

## 基于 SDN 的 5G 大规模 MIMO 网间频谱共享机制研究

刘涛涛<sup>1</sup>, 禹 忠<sup>1</sup>, 王军选<sup>1</sup>, 杨 鹏<sup>2</sup>

(1. 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121; 2. 中国信息通信研究院, 北京 100191)

**摘 要:** 在用户分布密集的区域, 传统的 gNB 端波束成形技术无法解决严重的网间同频干扰问题。为此, 提出一种软件定义网络(SDN)频谱统一协调管理方法。在 gNB 端与 UE 端均采用大规模多输入多输出(MIMO)波束对准技术计算最佳干扰阈值, 在 SDN 控制层使用干扰阈值优化贪心算法, 对各毫米波网络干扰链路频谱资源进行集中管理分配。仿真结果表明, 大规模 MIMO 技术能够实现资源复用, SDN 链路协调机制可以在频谱重用技术下带来协调增益, 该方法提升了干扰链路信噪比并提高了用户通信质量。

**关键词:** 大规模天线; 波束成形; 毫米波; 软件定义网络; 频谱共享

**中文引用格式:** 刘涛涛, 禹 忠, 王军选, 等. 基于 SDN 的 5G 大规模 MIMO 网间频谱共享机制研究[J]. 计算机工程, 2018, 44(11):100-104.

**英文引用格式:** LIU Taotao, YU Zhong, WANG Junxuan, et al. Research on spectrum sharing mechanism of 5G large scale MIMO networks based on SDN[J]. Computer Engineering, 2018, 44(11):100-104.

## Research on Spectrum Sharing Mechanism of 5G Large Scale MIMO Networks Based on SDN

LIU Taotao<sup>1</sup>, YU Zhong<sup>1</sup>, WANG Junxuan<sup>1</sup>, YANG Peng<sup>2</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;  
2. China Information and Communication Research Institute, Beijing 100191, China)

**[ Abstract ]** In the user-dense region, the traditional gNB beamforming technology can not solve the serious problem of co-channel interference between networks. Therefore, a unified and coordinated management method for Software Defined Network(SDN) spectrum is proposed. Large-scale Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) beam alignment technology is used to calculate the optimal interference threshold at both the gNB and UE terminals. SDN control layer uses interference threshold optimization greedy algorithm to centralize the management and allocation of spectrum resources of interference links in millimeter Wave (mmWave) networks. Simulation results show that large scale MIMO can achieve resource reuse, SDN link coordination mechanism can bring coordination gain under the spectrum reuse technology, this method improves the signal-to-noise ratio of interference link and improves the quality of user communication.

**[ Key words ]** large scale antenna; beamforming; millimeter Wave (mmWave); Software Defined Network (SDN); spectrum sharing

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0049079

### 0 概述

5G 毫米波 (millimeter Wave, mmWave) 系统设计理念不同于传统的移动通信系统, 其以更为广泛的多点分布、多用户通信、多天线系统和多小区合作为研究重点<sup>[1]</sup>, 力求在体系构架寻求系统性能的大幅度提高, 使系统提供超过 10 Gb 的峰值速率<sup>[2-3]</sup>。

随着 5G 的到来, 移动通信系统对无线电频谱日

益增长的需求与有限的可用频谱之间的矛盾愈发突出, 采用频谱共享技术能够使频率资源在时间和空间上利用更加均衡。在 5G 频谱共享方法中, 专家学者对频谱共享技术提出了诸多实现方法。一类是设置干扰阈值, 通过次用户复用主用户非授权频谱的方式提高频谱效率<sup>[4-5]</sup>, 该方法预先设定相应的干扰阈值, 当干扰值超出该阈值时, 触发干扰协调, 在干扰协调过程中次用户禁止复用主用户频谱<sup>[6]</sup>。另外一类是使用大规模多输入多输出 (Multiple-Input

**基金项目:** 国家科技重大专项 (2017ZX03001012-005)。

**作者简介:** 刘涛涛 (1991—), 男, 硕士, 主研方向为电子与通信工程; 禹 忠, 高级工程师; 王军选, 教授; 杨 鹏, 高级工程师。

**收稿日期:** 2017-10-26 **修回日期:** 2017-12-05 **E-mail:** 306240797@qq.com

Multiple-Output, MIMO) 技术实现波束成形以减小电磁波在其他方向的辐射规避干扰<sup>[7]</sup>,大规模 MIMO 与现有 MIMO 技术相比,其所实现的空间分辨率明显增强,能够深度挖掘空间维度资源,实现空间复用,也可将波束宽度集中在较窄的范围内,使基站侧发射电磁波形成的波束主瓣方向对准期望用户方向<sup>[7]</sup>,从而大幅降低网间干扰水平。

文献[8]论述基站端和用户端采用大规模 MIMO 在频谱共享网络中的潜在优势。文献[9]建立大规模 MIMO 技术的多波束时空超分辨率波束成形框架,在波束指向方向产生大的增益并抑制同频道干扰。文献[10]提出认知无线电(Cognitive Radio, CR)的大规模 MIMO 新型空间频谱共享策略,通过 CR 技术实现多个基站间的频谱共享。

但是,在现有的频谱共享方案中,采用简单的大规模 MIMO 波束成形技术不能有效规避不同网络间的干扰,特别是分布于住宅区、办公室、体育场等室内通信系统中的复杂干扰。为解决该问题,本文采用软件定义网络(Software Defined Network, SDN)频谱管理方案对各网间干扰链路进行集中式管理,结合 gNB 与 UE 波束成形技术获取最佳干扰阈值,简化干扰图关系,优化贪心算法,并为各干扰链路分配正交的频谱资源,从而规避网间链路的干扰。

## 1 SDN 频谱集中式管理方案设计

### 1.1 SDN 管理层架构设计

SDN 将控制平面与数据转发平面分离,实现编程化控制<sup>[11]</sup>。本文设计集中式 SDN 无线链路资源控制层协调器(Control Layer Coordinator, CLC),CLC 与各毫米波网络相互连接,负责对各网络无线链路资源进行统一分配管理,并为各个 mmWave 网络链路分配可用的频谱资源。各 mmWave 网络中包含 SDN 基础实施层协调器(Basic Implementation Layer Coordinator, BILC)和干扰数据库(Data Base, DB)。本文集中式 SDN 链路干扰管理层结构如图 1 所示。

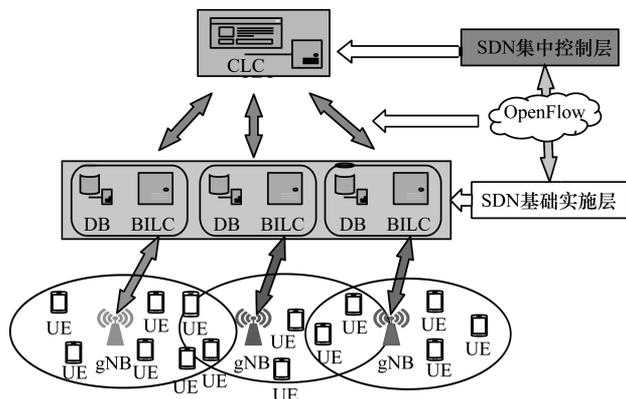


图 1 集中式链路干扰管理层结构

在各 mmWave 网络中,DB 存储该网络中的链路干扰信息,BILC 负责上传 DB 中的干扰信息至 CLC,同时接收 CLC 下发的协调信息。在各网络中,BILC 将干扰信息上传至 CLC,CLC 将各网络干扰链路集中构造成干扰图,并采用贪心算法对干扰图进行染色,统一对各个网络资源(时间/频率)实现重新规划和分配,为受干扰链路分配相互正交的频谱资源。

在图 2 所示的网络中,位于同一区域的网络 mmWaveA 中链路  $i$  与网络 mmWaveB 中链路  $j$  存在同频干扰,当链路  $i$  所受的干扰超出最大干扰阈值时触发干扰协调机制。协调指对应的干扰链路对(网络 mmWaveA 的链路  $i$  和网络 mmWaveB 的链路  $j$ ) 使用相同频谱资源时传输受限制,需对频谱资源进行重新分配。2 个干扰网络就这种资源划分进行协议,并调用 SDN 控制层协调器对干扰链路进行资源的重新划分。

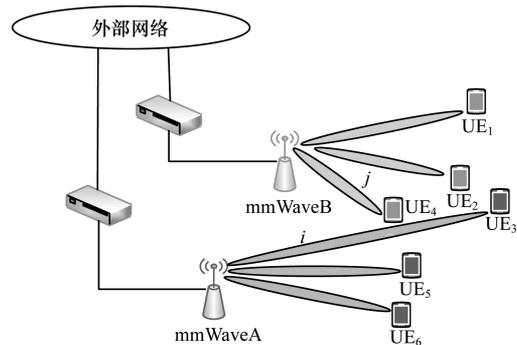


图 2 网间用户链路干扰示意图

### 1.2 大规模 MIMO 数学模型

在 gNB 端和 UE 端均采用大规模 MIMO,发射端采用波束成形技术产生特定角度波束指向接收端,接收端天线产生特定角度波束指向发射端,从而获取最佳干扰阈值。gNB 与 UE 波束对准示意图如图 3 所示。

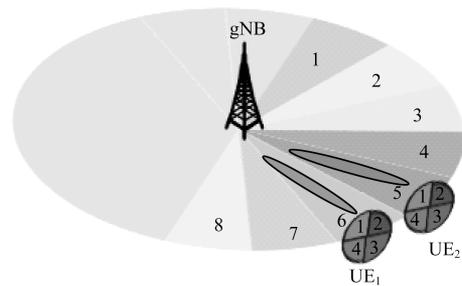


图 3 gNB 与 UE 波束对准示意图

发射机  $i$  到接收机  $j$  波束成形增益可表示为:

$$G(t, f)_{ij} = |\mathbf{W}_{rx_{ij}}^* \mathbf{H}(t, f)_{ij} \mathbf{W}_{tx_{ij}}|^2 \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{H}(t, f)_{ij}$  表示信道矩阵的第  $ij$  条链路,  $\mathbf{W}_{tx_{ij}}$  表示发射机  $i$  与接收机  $j$  的波束成形向量,  $\mathbf{W}_{rx_{ij}}$  表示接收机  $j$  从发射机  $i$  接收的接收向量。

用  $K$  个簇模拟 MIMO 信道模型, 每个簇均包含  $L$  个子径, 信道模型  $\mathbf{H}(t, f)$  表示为:

$$\mathbf{H}(t, f) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} g_{kl}(t, f) \mathbf{u}_{rx}(\theta_{kl}^{rx}, \varphi_{kl}^{rx}) \mathbf{u}_{tx}^*(\theta_{kl}^{tx}, \varphi_{kl}^{tx}) \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{u}_{rx}$  表示接收端空间特征向量,  $\mathbf{u}_{tx}$  表示发送端空间特征向量,  $g_{kl}(t, f)$  表示小尺度衰落, 其表示为:

$$g_{kl}(t, f) = \sqrt{P_{lk}} e^{2\pi i f_d \cos(\omega_{kl}) t - 2\pi i \tau_{kl} f} \quad (3)$$

其中,  $P_{lk}$  表示功率扩展。

小尺度衰落与簇的数目、子径的数量、多普勒频移、功率、延迟传播和到达角相关。

系统链路路径损耗和阴影(单位为 dB)表示为:

$$PL(d) = \alpha + \beta \times 10 \times \lg d + \xi, \xi \sim N(0, \delta^2) \quad (4)$$

波束成形信道干扰可表示为:

$$G_{ji} = |\mathbf{W}_{rx_{ji}}^* \mathbf{H}(t, f)_{ji} \mathbf{W}_{tx_{ji}}|^2 \quad (5)$$

采用式(5)计算各链路对目标链路的干扰值并标记最大干扰对, 从而形成控制层干扰协调决策的基础。

### 1.3 SDN 协调机制算法实现

系统引用反馈机制时, 各网络接入点通过干扰测量获取相应的干扰对。CLC 根据各 mmWave 网络反馈的干扰信息对网络中干扰链路重新分配相互正交的资源, 以实现网间频谱干扰协调管理。该过程具体步骤为:

**步骤 1** 网络间的干扰检测。通过干扰测量各 mmWave 网络中可确定链路  $i$  对其他某个网络链路用户  $k$  的干扰情况, 同时测量出其他 mmWave 网络中链路  $j$  对自身网络链路  $i$  的干扰情况。各网络将干扰链路对信息存储在该网络的干扰数据库中, 用于形成 SDN 控制层干扰链路协调决策的基本条件。

**步骤 2** 实施层干扰信息传输。将各 mmWave 网络中所测量的干扰信息与上述获取的最佳干扰阈值进行比对, 去除 DB 中干扰值小于干扰阈值的干扰信息, 其中, 每个链路干扰信息将被表示为链路 id (例如, 基站 id + 用户 id), 每个 mmWave 网络将测量结果发送给与其连接的 BILC, BILC 将接收到的所有需要被协调的信息集合发送至 CLC, 并由 CLC 完成统一的资源管理与协调。

**步骤 3** 控制层链路资源分配。各个 BILC 将干扰链路对上报至 CLC, CLC 通过边和节点的关系建立干扰图, 边  $G = (v, e)$ , 节点  $V = \{v_n\}$ , 节点最大的度为  $\Delta G, 1 \leq n \leq N, e = \{e_{n,m}\}, n \neq m, 且 1 \leq n, m \leq N$ , 其中,  $V$  和  $e$  分别表示图的边和顶点的集合。为避免不同链路间的干扰, 应对相干扰链路分配正交的资源。若用不同的颜色代表不同的资源, 该正交资源表示为  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ , 则干扰协调决策问题可表述为图的着色问题<sup>[12]</sup>。图的着色问题是最著名的 NP 完全问题之一, 对于  $N$  个节点用  $K$  种颜色进行染色, 可描述为:

$$A_{opt} = \operatorname{argmax} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \alpha_n^k \cdot \ln(1 + SINR_n) \quad (6)$$

满足  $N > K$ , 采用上述方式进行染色的算法复杂度为:

$$C_{exhaustive} = O\left(\frac{K^N}{K!}\right) \quad (7)$$

本文通过计算最佳干扰阈值简化图的关系, 对于干扰图进行着色, 该过程如图 4 所示。

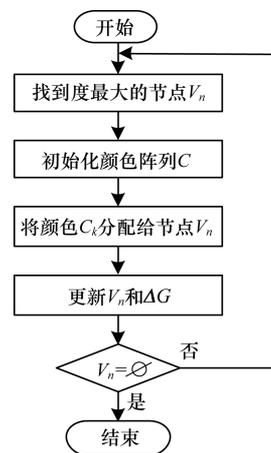


图 4 着色算法流程

采用上述方式对于干扰图进行着色, 算法复杂度为:

$$C_{prop} = O(KN^2)$$

**步骤 4** 基础实施层资源调度。SDN 控制层完成干扰图的着色后, CLC 需要将干扰协调结果发送到每一个与之连接的 BILC, BILC 将干扰信息发送至对应的 gNB, 当 gNB 收到干扰协调决策报告后, 将重新设定决策所分配的资源, 如果一个链路没有被协调, 则该链路频谱资源不做重新分配。

### 1.4 系统模型设置

本文系统使用网络仿真器 ns-3<sup>[13-14]</sup>, 系统频率为 26 GHz, 其物理层帧结构与 LTE 帧结构<sup>[15]</sup>相似, 一个帧长为 10 ms, 每个帧分为 10 个长度为 1 ms 的子帧, 每个子帧划分为 8 个长度为 125 μs 的时隙。在频域中, 将 1 GHz 的带宽划分为 4 个资源块 (Resource Block, RB), 每个 RB 被细分为宽度为 13.89 MHz 的 18 个子带, 共 72 个子带, 每个子带由 48 个子载波组成。

## 2 仿真结果与分析

仿真时选用室内环境, 模拟一个长、宽、高分别为 6 m、8 m、3 m 的房间进行室内环境网络间链路干扰仿真, 如图 5 所示, 其中, 仅画出部分 UE。在该环境中部署了 2 个不同的毫米波网络 mmWaveA 和 mmWaveB, 在房间中总共放置 20 个 UE, 每个 UE 均

随机接入到一个 mmWave 网络中。设置该场景下的 UE 以不同的速度缓慢移动,用此场景来模拟 2 个网络中波束指向同一空间,且在同一时间内使用相同的频谱资源时 2 个不同网络间的链路干扰情况,从而验证本文方案的可行性及性能。

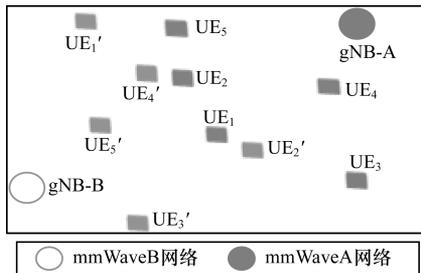


图 5 系统仿真环境

当链路干扰值超出最大干扰阈值时,系统不触发 SDN 链路干扰协调机制,仅使用大规模 MIMO 波束成形技术规避不同网络间的链路干扰,即通过阵列天线产生指向不同方向用户的波束,每个波束使用不同的频谱资源来避免相互之间的干扰。但在用户分布密集的区域,不同 gNB 的同频波束可能指向相同的区域,在此区域的用户则会受到网间同频干扰。

对上述情境进行仿真,mmWaveA 网络与 mmWaveB 网络仿真结果分别如图 6、图 7 所示。其中,mmWaveA 网络中 UE<sub>2</sub> 所在链路 *i* 与 mmWaveB 网络中 UE<sub>1</sub> 所在链路 *j* 使用相同的频谱资源。从图 6 可以看出,mmWaveA 网络中 UE<sub>2</sub> 受到 mmWaveB 网络中 UE<sub>1</sub> 链路严重的同频干扰,mmWaveA 网络中 UE<sub>2</sub> 信噪比仅为 2 dB 左右,明显小于该网络中未受干扰的 UE<sub>1</sub>、UE<sub>3</sub> 所在链路。由图 7 可以看出,mmWaveB 网络中 UE<sub>1</sub> 所在链路同样受到来自 mmWaveA 网络的 UE<sub>2</sub> 所在链路的同频干扰,UE<sub>3</sub> 的用户信噪比约为 7 dB,相比于 mmWaveB 网络中未受干扰的 UE<sub>1</sub>、UE<sub>2</sub> 所在链路,信噪比干扰较严重。随着仿真程序的不断运行,mmWaveA 网络与 mmWaveB 网络中各用户信噪比未发生明显变化。

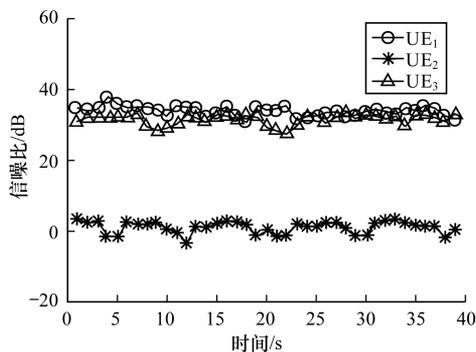


图 6 mmWaveA 各链路干扰仿真结果

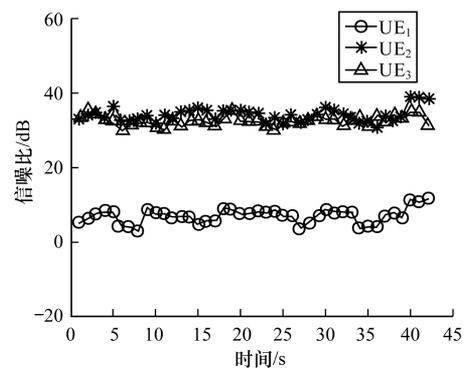


图 7 mmWaveB 各链路干扰仿真结果

在保持上述室内仿真环境及相关参数不变的情况下,对场景增加特定链路干扰协调方案,当链路干扰值大于设置的干扰阈值时,触发链路干扰协调机制,再次进行仿真,结果如图 8、图 9 所示。

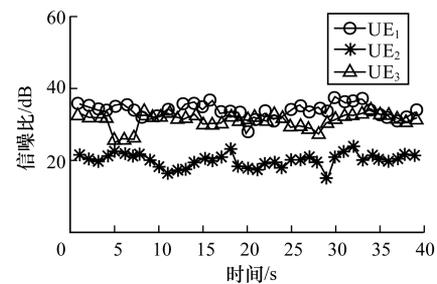


图 8 mmWaveA 网络各链路干扰协调仿真结果

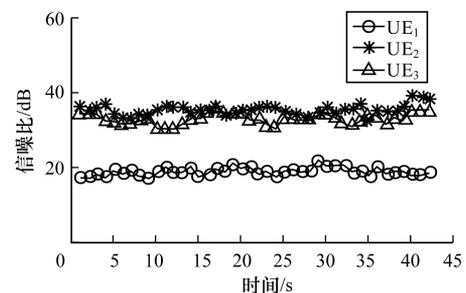


图 9 mmWaveB 网络各链路干扰协调仿真结果

在图 8 中,mmWaveA 网络未干扰链路 UE<sub>1</sub>、UE<sub>3</sub> 以及图 9 中未干扰链路 UE<sub>2</sub>、UE<sub>3</sub> 的信噪比,在 SDN 控制层协调器触发干扰协调前后无明显变化。而图 8、图 9 中 mmWaveA 网络的 UE<sub>2</sub> 所在链路与 mmWaveB 网络的 UE<sub>3</sub> 所在链路受到严重同频干扰时,触发 SDN 控制层协调机制。SDN 控制器通过获取不同 gNB 网络中的干扰链路用户,对所有网络的网间干扰链路重新分配互不干扰的频谱资源,从而解决了大规模 MIMO 因不同波束频谱资源分配不协调而产生的网间用户同频干扰问题。在采用 SDN 对干扰链路资源集中管理调度方案后,mmWaveA 网络用户 UE<sub>2</sub> 与 mmWaveB 中 UE<sub>3</sub> 干扰链路被重新分配资源,链路间相互干扰明显减弱,干扰链路信噪比大幅提升,从而提高了干扰用户的通信质量,有助

于降低 gNB 与 UE 之间的数据传输误码率,最终有效提高系统中用户通信质量。

### 3 结束语

本文提出一种大规模 MIMO 技术与 SDN 链路资源集中式管理方法。通过 SDN 控制层的集中式管理方案获取网间干扰链路对信息,用网间干扰链路对组建干扰图并对干扰图进行着色、分配频谱资源,对相干扰链路分配相互正交的频谱资源,可以有效降低网间用户干扰。与简单的大规模 MIMO 频谱资源共享机制相比,采用 SDN 链路协调机制能解决大规模 MIMO 中波束不能合理分配频谱资源而导致的网间链路干扰问题,采用 SDN 与大规模 MIMO 相结合的方式,可以避免链路的同频干扰,提高链路平均信噪比,最终提升用户通信质量。

#### 参考文献

- [ 1 ] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学:信息科学,2014,44(5):551-563.
- [ 2 ] FALLGREN M, TIMUS B. Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system[EB/OL]. [2017-09-25]. <https://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/9/317669/080/deliverables/001-METISD11v1pdf.pdf>.
- [ 3 ] NEHA, GUPTA P. 5G radio access-research and vision[J]. Journal of Electronics and Communication Engineering,2017,12(3):96-103.
- [ 4 ] 李冬,杨亮,刘潺. 基于干扰温度的多用户 MIMO 频谱共享系统容量分析[J]. 移动通信,2014,38(2):48-53.
- [ 5 ] 陈剑斌,朱磊,赵莺,等. 适用于频谱重叠共享 CRN 的分组调度算法[J]. 计算机工程,2012,38(3):93-96.
- [ 6 ] CHIU S L, LIN C J, LIN G X, et al. Empowering device-to-device networks with cross-link interference management[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017,16(4):950-963.
- [ 7 ] BOUIDA Z, GHAYEB A, QARAQE K A. Adaptive spatial modulation for spectrally-efficient MIMO systems [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015:583-587.
- [ 8 ] WANG L, NGO H Q, ELKASHLAN M, et al. Massive MIMO in spectrum sharing networks: achievable rate and power efficiency [J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(1):20-31.
- [ 9 ] SRIDHAR V, GABILLARD T, MANIKAS A. Spatiotemporal-MIMO channel estimator and beamformer for 5G [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(12):8025-8038.
- [ 10 ] XIE H, WANG B, GAO F, et al. A full-space spectrum-sharing strategy for massive MIMO cognitive radio systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(10):2537-2549.
- [ 11 ] 张雷,支小莉. 基于 SDN 多播的分布式共享内存研究[J]. 计算机工程,2018,44(8):48-53,60.
- [ 12 ] TSOLKAS D, LIOTOU E, PASSAS N, et al. A graph-coloring secondary resource allocation for D2D communications in LTE networks [C]//Proceedings of IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012:56-60.
- [ 13 ] What is ns-3 [EB/OL]. [2017-09-25]. <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>.
- [ 14 ] MEZZAVILLA M, DUTTA S, ZHANG M, et al. 5G mmWave module for the ns-3 network simulator [C]// Proceedings of ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. New York, USA: ACM Press, 2015:283-290.
- [ 15 ] Adiscrete-event network simulator [EB/OL]. [2017-09-25]. <https://www.nsnam.org/docs/release/3.26/models/html/lte.html>.
- [ 12 ] ADONI K A, JOSHI R D. Multipath OLSR with energy optimization in mobile Ad hoc network (MANET) [M]// MEGHANATHAN N, CHAKI N, NAGAMALAI D. Advances in computer science and information technology. Berlin, Germany: Springer, 2012:552-561.
- [ 13 ] HUANG M, LIANG Q, XI J. A parallel disjointed multi-path routing algorithm based on OLSR and energy in Ad Hoc networks [J]. Journal of Networks, 2012, 7(4):613-620.
- [ 14 ] 王昊天. 基于 ETX 度量的无线多跳网络路由研究与优化[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [ 15 ] DRAVES R, PADHYE J, ZILL B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks [C]// Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM Press, 2004:114-128.
- [ 16 ] COUTO D S J D, AGUAYO D, BICKET J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing [C]// Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM Press, 2003:134-146.
- [ 17 ] KESHAV S. A control-theoretic approach to flow control [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1991, 25(1):3-15.

编辑 吴云芳

(上接第99页)

编辑 吴云芳