

基于物理层安全的 C-RAN 绿色资源管理算法

朱 炜¹, 张晓玲², 张馨戈³, 李嘉颖⁴, 周迅钊⁵

(1. 江苏大学附属医院 医学工程部, 江苏 镇江 212000)

(2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

(3. 香港中文大学 信息工程专业, 香港 999077; 4. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100141)

(5. 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 南京 210007)

摘要:研究了基于物理层安全的云无线接入网络(C-RAN)联合频谱和功率分配算法。首先,利用单拍卖理论对C-RAN频谱分配问题进行数学建模,并且提出了最大化安全吞吐量的频谱分配算法;然后,使用Max-Min公平性原则提出了最大化最小用户的能量效率功率分配算法;最后,仿真结果表明所提算法相比其他算法能够获得更优的安全吞吐量,以及较公平的能效比。

关键词:云无线接入网络;物理层安全;绿色资源管理;拍卖理论

中图分类号:TP393;TN926

文献标志码:A

文章编号:1004-7859(2020)07-0029-04

引用格式:朱 炜, 张晓玲, 张馨戈, 等. 基于物理层安全的 C-RAN 绿色资源管理算法研究[J]. 现代雷达, 2020, 42(7): 29-32.

ZHU Wei, ZHANG Xiaoling, ZHANG Xin'ge, et al. Green resource management algorithm based on physical layer security for C-RAN[J]. Modern Radar, 2020, 42(7): 29-32.

Green Resource Management Algorithm Based on Physical Layer Security for C-RAN

ZHU Wei¹, ZHANG Xiaoling², ZHANG Xin'ge³, LI Jiaying⁴, ZHOU Xunzhao⁵

(1. Medical Engineering Department, Affiliated Hospital of Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

(2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industry, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

(3. Information Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hongkong 999077, China)

(4. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China)

(5. 28 Institute of China Electronic Technology Group, Nanjing 210007, China)

Abstract: According to the physical layer security, the joint spectrum allocation and power allocation algorithm is investigated for C-RAN. Firstly, the spectrum allocation problem is formulated via the one-sided auction theory, and a spectrum allocation algorithm is proposed to maximize the security throughput. Then, a power allocation is proposed to maximize the minimization energy efficiency among different users. Finally, the proposed algorithm not only improves the security throughput, but also guarantees the energy efficiency fairness among different users compared with other algorithms.

Key words: cloud radio access network; physical layer security; green resource management; auction theory

0 引 言

云无线接入网络(C-RAN)能够通过集中式基带处理池(BBU)统一管理频谱资源和功率资源,在频谱和功率资源分配上具有优势。C-RAN架构打破了传统通信系统中不同基站间、网络间软硬件不能共享的瓶颈^[1-2]。人们对服务质量的要求有所提高,并且有着多变性。这些问题都使得静态的频谱分配不能达到高效利用频谱的效果,因此近些年动态频谱分配

(DSA)的算法研究渐渐增多^[3]。

在DSA算法研究中,拍卖算法可以看作一个较为公平的方式,拍卖算法可以根据不同用户的竞价来分配频谱,在保证公平竞争的情况下,为得到最大频谱效益的用户分配相应的频谱^[3]。文献[4]对拍卖的激励机制进行了描述,这种激励机制是运作拍卖方法的核心思想,通过拍卖来分配频谱有着不同于其他方法的优势。在频谱使用高峰时,拍卖算法能够提供高效稳定的频谱分配策略;而在非高峰时,拍卖算法的激励机制又能提供相对公平快速的频谱分配。文献[5]结合层间干扰问题和能效问题,提供了一个多小区的正交

频分多址 (OFDMA) 分布式功率分配解决方案。文献 [6] 提供了一个优化的中继选择算法, 用以提高接入的用户平均能效。另外, 文献 [7] 使用双向注水的方法解决频谱和功率分配, 减少了功率消耗。

物理层安全是一种基于香农信息论的安全技术, 其基本原理是利用通信信道和噪声的随机性来限制可被认证终端所窃取的信息量^[8-10]。虽然有研究通过双向拍卖解决了移动云计算资源调度的问题, 但是 C-RAN 网络物理层安全研究还处于初级阶段, 对于考虑安全因素的资源分配问题还存在很多不足。虽然上述文献研究了拍卖算法以及功率优化算法, 但是没有用于基于物理层安全的 C-RAN 有效频谱单拍卖算法。因此, 本文提出了应用于 C-RAN 网络场景的单拍卖算法。另外, 针对能效比不均衡的问题, 本文提出在 C-RAN 网络中频谱拍卖后进行针对能量效率性能进行功率优化, 形成一个联合的频谱分配及功率分配的方案。

1 系统模型和优化问题描述

C-RAN 系统结构分为基带处理单元池、光纤链路和远程无线传输网。在远程无线传输网络中, 远端无线射频单元的集合是 $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$, 用户设备的集合是 $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$; K 表示远程无线传输单元的个数, M 表示用户设备的个数, 云无线接入网络中有一个窃听者。无线频段划分为 N 个正交子载波, 子载波集合是 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 。在 C-RAN 系统中, 无线资源管理问题处理集中在基带处理单元池中执行。

根据香农公式, 第 m 个用户连接第 k 个远程无线射频单元使用第 n 个子载波时的传输率表示为

$$C_{mk}^n = B_0 \ln \left(\frac{B_0 N_0 + p_{mk}^n d_{mk} h_{mk}}{B_0 N_0 + p_{mk}^n g_{ek} f_{ek}} \right) \quad (1)$$

式中: p_{mk}^n 表示第 m 个用户连接第 k 个远程无线射频单元使用第 n 个子载波时的功率; B_0 表示一个子载波的带宽; N_0 表示功率谱密度; d_{mk} 表示第 k 个远程无线射频单元到第 m 个用户设备的路径损耗; h_{mk} 表示信道第 k 个远程无线射频单元到第 m 个用户信道增益; g_{ek} 表示第 k 个远程无线射频单元到窃听者的路径损耗; f_{ek} 表示信道第 k 个远程无线射频单元到窃听者信道增益。

因此, 在 C-RAN 网络中, 所有用户的吞吐量之和如下

$$R = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mk}^n C_{mk}^n \quad (2)$$

式中: $\mathbf{a} = [a_{mk}^n]_{N \times M \times K}$ 表示分配策略的集合, a_{mk}^n 表示第 n 个子载波是否分配给第 m 个用户与第 k 个远程无线

射频单元通信链接的指示变量。变量 a_{mk}^n 解空间的可行域如式 (3)。

$$a_{mk}^n \in \{0, 1\}, \forall m, k, n \quad (3)$$

式中: 若 $a_{mk}^n = 1$, 则表示第 n 个子载波分配给第 m 个用户与第 k 个远程无线射频单元通信链接; 否则表示不分配。

在一个时隙中, 子载波分配应满足式 (4) 约束,

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M a_{mk}^n = 1, \forall n \quad (4)$$

在 C-RAN 系统中, 用户 m 需要满足最小传输速率 C_m^{\min} 的需求, 如式 (5),

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M a_{mk}^n C_{mk}^n \geq C_m^{\min}, \forall m \quad (5)$$

而根据功率服务要求的原则, 则可以得出总功率小于 P_{\max} 。因此, 有功率约束如下

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mk}^n p_{mk}^n < P_{\max} \quad (6)$$

根据资源均衡的要求, 为了使更多远端无线射频单元 (RRH) 参与到服务提供, 缓解设备压力, 并且提高通信效率, 本文约束了每个 RRH 最大分配的子载波数量。

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mk}^n < K_0, \forall k \quad (7)$$

式中: K_0 表示每个 RRH 最大分配的子载波数量。

综上, 得到基于吞吐量最大化的优化问题

$$\begin{cases} \max R = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mk}^n C_{mk}^n \\ \text{s. t. 式 (3) ~ 式 (7)} \end{cases} \quad (8)$$

由于式 (8) 是一个 NP 难非凸的优化问题, 无法得到联合频谱分配和功率分配的最优解; 因此, 将式 (8) 转化为频谱分配子问题和功率分配子问题, 并且分别求解。

2 基于单拍卖的频谱分配算法

对于向用户分配子载波, 本文提供单拍卖算法展示了其自发性和经济性的特点。在求解频谱分配过程, 假设在所有子载波上等功率分配。子载波自主选取获得高吞吐量的用户到 RRH 链接, 使得系统总吞吐量最大化。而每轮拍卖前需要获取用户的位置信息、服务要求信息、服务质量 (QoS) 等, 这些信息的传递所需的资源相对于服务要求所需的资源忽略不计。因此, 本文只讨论资源调度对总的吞吐量的影响。因为

频谱是等大小划分的,并且频谱全部通过 BBU 池统一管理,所以视所有子载波等价。将所有的子载波编号,形成大小为 N 的集合。对每个子载波进行逐一拍卖,将子载波拍卖给能够获得最大吞吐量的用户及 RRH 链接。

结合实际信道干扰要求,根据式(8)获得单拍卖频谱调度算法(SBA)。各个竞标者不知道其他竞标者的竞标信息,竞标者只保证自己的最优出价。具体优化目标如下

$$\begin{cases} \max R = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mk}^n C_{mk}^n \\ \text{s. t.} \quad \text{式(3) ~ 式(7)} \end{cases} \quad (9)$$

竞标价格是根据香农容量公式计算得到,由于使用吞吐量作为竞标目标,因此拍卖的频谱在一定时刻满足最高的吞吐量,对于第 m 个用户设备连接第 k 个 RRH,拍卖竞价如下

$$b_{mk} = C_{mk}^n \quad (10)$$

对于第 m 个用户设备,他的竞价是在第 m 个用户设备连接所有 K 个 RRH 中选择最大的竞价

$$\begin{cases} b_m = \max \{ b_{mk} \} \\ \text{s. t.} \quad \text{式(7)}, k \in \mathcal{K} \end{cases} \quad (11)$$

由于拍卖第 n 个子载波时,若用户 m 此时剩余的服务要求低于此时使用子载波的最大竞价 b_m ,那么根据单拍卖的出价原理,用户此时不能获得最大竞价 b_m 。那么令用户 m 的剩余服务要求 C_{Qm} ,则可以获得用户 m 在第 n 个子载波拍卖时的竞标价。

$$b_m = \min \{ C_{Qm}, b_m \} \quad (12)$$

根据式(10)~式(12)得出第 m 个用户的拍卖竞标价格。

$$\begin{cases} b_m = \min \{ C_{Qm}, \max \{ C_{mk}^n \} \} \\ \text{s. t.} \quad \text{式(7)}, k \in \mathcal{K} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)以及单拍卖方法理论,得出以下单拍卖频谱分配算法。

步骤1 生成位置信息,得到 $\mathcal{D} = \{ d_{mk} \}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}$, \mathcal{D} 表示所有用户设备到所有 RRH 之间的距离;生成每个用户的服务要求 $\mathcal{R} = \{ R_m \}, \forall m \in \mathcal{M}$, \mathcal{R} 表示所有用户服务要求的集合;初始化拍卖频谱标志 $n=1$ 。

步骤2 根据式(13)获得所有用户的竞价 b_m , $\forall m \in \mathcal{M}$ 。

步骤3 将频谱 n 分配给最高竞价的用户,并且将对应分配为1,即 $a_{mk}^n = 1$ 。更新限制参数,包括用户剩余服务质量 C_{Qm} , $\forall m \in \mathcal{M}$ 。

步骤4 判断是否结束。若 $n > N$ 则完成频谱分

配,进入下一步;若所有 $C_{Qm}, \forall m \in \mathcal{M}$ 均为0,则完成所有服务要求,进入下一步;否则 $n=n+1$,跳转步骤2。

步骤5 结束,并输出最优分配 a^* 。

3 基于 Max-Min 方法的功率分配算法

完成频谱分配之后,本文使用 Max-Min 公平理念,利用一个参数迭代优化算法解决功率分配问题,可以有效提高用户最小能效比(EE),并且提升公平性。

可以得到总功率

$$P_{\text{total}} = \varphi_0 \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mk}^n P_{mk}^n + P_c + P_{\text{bh}} \quad (14)$$

式中: φ_0 表示功率放大器的放大参数; P_c 表示电路功耗; P_{bh} 表示前传功耗。由于优化要求是各个用户之间的能效比达到较为均衡的公平高效状态,因此忽略 P_c, P_{bh} 等常量参数,讨论第 m 个用户的服务功率,其总功率如下

$$P_m = \varphi_0 \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{mk}^n P_{mk}^n \quad (15)$$

第 m 个用户的吞吐量如下

$$R_m = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{mk}^n C_{mk}^n \quad (16)$$

本文使用能量效率作为每个用户功率分配的平衡性指标,使用 Max-Min 理念作为公平性保证的方法,提高用户最小能效比。进而提出一个参数优化方案,最大化所有用户的最小 EE 性能。这样,就不会有用户在功率分配之后遭遇极大地功率分配不均,而这种不均往往导致用户饥饿的产生。具体优化目标如下

$$\begin{cases} \max_{a^*} \min_{m \in \mathcal{M}} \left\{ \gamma_m = \frac{R_m}{P_m} \right\} \\ \text{s. t.} \quad \text{式(5),式(6)}, a_{mk}^n \in \mathcal{A}^* \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\mathcal{P} = [p_{mk}^n]_{N \times M \times K}$ 表示功率分配策略,表示所有第 m 个用户设备连接到第 k 个 RRH,使用第 n 个信道所分配的功率。根据优化目标式(17),本文使用一个参数迭代的方法完成资源调度,此算法是基于贪心算法的理念,保留已经尝试的最优参数,并且给出一个最大化最小 EE 性能的功率分配算法(MMA),最后获得一个公平的功率分配 \mathcal{P}^* 。

首先,设置初始化参数

$$\lambda = \min_{m \in \mathcal{M}} \gamma_m \quad (18)$$

然后,根据式(17)中的目标函数,转化为如下优化条件 $F(\lambda) = \max_{a^*} \left\{ \min_{m \in \mathcal{M}} \{ R_m - \lambda P_m \} \right\}$ 。采用参数迭代的方法,得出 MMA 算法流程如下。

步骤1 读入频谱分配生成的位置信息及频谱分配结果 α^* , 生成参数 $\lambda=0$, 生成最大迭代次数 T 。

步骤2 根据式(17)的限制条件, 随机生成一个功率分配方案 \mathcal{P}_0 ;

步骤3 对于第 $t \leq T$ 次迭代, 求解式(17), 若最小能效比增加, 则更新参数 $\lambda(t+1) = \min_{m \in \mathcal{M}} \gamma_m(t)$, $t=t+1$ 。

步骤4 判断是否结束。若 $t > T$ 则完成迭代, 进入下一步; 若 $F(\lambda) = 0$, 则算法收敛, 进入下一步; 否则跳转步骤2。

步骤5 结束, 并输出最优分配 \mathcal{P}^* 。

4 仿真实验分析

为了验证本文所提算法的性能, 本节将利用 MATLAB 仿真平台对所提算法进行仿真, 并将单拍卖频谱分配算法和最邻近频谱分配算法进行比较, 将基于 EE 性能的 Max-Min 分配算法和平均功率分配算法作比较。具体仿真条件如下: 带宽 $B_0 = 5$ MHz, 功率谱密度 $N_0 = 10^{-7}$ W/Hz, 平均功率 10 dBm, 子载波数目 $N = 30$, RRH 数目 $K = 6$, 用户设备 UE 数目 $M = 10$, 用户设备 UE 和 RRH 散布在 $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$ 的范围内, 每轮仿真 RRH 位置固定, 但 UE 位置流动。

将本文提出的方法 SBA 与最优信道分配算法, 即就近分配算法 (NDA) 作比较, 获得吞吐量随频谱数量及平均功率的变化关系, 如图 1 所示。由仿真结果可以看出, SBA 算法和 NDA 算法所获取的总吞吐量均随着频谱资源块的增加而增加, 最后由于资源块数量可以满足此时的所有服务, 因此获得收敛。单独观测 SBA, $p_m = 10$ 和 $p_m = 15$ 的仿真曲线, 通过收敛点可以看出相同情况下, 系统平均功率高会使得系统总吞吐量有所提升; 另外根据上升阶段斜率可以看出, 高平均功率能够提升系统的频谱资源利用效率。

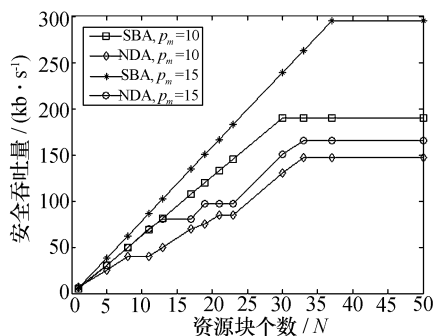


图1 单拍卖算法下吞吐量随频谱数量变化关系

根据参数算法, 多次迭代获得了 300 次的最小能效比的仿真图像, 并绘制了 300 次仿真的最大化最小能效比 (MMA) 随迭代次数的变化图像, 另外求取了平均功率算法 (APA) 的最小能效比图线, 如图 2 所示。

多次迭代获得了 300 次的吞吐量仿真图像, 并且得出了 300 次吞吐量随迭代次数变化的曲线 (MMA), 另外求取了平均功率算法 (APA) 的吞吐量随迭代次数变化的仿真图线, 如图 3 所示。由图中可以看出, 相比 APA 算法, 本文提出的 MMA 算法总能在多次迭代后获得较高的最小能量效率性能。这样就可以使得部分低吞吐量要求的用户不会占用过多的功率资源, 功率资源可以更好地均衡分配, 使得系统资源得到充分优化, 同时兼顾了公平性, 有助于获得更高的系统吞吐量和资源利用率。

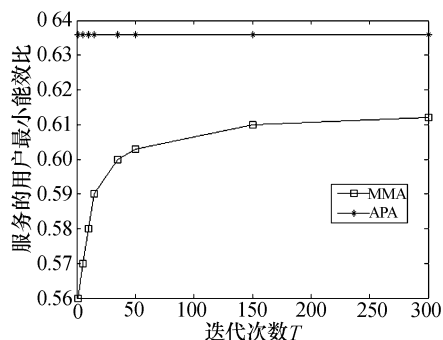


图2 最小能效比随迭代次数变化

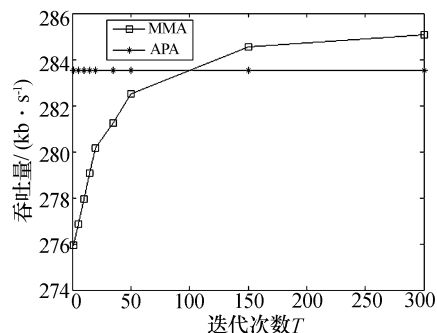


图3 吞吐量随迭代次数变化

5 结束语

本文首先对 C-RAN 资源分配的优势及使用方式进行了介绍, 介绍了动态频谱分配算法这种解决方案的相关研究; 然后, 对该网络的资源分配问题进行了建模, 使用非合作博弈中的单拍卖算法提高系统的总吞吐量; 最后, 使用 Max-Min 算法进行功率分配, 提高能量效率的公平性。仿真结果表明, 使用本文所提的联合分配算法, 能够在兼顾能效公平性的情况下提高系统吞吐量。

参考文献

- [1] 雷秋燕, 张治中, 程方, 等. 基于 C-RAN 的 5G 无线接入网架构[J]. 电信科学, 2015, 31(1): 106-115.
LEI Qiuyan, ZHANG Zhizhong, CHENG Fang, et al., 5G radio access network architecture based on C-RAN[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(1): 106-115.

(下转第 44 页)

- [4] CETIN M, KARL W. Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on nonquadratic regularization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(4): 623-631.
- [5] ZHANG B, HONG W, WU Y. Sparse microwave imaging: Principles and applications[J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(8): 1722-1754.
- [6] FANG J, XU Z, ZHANG B, et al. Fast compressed sensing SAR imaging based on approximated observation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(1): 352-363.
- [7] CASTEEL C. A challenge problem for 2D/3D imaging of targets from a volumetric data set in an urban environment [C]// Proceedings of SPIE in Defense and Security Symposium. Orlando: SPIE Press, 2007.
- [8] BI Hui, ZHANG Bingchen, ZHU Xiaoxiang, et al. Extended chirp scaling-baseband azimuth scaling-based azimuth-range decouple L1 regularization for TOPS SAR imaging via CAMP[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(7): 3748-3763.
- [9] DONOHO D. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [10] DAUBECHIES I, DEFRISE M, MOL C. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint[J]. Communications on Pure & Applied Mathematics, 2004, 57(11): 1413-1457.
- [11] BLUMENSATH T, DAVIES M. Normalized iterative hard thresholding: guaranteed stability and performance [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 298-309.

作者简介:

韩明 男,1980年生,硕士,高级工程师,研究方向为雷达系统技术、军用信息系统以及军品市场等;

魏中浩 男,1991年生,博士,工程师,研究方向为 SAR 成像技术。

(上接第 32 页)

- [2] SAIMLER M, COLERI S. Multi-connectivity based uplink/downlink decoupled energy efficient user association in 5G heterogenous CRAN [J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(4): 858-862.
- [3] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [4] GAO L, HUANG J, CHEN Y J, et al. Contr auction: an integrated contract and auction design for dynamic spectrum sharing[C]// Proceedings of 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). Princeton, NJ: IEEE Press, 2012: 1-6.
- [5] FEI Z, XING C, LI N, et al. Adaptive multiobjective optimization for energy efficient interference coordination in multicell networks [J]. IET Communications, 2014, 8(8): 1374-1383.
- [6] HO C Y, HUANG C Y. Energy efficient subcarrier-power allocation and relay selection scheme for OFDMA-based cooperative relay networks [C]// Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kyoto: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [7] SUN C, CEN Y, YANG C. Energy efficient OFDM relay systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(5): 1797-1809.
- [8] YANG T, MAO G, ZHANG W. Connectivity of wireless information-theoretic secure networks [C]// Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Conference. Austin, USA: IEEE Press, 2014: 317-323.
- [9] BLOCH M, BARROS J, RODRIGUES M R D, et al. Wireless information-theoretic security[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(6): 2515-2534.
- [10] OZGUR A, JOHARI R, TSE D N, et al. Information-theoretic operating regimes of large wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(1): 427-437.

作者简介:

朱炜 男,1971年生,本科,工程师,研究方向为无线网络资源管理;

张晓玲 女,1982年生,博士,副研究员,研究方向为工业无线通信技术及标准化;

张馨戈 女,1999年生,本科,研究方向为无线网络技术;

李嘉颖 女,1983年生,工程师,研究方向为卫星通信、电子信息;

周迅钊 男,1992年生,硕士,工程师,研究方向为无线网络资源管理。