no}\}, \quad (1)$$

其中, id_n 、 sig_n 和 loc_n 分别表示用户 n 的身份标识(ID)、数字签名和地理位置, dep_n 为用户 n 提交的押金, slot_{no} 为时间序号。

在每时间 slot_{no} 开始前,各基站收集和验证用户提交的频谱接入请求,就近选择一个用户为其提供频谱接入服务。各基站对提交的请求进行打包、签名后发送给被选中的主节点。基站提交的信息 MSG_m 被定义为:

$$\text{MSG}_m = \{\text{id}_m, \text{sig}_m, \text{loc}_m, \langle \text{req}_n \rangle_m, \text{slot}_{no}\}, \quad (2)$$

其中, $\langle \text{req}_n \rangle_m$ 为基站 m 选择接入用户的请求。主节点根据用户提交的 loc_n 和各基站的位置信息,计算最优的基站协同功率控制策略。在完成计算后,主节点将功率控制策略和基站提交的信息打包到一个区块,签名后将区块发送至共识节点。共识节点对功率控制策略进行评估和验证。该策略若获

得大部分共识节点认可,则被加入到分布式账本中;否则,该策略无效。在区块加入分布式账本后,系统将自动从用户提交的押金中扣除相应费用,并转入对应的基站钱包中。各基站也需要向主节点支付计算服务费用。各基站可通过查看账本获得最终的功率控制策略。基站或用户若违背频谱共享规则,则将被处罚一定金额的罚款。

2 基站协同功率控制算法

2.1 问题描述

为评估系统的吞吐量,我们以用户接入基站后下行链路的和速率作为评判依据。因各小区的基站共用同一频段,用户将受到来自附近其他小区基站的同频干扰。为此,接入基站 m 的用户下行链路的比特率 V_m 可定义为:

$$V_m = \log(1 + \text{SINR}_m), \quad (3)$$

其中, SINR_m 为接入基站 m 的用户下行链路的信号与干扰加噪声比,其表达式为:

$$\text{SINR}_m = \frac{p_m^r}{\sum_{l \neq m} I_l + \sigma^2} = \frac{p_m |h_{m,m}|^2}{\sum_{l \neq m} p_l |h_{m,l}|^2 + \sigma^2}, \quad (4)$$

其中, p_m^r 和 p_m 分别表示接入基站 m 对应用户的接收功率和基站 m 的发射功率, I_l 表示该用户收到来自区域内使用同一中心频率和带宽的其他基站的干扰, σ^2 表示信道噪声, $h_{m,m}$ 为该用户接入基站 m 的下行链路损耗, $h_{m,l}$ 为该用户接收到来自其他基站干扰信号的下行链路损耗。 $h_{m,l}$ 被定义为:

$$h_{m,l} = L_{m,l}^{-\beta/2} \tilde{h}_{m,l}, \quad (5)$$

其中, $L_{m,l}$ 表示接入基站 m 对应用户与基站 l 之间的距离, β 为路径损耗系数, $\tilde{h}_{m,l}$ 为接入基站 m 对应用户与基站 l 下行链路上的信道增益。

最优基站协同功率控制策略为使用户下行链路的和速率最大,优化变量为基站的发射功率 p_m 。数组 $\mathbf{p}$ 表示所有基站的发射功率策略,即 $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_m]$ 。功率控制策略可定义为如下的功率分配问题:

$$\begin{aligned} \max_{\{p_m\}} \quad & \sum_{m=1}^M \log \left[1 + \frac{p_m |h_{m,m}|^2}{\sum_{l \neq m} p_l |h_{m,l}|^2 + \sigma^2} \right] \\ \text{s.t.} \quad & p_m \leq P_m^{\max}, \forall m \in M. \end{aligned} \quad (6)$$

2.2 问题分析

公式 (6) 描述的问题不是一个凸优化问题。为此, 我们可将该问题转换为另一个等效的最小化问题, 其被定义为:

$$\begin{aligned} \min_{\{p_m\}} \quad & \sum_{m=1}^M (w_m e_m - \log w_m) \\ \text{s.t.} \quad & p_m \leq P_m^{\max}, \forall m \in M, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 w_m 为权重变量, e_m 被定义为:

$$e_m = \left(u_m \sqrt{p_m |h_{m,m}|^2} - 1 \right)^2 + u_m^2 \left(\sum_{l \neq m}^M p_l |h_{m,l}|^2 + \sigma^2 \right). \quad (8)$$

接下来, 我们将验证公式 (6) 描述的问题等价于公式 (7) 描述的问题。首先, 假设公式 (7) 的目标函数为 f , 则公式 (7) 中变量 w_m 和 u_m 取得最优解时, 应分别满足:

$$\frac{\partial f}{\partial w_m} = e_m - \frac{1}{w_m} = 0, \quad (9)$$

和

$$\frac{\partial f}{\partial u_m} = 2u_m \left(\sum_{l=1}^M p_l |h_{m,l}|^2 + \sigma^2 \right) - 2\sqrt{p_m |h_{m,m}|^2} = 0. \quad (10)$$

根据上式, 可得变量 w_m 和 u_m 的最优解分别为:

$$w_m^* = \frac{1}{e_m}, \quad \forall m \in \mathcal{M}, \quad (11)$$

和

$$u_m^* = \frac{\sqrt{p_m |h_{m,m}|^2}}{\sum_{l=1}^M p_l |h_{m,l}|^2 + \sigma^2}, \quad \forall m \in \mathcal{M}. \quad (12)$$

在得到 u_m 的最优解 u_m^* 后, 将 u_m^* 代入式(8), 可得到 e_m 的最优解 e_m^* 为:

$$e_m^* = 1 - \frac{p_m |h_{m,m}|^2}{\sum_{l=1}^M p_l |h_{m,l}|^2 + \sigma^2}, \quad \forall m \in \mathcal{M}. \quad (13)$$

将 w_m^* 和 e_m^* 代入公式 (7) 中, 我们可以验证公式 (7) 与公式 (6) 相同, 即公式 (6) 描述的问题和公式 (7) 描述的问题等价。

因为变量的均方根可看成一个凹函数, 所以我们可以定义 $P_m = \sqrt{p_m}$ 并将其作为功率分配问题中的新变量, 则公式 (7) 的第一个约束条件可重写为 $P_m > 0, P_m^2 \leq P_m^{\max}, \forall m \in M$ 。根据式 (11) 和 (12) 可得变量 w_m 和 u_m 的最优解, 而变量 P_m 的最优解可通过二次约束二次规划 (QCQP) 的方式计算得到。变量 P_m 的 QCQP 定义为:

$$\begin{aligned} \min_{\{P_m\}} \quad & B \sum_{m=1}^M w_m \left(u_m^2 \left(\sum_{l=1}^M |h_{m,l}|^2 P_l^2 \right) - 2u_m |h_{m,m}| P_m \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_m^2 \leq P_m^{\max}, \forall m \in M \\ & P_m \geq 0, \forall m \in M. \end{aligned} \quad (14)$$

依据上式可求出最小化问题的最优解 P_m^* , 求解步骤如算法 1 所示。随着迭代次数的增加, 目标函数将减小并逐渐收敛。

算法 1 协同功率控制算法

输入: 带宽 B , 信道噪声 σ^2 , 下行链路损耗系数 $[h_{m,l}]$, 各基站最大发射功率 $\{P_m^{\max}\}$;

输出: 最优基站发射功率 $\{P_m^*\}$;

1. //初始化基站的发射功率 $\{P_m\} = \{0\}$, 迭代次数 I ;
2. **for** $i = 1$ **to** I **do**
3. **for** $m = 1$ **to** M **do**
4. 根据公式 (12)、(13) 和 (11) 分别计算 u_m^* 、 e_m^* 和 w_m^* ;
5. $w_m = w_m^*, u_m = u_m^*$;
6. 将 w_m 和 u_m 代入公式 (14), 解 QCQP 问题可获得最优解 P_m^* ;
7. $P_m = P_m^*$.

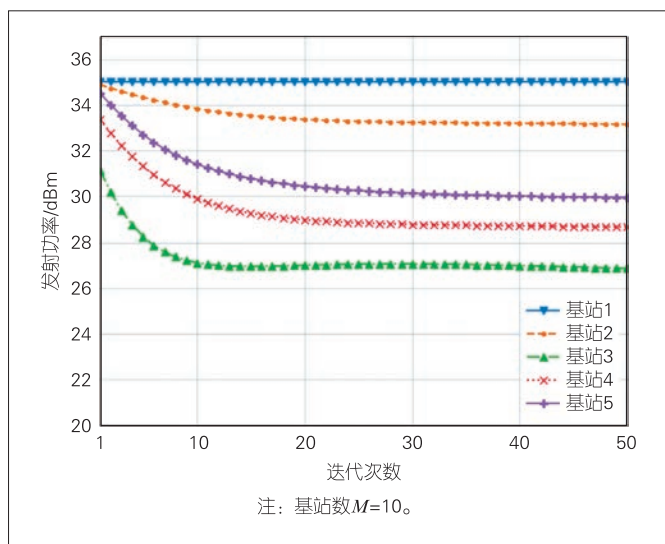
3 实验结果

我们通过 Python 语言搭建了所提基站最优协同功率控制算法的实验环境, 以验证所提算法的收敛性, 并在相同条件下对比所提算法与其他功率分配策略的性能。

假设 M 个基站均匀分布在一块 $3 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的长方形区域中, 每个基站所在小区至少有一个用户申请接入。每个基站的功率 $P_m^{\max}$ 均设为 35 dBm, 下行链路的路径损耗系数 $\beta = 2$, 各基站的信道增益服从均值为 1 的指数分布, 噪声功率 $\sigma^2 = -114 \text{ dBm}$ 。

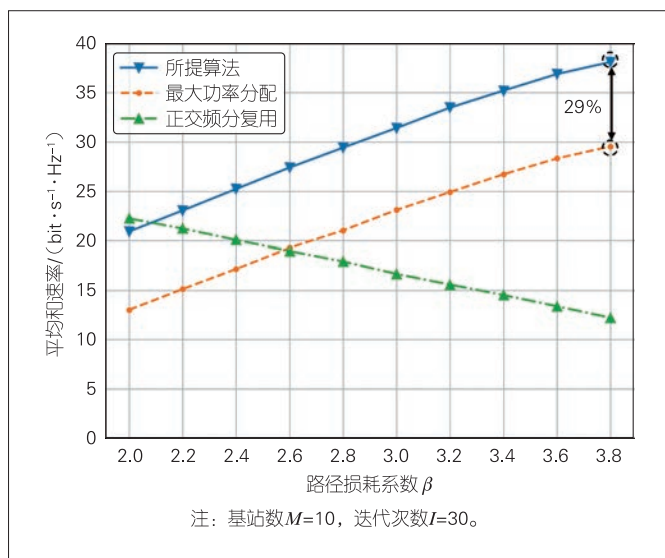
首先, 我们验证所提算法的收敛性。如图 2 所示, 随着迭代次数的增加, 各基站的发射功率最终都趋于稳定, 这说明所提算法收敛。此外, 从图中可以看出, 基站的最优发射功率并非最大功率。

其次, 我们对比所提算法、最大功率分配和正交频分复用 3 种策略的性能。在最大功率分配策略下, 我们将每个基站的发射功率设置为最大发射功率。在正交频分复用策略下, 每个基站的发射功率设置为最大发射功率, 频谱资源均分给每个基站, 且不考虑各基站间的邻频干扰。我们研究在不同路径损耗系数 β 情况下 3 种策略的性能差异, 所得数据均为 500 次循环迭代后的平均值。如图 3 所示, 随着 β 的增



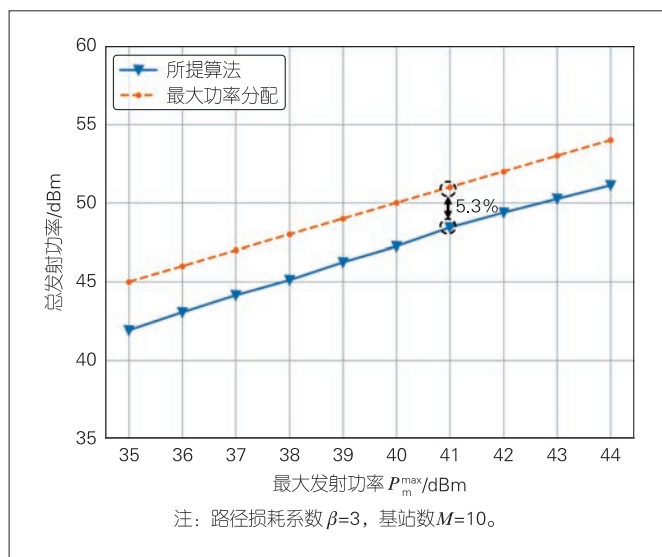
▲图2 基站发射功率与迭代次数的关系

大，所提算法和最大功率分配策略的平均和速率均在不断提高，而正交频分复用策略的平均和速率不断下降。当 $\beta > 2$ 时，所提算法的性能要明显优于正交频分复用策略。相较于最大功率分配策略，所提算法可提升系统性能29%以上。



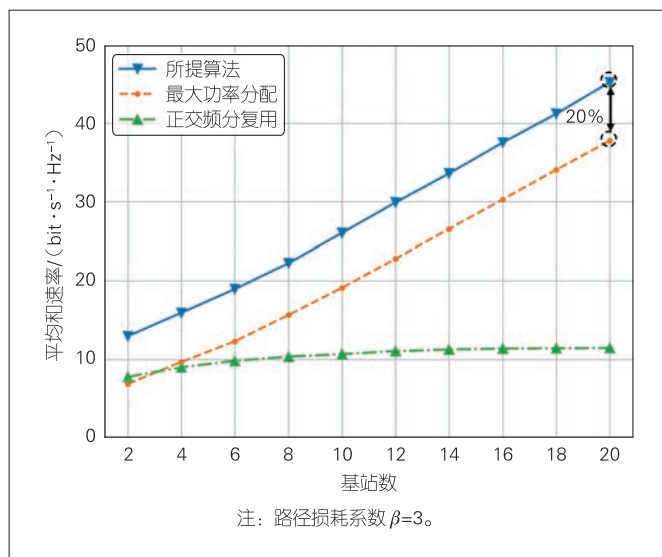
▲图3 平均和速率与路径损耗系数之间的关系

然后，我们对比3种策略下的基站总发射功率随最大发射功率的变化关系。因为各基站的发射功率在正交频分复用与最大功率分配策略下的值相同，所以我们仅对比所提算法与最大功率分配策略的总发射功率。如图4所示，随着最大发射功率的持续增大，所提算法和最大功率分配策略的总发射功率均会增大，但所提算法比最大功率分配策略节省5.3%以上的功率开销。



▲图4 总发射功率与最大发射功率之间的关系

最后，我们研究同一区域内基站数量与和速率之间的关系。如图5所示，随着基站数的增加，所提算法和最大功率分配策略的吞吐量均明显提高，而正交频分复用策略的吞吐量变化趋势不明显。此外，不论基站数的大小，所提算法的性能都要明显优于正交频分复用策略，且相较于最大功率分配策略，其平均和速率提高20%以上。



▲图5 平均和速率与基站数之间的关系

4 结束语

为减少密集部署基站之间的干扰并提高系统容量，本文提出了一种基于联盟链的多小区基站协同功率控制架构，将区块链技术融合到6G频谱共享和基站功率协同控制中，以

减少各基站之间的干扰；分析了基站之间的发射功率协同控制问题，提出了多小区基站协同功率控制算法，并通过仿真实验对所提算法进行了仿真验证。仿真结果表明：所提算法相较于正交频分复用策略可大幅提高系统吞吐量，相较于最大功率分配策略可提高20%以上的系统吞吐量，节省5.3%以上的功率开销。在未来的研究工作中，我们将进一步研究面向多小区的多维资源协同管理方法。

参考文献

- [1] IMT-2023(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021
- [2] 靳冬慧, 陈硕, 王占刚. 密集异构网络中基于多目标优化的资源分配策略[EB/OL]. [2022-08-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1267.TN.20220715.1854.002.html>
- [3] 丁家昕, 方箭, 王坦. 实施动态频谱管理 提高资源利用效率[J]. 中国无线电, 2018(1): 25-28
- [4] KOLODZY P, AVOIDANCE I. Spectrum policy task force [J]. Federal communications commission, 2002, 40(4): 147-58.
- [5] 王东明. 面向6G的无蜂窝大规模MIMO无线传输技术[J]. 移动通信, 2021, 45(4): 10-15
- [6] 尤肖虎, 王东明, 王江舟. 分布式MIMO与无蜂窝移动通信[M]. 北京: 科学出版社, 2019
- [7] 芒戈. 面向6G混合云频谱共享的区块链技术[J]. 电子技术应用, 2021, 47(6): 10-14. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211772
- [8] 王威, 李祖广, 吴启晖. 基于区块链的动态频谱共享接入技术[J]. 物联网学报, 2020, 4(2): 26-34
- [9] ZHANG H W, LENG S P, WU F, et al. A DAG blockchain-enhanced user-autonomy spectrum sharing framework for 6G-enabled IoT [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(11): 8012-8023. DOI: 10.1109/IJOT.2021.3109959
- [10] ROSENWORCEL J. Remarks of commissioner jessica rosenworcel at mobile world congress [EB/OL]. [2022-08-16]. <https://www.benton.org/headlines/remarks-commissioner-jessica-rosenworcel-mobile-world-congress-2018>
- [11] XIAO Y, SHI S H, LOU W J, et al. Decentralized spectrum access system: vision, challenges, and a blockchain solution [J]. IEEE wireless communications, 2022, 29(1): 220-228. DOI: 10.1109/MWC.101.2100354
- [12] HU S S, LIANG Y C, XIONG Z H, et al. Blockchain and artificial intelligence for dynamic resource sharing in 6G and beyond [J]. IEEE wireless communications, 2021, 28(4): 145-151. DOI: 10.1109/MWC.001.2000409
- [13] YE J W, KANG X, LIANG Y C, et al. A trust-centric privacy-preserving blockchain for dynamic spectrum management in IoT networks [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(15): 13263-13278. DOI: 10.1109/IJOT.2022.3142989
- [14] WILHELM F, GIUPPONI L. On the performance of blockchain-enabled RAN-as-a-service in beyond 5G networks [C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2021: 1-6. DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685431
- [15] NAKAMOTO S, BITCOIN A. A peer-to-peer electronic cash system [EB/OL]. [2022-08-16]. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- [16] WOOD G. Ethereum: a secure decentralised generalised transaction ledger [EB/OL]. [2022-08-16]. <http://cryptochainuni.com/wp-content/uploads/Ethereum-A-Secure-Decentralised-Generalised-Transaction-Ledger-Yellow-Paper.pdf>
- [17] SUN Z Q, LIANG W, QI F, et al. Blockchain-based dynamic spectrum sharing for 6G UIoT networks [J]. IEEE network, 2021, 35(5): 143-149. DOI: 10.1109/MNET.101.2100138
- [18] ZHENG S, HAN T, JIANG Y N, et al. Smart contract-based spectrum

sharing transactions for multi-operators wireless communication networks [J]. IEEE access, 2020, 8: 88547-88557. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2992385

- [19] GORLA P, CHAMOLA V, HASSIJA V, et al. Blockchain based framework for modeling and evaluating 5G spectrum sharing [J]. IEEE network, 2021, 35(2): 229-235. DOI: 10.1109/MNET.011.2000469
- [20] ZHOU Z Y, CHEN X Y, ZHANG Y, et al. Blockchain-empowered secure spectrum sharing for 5G heterogeneous networks [J]. IEEE network, 2020, 34(1): 24-31. DOI: 10.1109/MNET.001.1900188

作者简介



李祖广，南京航空航天大学电子信息工程学院在读硕士研究生；主要研究方向为动态频谱共享、区块链等。



陈科，南京航空航天大学电子信息工程学院在读博士研究生、天维迅达科技有限公司副总工、国际电联无线电通信研究组专家；主要研究领域为无线电通信电磁兼容分析和频谱资源管理；先后参加多个国家发展和改革委员会、工业和信息化部研究项目，参与多个国家标准的制定工作。



王威，南京航空航天大学电子信息工程学院研究员；主要研究方向为空地一体化网络、电磁频谱安全和区块链。



吴启晖，南京航空航天大学特聘教授、教育部“长江学者”特聘教授、国家百千万人才工程入选者、国家有突出贡献中青年专家、工业和信息化部通信科学技术委员会委员、IET Fellow、电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室主任、中国电子学会理事、中国通信学会云计算与大数据专业委员会副主任；主要研究方向为认知信息论、电磁空间频谱智能管控、天地一体化信息网络、无人机集群智能通信；主持无人机频谱认知仪国家自然科学基金重大仪器等国家级重大/重点项目10余项；获日内瓦国际发明展金奖1项、国家科技进步奖二等奖1项、省部级科技进步奖一等奖3项；发表论文100余篇。