

面向灾后电力应急通信系统的多 AP 协作功率控制技术

刘喆¹ 杨迎春² 周剑² 张颢³ 傅宁⁴ 白晖峰⁵

(1. 西南交通大学信息科学与技术学院 四川 成都 611756; 2. 国网四川省电力公司 四川 成都 610041;
3. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041; 4. 国网思极神往位置服务(北京) 有限公司 北京 102211;
5. 北京智芯微电子科技有限公司 北京 102299)

摘要: 为解决重大自然灾害发生后灾区电力系统的应急通信问题,近年来出现了利用 Wi-Fi 结合北斗技术的解决方案. 如何增大系统覆盖能力、数据传输能力、用户承载能力,增强系统部署便宜性、灵活性是该应急通信系统面临的核心挑战. 针对灾后电力应急通信系统上述核心需求,本研究基于第 7 代 Wi-Fi 多接入点(access point, AP) 协作通信技术,提出一种协作式功率控制技术: 增加无线接入过程中用户类型,并调整部分协议帧结构,具化相关字段用于指示新增用户类型; 结合软频率复用技术设计了频谱资源分配算法和 AP 中心功率控制算法. 仿真结果表明,与现有 Wi-Fi 系统多 AP 协作技术和软频率复用技术相比,所提算法有效提高了数据传输能力; 与现有多 AP 协作技术相比,在用户承载能力相近条件下,可提高信号覆盖范围.

关键词: Wi-Fi; 北斗; 多 AP 协作; 软频率复用; 功率控制

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

著录信息: 刘喆, 杨迎春, 周剑, 等. 面向灾后电力应急通信系统的多 AP 协作功率控制技术[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2023, 45(2).

LIU Z, YANG Y C, ZHOU J, et al. Power control technology based on AP cooperation for Post-disaster power emergency communication system[J]. Journal of Hubei University(Natural Science), 2023, 45(2).

Power control technology based on AP cooperation for Post-disaster power emergency communication system

LIU Zhe¹, YANG Yingchun², ZHOU Jian², ZHANG Jie³, FU Ning⁴, BAI Huifeng⁵

(1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 3. State Grid Sichuan Electric Research Institute, Chengdu 610041, China; 4. State Grid Shenwang LBS(Beijing) Co., Ltd., Beijing 102211, China;
5. Beijing Smartchip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 102299, China)

Abstract: In order to solve the emergency communication problem of power system in disaster areas after major natural disasters, a solution using Wi-Fi combined with Beidou technology has emerged in recent years. How to increase the coverage capacity, data transmission capacity and user carrying capacity of the system, and enhance the cheapness and flexibility of system deployment are the core challenges faced by the emergency communication system. To deal with this, a power control technology based on the 7th generation Wi-Fi multi access point (AP) cooperative communication technology was proposed: Increasing the user types in the process of wireless access; The structure of some protocol frames were adjusted and relevant fields are specified

收稿日期: 2022 - 03 - 08

基金项目: 国网四川电科院基于电力北斗的无人区通信接入技术研究与设备研制项目(52199720002G) 资助

作者简介: 刘喆(1997 -) 男, 硕士生; 张颢, 通信作者, 博士, 高级工程师, E-mail: zhangjie2093@ 163. com

to indicate new user types; Combined with soft frequency multiplexing technology, the spectrum resource allocation algorithm and AP center power control algorithm were designed. The simulation results show that compared with the existing multi AP cooperation technology and soft frequency multiplexing technology of Wi-Fi system, the proposed algorithm effectively improves the data transmission ability; Compared with the existing multi AP cooperation technology, the signal coverage is improved under the condition that the capacity of the system to carry users is similar.

Key words: Wireless Fidelity (Wi-Fi); Beidou; multi AP cooperation; soft frequency reuse; power control

0 引言

电力工业是社会发展的基础产业,在国民经济中占据关键地位^[1],而电力通信系统的高质量服务对整个电网的安全稳定运行起着至关重要的作用.我国电力通信系统主要包含光纤通信、电力无线专网通信和电力无线公网通信三种数据通信方式.当重大自然灾害发生时电力通信系统有可能受到严重破坏,进而影响各个电力设备的正常运行,甚至会导致整个电网瘫痪.为提高电力通信系统抵御大型自然灾害的能力,近年来出现了利用 Wi-Fi 结合北斗技术来快速构建灾后电力应急通信系统的抗灾方案^[2].该方案选择 Wi-Fi 网络中的无线 AP 作为电力设备通信的无线接入点,解决信号的本地覆盖问题. AP 是 Wi-Fi 无线网络的核心节点,相比于蜂窝无线网络中的基站, Wi-Fi 网络 AP 节点部署灵活、方便,搭建时间、人力、经济成本大大减少,因此选择 Wi-Fi 网络 AP 节点来提供本地无线空口接入能力可有效克服自然灾害后,灾区通行困难、物资匮乏等诸多网络布置障碍.另一方面,该方案选择北斗卫星系统作为灾区和外界远距离通信的载体.北斗卫星系统具备跨地域信号覆盖、不受地表环境影响、可全天候、全天时提供通信服务的独特优势,能有效满足灾区临时布置的电力 Wi-Fi 网络和外界进行远距离应急通信的需求.如何增大灾后电力应急通信系统的数据传输能力、本地覆盖能力以及用户承载能力是当前该领域的热点研究问题.

灾后电力应急通信系统通过布置多个 AP 为灾区电力设备提供本地无线网络覆盖,但布置的多个 AP 之间,进行频率复用时会产生同频干扰.因此,做好多 AP 间的干扰管理对于提高灾后电力应急通信系统数据传输能力至关重要.文献[3-5]中研究了协作空间复用(coordinated spatial reuse, CSR)技术,通过 AP 间协作,联合控制各自发射功率,减小了 AP 间同频干扰,明显提高了数据传输速率.然而,CSR 技术在密集型场景下存在重叠基本服务集(overlapping basic service set, OBSS),处在 OBSS 区域内的用户仍会受到严重干扰.文献[6-7]中研究了协作正交频分多址(coordinated orthogonal frequency division multiple access, C-OFDMA)技术,通过 AP 间协作,为不同 AP 分配正交的频谱资源,从而消除 AP 间干扰,明显扩大网络覆盖范围.但是,其频谱效率低下,导致系统数据传输能力下降. Yang^[8]将 CSR 技术和 C-OFDMA 技术进行结合,在不同区域使用不同频率复用因子,并提出了协作空间复用结合正交频分多址(joint coordinated spatial reuse and orthogonal frequency division multiple access, CSR&OFDMA)技术,最终提高了系统整体容量.文献[9-11]中研究了软频率复用技术,将用户分为中心区域用户和边缘区域用户, AP 向不同区域用户发送下行数据时使用不同发射功率,在获得较高频率复用率的同时减小了 AP 间干扰,提高了系统整体传输和覆盖能力.

一系列针对北斗技术的改进都可用于增大灾后电力应急通信系统的远距离通信能力.杨双^[12]针对北斗卫星链路易受大气条件、电磁环境等因素影响,数据频繁丢包的问题,提出了一种适用于北斗大容量通信的丢包重传机制,提高了系统数据传输稳定性.张薇^[13]基于用户接收天线合成波束增益和所处地理位置的北斗卫星发射波束增益,提出了一种天线波束指向算法,可以保证用户接收天线合成波束实时指向最优北斗卫星,从而提高北斗系统传输能力.徐挺^[14]研究了按需分配的单路单载波(single channel per carrier/demand assigned multiple access, SCPC/DAMA)技术,在保证系统通信正常的基础上,降低了设备成本,增强了系统部署灵活性.王晓明^[15]针对应用环境复杂多变的问题,采用多网融合技

术,将 Wi-Fi 和北斗通信网络融合应用到了灾后电力应急通信系统当中,提高了系统数据传输的稳定性。

在上述工程需求和技术发展的背景下,本研究基于第 7 代 Wi-Fi 多 AP 协作通信技术,提出一种协作式功率控制技术,有效改善灾后电力应急通信系统本地无线网络接入能力。具体而言:增加无线接入过程中用户类型,并调整部分协议帧结构,具化相关字段用于指示新增用户类型;结合 AP 协作技术和软频率复用技术设计了频谱资源分配算法和 AP 中心功率控制算法。仿真结果表明,与现有 Wi-Fi 系统多 AP 协作技术和软频率复用技术相比,所提算法有效提高了数据传输能力;与现有多 AP 协作技术相比,在用户承载能力相近条件下,可提高信号覆盖范围。

1 系统模型及用户识别过程

1.1 网络模型 本研究考虑的网络模型如图 1 所示。在链路上行,灾区电力设备通过 Wi-Fi 无线 AP 节点完成本地入网,“AP+北斗模块”通过北斗通信链路向北斗卫星发送上行数据包。在链路上下行,北斗卫星通过北斗通信链路向“AP+北斗模块”发送下行数据包,“AP+北斗模块”通过无线 AP 节点,将下行数据包发送给灾区电力设备。

1.2 接入用户类型及其识别方法 为了协调好多 AP 间的干扰管理,软频率复用技术中将用户类型识别为中心区域用户和边缘区域用户。在此基础上,本研究对边缘区域用户类型进一步细分,将用户识别为 CSR

区域用户、3 dB 区域用户和 C-OFDMA 区域用户。新增用户类型定义和识别方法在 1.2 小节介绍。

图 2 为 IEEE 802.11be 现有标准提案^[16]下,用户接入过程中,协议帧类型和发送流程举例。其中, a^c 表示主 AP; a^s 表示从 AP; 第 m 个站点(station, STA) 表示为 u_m ; 假设 a^c 需要与 u_1 和 u_2 建立连接, a^s 需要与 u_3 和 u_4 建立连接。首先,各个 AP 发送信标帧, STA 接收到信标帧后计算其接收信号强度指示(received signal strength indicator, RSSI) 值并选择信号强度最大的 AP 进行连接; 然后,由 STA 向 AP 发送连接请求帧,上报用户信息,在此阶段, a^s 向 a^c 发送交换帧,上报与 a^s 相连接的用户信息; 接着, a^c 向 a^s 发送 trigger 帧,指示 a^s 的发射功率等信息; 最后, a^c 和 a^s 向各自连接的 STA 发送 trigger 帧,此后可进行数据传输。

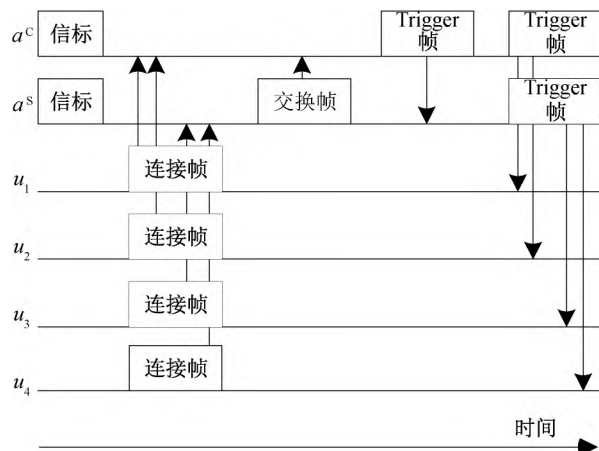


图 1 灾后电力应急通信系统

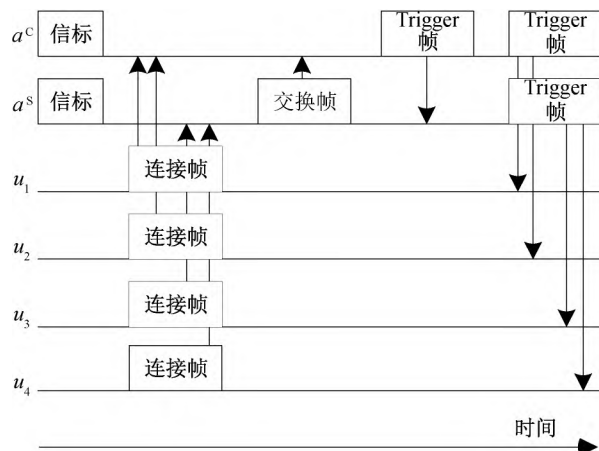


图 2 IEEE 802.11be 协议帧发送流程举例

定义 γ_m 为 u_m 的实际信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 值, γ_{TH} 为区分中心区域用户和边缘区域用户的 SINR 阈值, γ_{MIN} 为用户达到数据最小传输速率所需 SINR 阈值. 在用户接入过程中, a^C 接收到 a^S 所发交换帧后, 通过交换帧中包含的 RSSI 信息, 计算各用户的 SINR 值 γ_m , 再将 γ_m 与预先设定的 γ_{TH} 和 γ_{MIN} 阈值进行比较, 以此实现用户类型划分.

假设系统中有 M 个 STA 和 N 个 AP, 第 n 个 AP 表示为 a_n , $1 \leq n \leq N$; 对 u_m 产生干扰的 AP 表示为 $a_{i_m}^I$, $1 \leq i \leq I_m$, 其中 I_m 表示对 u_m 产生干扰的 AP 个数. 假设 u_m 和 a_n 关联 (即 u_m 选择接入 a_n), 它们之间的距离为 $d_{m,n}$, 则 u_m 的 SINR 值为:

$$\gamma_m = \frac{R_{m,n}}{\sum_{k=1, k \neq n}^N R_{m,k} + \omega} \quad (1)$$

其中, $R_{m,n}$ 为 u_m 接收到 a_n 发射信号的 RSSI 值, $\sum_{k=1, k \neq n}^N R_{m,k}$ 为 u_m 接收到的所有干扰 AP $a_{i_m}^I$ 发射信号 RSSI 值之和, ω 为背景噪声功率.

公式 (1) 中, 背景噪声功率等于热噪声功率 ω_{hot} 与噪声系数 ω_f 之和:

$$\omega = \omega_{hot} + \omega_f \quad (2)$$

IEEE 802.11be 中 ω_f 为 7 dB, ω_{hot} 的功率谱密度 N_0 为 -174 dBm/Hz, 则 ω_{hot} 由下式给出:

$$\omega_{hot} = N_0 \times B_m \quad (3)$$

其中, B_m 是分配给 u_m 的带宽, 单位为 Hz.

式 (1) 中, $R_{m,n}$ 等于 a_n 的发射功率 P_n 减去 u_m 与 a_n 间路径损耗 $L_{m,n}^p$, 即

$$R_{m,n} = P_n - L_{m,n}^p \quad (4)$$

IEEE 802.11be 中室外场景采纳双斜率路径损耗模型, $d_{m,n}$ 小于或等于断点距离 d_{BP} 和 $d_{m,n}$ 大于 d_{BP} 时使用不同衰落模型:

$$L_{m,n}^p = \begin{cases} L_{m,n}^{FS} + \eta, & d_{m,n} \leq d_{BP} \\ L_{m,n}^{FS} + 35 \log_{10} \left(\frac{d_{m,n}}{d_{BP}} \right) + \eta, & d_{m,n} > d_{BP} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $L_{m,n}^{FS}$ 为 u_m 与 a_n 间自由空间路径损耗; η 为阴影衰落损耗, 服从均值为 0 的对数正态分布. $L_{m,n}^{FS}$ 量化方法为:

$$L_{m,n}^{FS} = 20 \log_{10}(d_{m,n}) + 20 \log_{10}(f) - 147.5 \quad (6)$$

其中 $d_{m,n}$ 的单位为 m, f 表示载波频率, 单位为 Hz. 公式 (5) 中 η (dB) 的概率密度函数为:

$$\eta(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad (7)$$

其中 σ 在 $d_{m,n} \leq d_{BP}$ 时为 3, 在 $d_{m,n} > d_{BP}$ 时为 5.

在计算出各用户信干噪比值 γ_m 后, 通过以下 1) ~ 5) 步骤识别用户类型. 如图 3 所示, 用户被划分为中心区域用户、CSR 区域用户、3 dB 区域用户和 C-OFDMA 区域用户四种类型. 特别需要注意的是, IEEE 802.11be 已采纳的标准提案要求 AP 分配给远近用户的功率差需控制在 3 dB 以内^[16]. 因此, 所提用户类型识别方法中特别引入了该项约束条件:

- 1) 当 $\gamma_m > \gamma_{TH}$ 时, 将 u_m 分类为中心区域用户, 用 u_{Center} 表示中心区域用户的集合;
- 2) 当 $\gamma_{TH} \geq \gamma_m > \gamma_{MIN}$ 时, 表示 u_m 在进行频率复用时仍具有较好的信号质量, 将 u_m 分类为 CSR 区域用户, 用 u_{CSR} 表示 CSR 区域用户的集合;
- 3) 当 $\gamma_m \leq \gamma_{MIN}$ 时, 假设所有干扰 AP $a_{i_m}^I$ 的发射功率都减小 3 dB 后, 根据式 (1) 重新计算 u_m 新的 SINR 值, 并表示为 γ_m^* ;
- 4) 若执行步骤 3 后有 $\gamma_m^* > \gamma_{MIN}$, 表示通过减小 $a_{i_m}^I$ 的发射功率, u_m 能获得较好的信号质量, 则将 u_m 分类为 3 dB 区域用户, 用 u_{3dB} 表示 3 dB 区域用户的集合;
- 5) 若执行步骤 3 后有 $\gamma_m^* \leq \gamma_{MIN}$, 表示用户的信号质量依然较差, 则将 u_m 分类为 C-OFDMA 区域用

户,用 $u_{\text{C-OFDMA}}$ 表示 C-OFDMA 区域用户的集合.

主 AP a^c 为了计算每个接入 STA 的 SINR 数值,需要从连接帧和交换帧中获取所有接入 STA 的 RSSI 值.因此需要在现有连接帧和交换帧中添加新的指示字段.连接帧由 STA 发送给关联 AP,本研究中在连接帧添加 AP information 字段,具体如图 4(a) 所示.其中,Element ID 占用一个字节,用于表示该字段类型;Length 占用一个字节,用于指示整个字段长度(单位为字节);AP MAC address 占用 6 个字节,用于表示 STA 从信标帧中获取的 AP MAC 地址信息;AP RSSI 占用 6 个字节,用于表示 STA 根据信标帧测得的 AP 信号强度.

从 AP a^s 发送交换帧给主 AP a^c ,本研究中在其所发交换帧添加 STA information 字段,具体如图 4(b) 所示.其中,Element ID 占用一个字节,用于表示该字段类型;Length 占用一个字节,用于指示整个字段长度(单位为字节);AID 占用两个字节,用于表示与 a^s 关联的 STA 的 MAC 地址;AP MAC address 占用 6 个字节,用于表示与 a^s 关联的 STA 通过信标帧获取的 AP MAC 地址信息;AP RSSI 占用 6 个字节,用于表示与 a^s 关联的 STA 根据信标帧测得的 AP 信号强度.

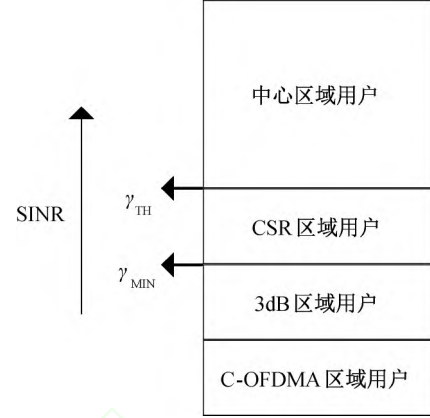


图3 用户类型及定义

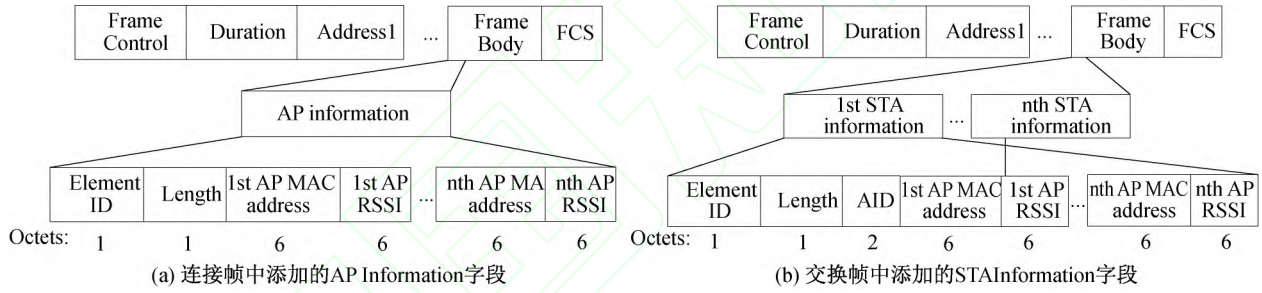


图4 协议帧添加字段

2 协作式功率控制技术

2.1 频谱资源分配算法 为好多 AP 间干扰管理,提高灾后电力应急通信系统的数据传输与本地网络覆盖能力,本研究在 1.2 小节新增用户类型基础上,提出新的频谱资源分配算法,为集合 $u_{\text{C-OFDMA}}$ 、 u_{CSR} 、 $u_{3\text{dB}}$ 和 u_{Center} 中用户分配频谱资源.

算法 1: 频谱资源分配算法.

定义 u_{a_n} 为关联到第 n 个 AP a_n 上所有用户的集合, $1 \leq n \leq N$.

1) 将总带宽切分为 $N+1$ 份正交频谱资源单元(resource unit, RU),表示为 β_j , $0 \leq j \leq N$, N 为进行协作的 AP 总数.将 β_0 进一步切分为 N 份正交子 RU,表示为 α_n ;

2) 为 C-OFDMA 区域用户分配频谱资源,由于 C-OFDMA 区域用户信号质量最差,所以将 α_n 分配给集合 $u_{\text{C-OFDMA}} \cap u_{a_n}$ 内的用户,且该部分频谱资源不在各 AP 间复用,如图 5 左侧第一列图形所示;

3) 根据 1.2 小节用户类型划分方法,CSR 区域及 3 dB 区域中的用户在进行频率复用时仍具有较好的信号质量,所以将 β_n 分配给集合 $(u_{\text{CSR}} \cup u_{3\text{dB}}) \cap u_{a_n}$ 内的用户.该部分频谱可被 a_n 的协作 AP 所关联的中心区域用户复用,即集合 $u_{\text{Center}} \cap \sum_{k=1, k \neq n}^N u_{a_k}$ 内的用户可复用该部分频谱;

4) 中心区域用户信号质量最好,将执行步骤 2 和 3 后剩余的频谱资源分配给各 AP 关联的中心区域用户,即将频谱资源 $\sum_{j=1, j \neq n}^N \beta_j$ 分配给集合 $u_{\text{Center}} \cap u_{a_n}$ 内的用户.

图 5 列举了上述频谱资源分配方案.其中有 4 个 AP, a_1 , a_2 , a_3 , a_4 进行协作通信,选择 a_1 举例分析:

α_1 分配给 a_1 关联的 C-OFDMA 区域用户, α_1 不在各 AP 间复用, 所以集合 $u_{C-OFDMA} \cap u_{a_1}$ 内的用户不会与集合 $u_{a_2} \cup u_{a_3} \cup u_{a_4}$ 内的任何用户干扰; β_1 分配给 a_1 关联的 CSR 区域及 3 dB 区域用户, 集合 $(u_{CSR} \cup u_{3dB}) \cap u_{a_1}$ 内的用户不会与集合 $(u_{CSR} \cup u_{3dB}) \cap (u_{a_2} \cup u_{a_3} \cup u_{a_4})$ 内的用户互相干扰, 但会与集合 $C_{Center} \cap (u_{a_2} \cup u_{a_3} \cup u_{a_4})$ 内的用户互相干扰; $\beta_2, \beta_3, \beta_4$ 分配给 a_1 关联的中心区域用户, 集合 $u_{Center} \cap u_{a_1}$ 内的用户会与 $(u_{CSR} \cup u_{3dB} \cup u_{Center}) \cap (u_{a_2} \cup u_{a_3} \cup u_{a_4})$ 内的用户互相干扰.

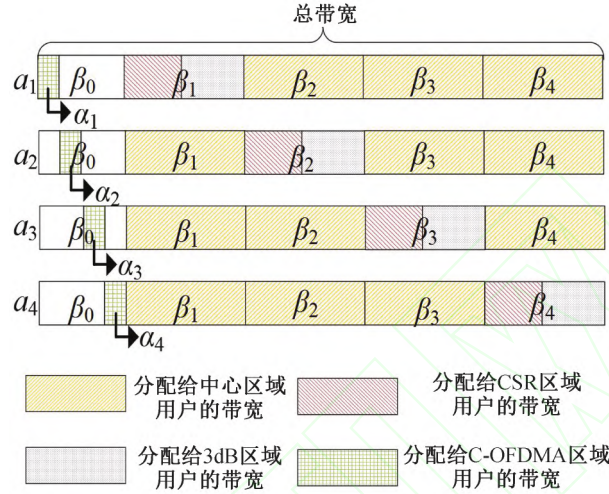


图 5 频谱资源分配方案

2.2 AP 中心功率控制算法 在算法 1 中: a_n 关联的中心区域用户会和 a_n 的协作 AP 关联的 CSR 区域用户、3 dB 区域用户及中心区域用户因频谱复用而相互干扰, 如上一段图 5 举例说明中最后一种干扰情况. 所以当 a_n 向其中心区域用户发送下行数据时, 降低 a_n 发射功率能够减小其对协作 AP 关联用户造成的干扰. 因此, 本研究在算法 1 的基础上, 提出 AP 中心功率控制算法.

算法 2: AP 中心功率控制算法.

定义第 n 个 AP a_n 向中心区域用户发送数据的发射功率为 $P_n^C, 1 \leq n \leq N$; 各 AP 中心区域发射功率配置组合为 $[P_1^C, \dots, P_N^C]$; AP 最大发射功率为 P_{MAX} , 发射功率下调值为 ΔP_n , 最优中心发射功率为 P_n^{opt} .

定义集合 $\Omega = \{[\Delta P_1, \dots, \Delta P_N] | \Delta P_n \in \{0, 1, 2, 3\}\}$, 其中, 数组 $[\Delta P_1, \dots, \Delta P_N]$ 表示 N 个 AP 发射功率下调值的一种组合, 显然该组合共有 4^N 种. 将 Ω 中每个元素按列存入矩阵 $A \in R^{N \times 4^N}$, 即 A 的每列对应集合 Ω 内一个元素; 定义第 i 种功率配置组合下所述系统容量为 $C_i, 1 \leq i \leq 4^N$, 此处系统容量统计所有用户信道容量之和. 定义系统干扰度为 δ_i , 其阈值为 δ_{TH} . 我们将用 δ_i 与 δ_{TH} 大小关系来衡量 AP 间干扰强度.

通过以下步骤 1) 到步骤 9) 来求出各 AP 的最优中心发射功率值 P_n^{opt} .

1) 初始化 $i = 1$;

2) 从 A 中取第 i 列, 将其作为各 AP 发射功率下调值的一种组合, 如式 (8):

$$[\Delta P_1, \dots, \Delta P_N]^T = A[:, i] \quad (8)$$

3) 根据式 (9) 计算下调发射功率后, 各 AP 中心区域发射功率值 $P_n^C, 1 \leq n \leq N$,

$$P_n^C = P_{MAX} - \Delta P_n \quad (9)$$

4) 更新用户 u_m 接收到 AP a_n 发射信号的 RSSI 值, 更新后的结果表示为 $R_{m,n}^*$, 其中 $1 \leq m \leq M, M$ 为系统总用户数;

5) 根据公式 (1) 计算各个用户的 SINR 数值 γ_m ;

6) 计算系统中信号质量较差 ($\gamma_m \leq \gamma_{MIN}$) 的用户个数 K , 并根据式 (10) 计算出系统干扰度 δ_i , 用 δ_i 来衡量 AP 间的干扰强度;

$$\delta_i = \frac{K}{M} \quad (10)$$

7) 若执行步骤 6) 后有 $\delta_i \leq \delta_{TH}$, 说明此时 AP 间干扰较小, 向下执行步骤 8; 否则, 说明此时 AP 间干扰较大, 需尝试另一种各 AP 中心区域发射功率配置组合, 令 $i = i + 1$, 并返回步骤 2;

8) 根据式(11) 计算并存储第 i 种功率配置组合下所达系统容量 C_i , 其中 B_m 表示分配给 u_m 的带宽;

$$C_i = \sum_{m=1}^M B_m \log_2(1 + \gamma_m) \quad (11)$$

9) 若 $i < 4^N$, 令 $i = i + 1$, 并返回步骤 2). 若 $i = 4^N$, 即集合 中所有发射功率下调值的组合都已在步骤 2) ~8) 中尝试, 根据式(12) ~ (13) 求得使系统容量最大化的各 AP 最优中心发射功率值 P_n^{opt} ;

$$i_{\text{opt}} = \arg \max_{1 \leq i \leq 4^N} C_i \quad (12)$$

$$[P_1^{\text{opt}}, \dots, P_N^{\text{opt}}]^T = P_{\text{MAX}} - A [i_{\text{opt}}] \quad (13)$$

该算法具体描述如下:

算法 2 AP 中心功率控制算法

```

1: 输入:  $N, M, A, B_m, P_{\text{MAX}}, L_{m,n}^P, \omega, \gamma_{\text{MIN}}, \delta_{\text{TH}}$ ;
2: 输出:  $P_n^{\text{opt}}$ ;
3: for  $i = 1 : 4^N$  do
4:   for  $n = 1 : N$  do
5:      $\Delta P_n = A[n, i]$ ;
6:      $P_n^C = P_{\text{MAX}} - \Delta P_n$ ;
7:   end for
8:    $K = 0$ ;
9:   for  $n = 1 : N$  do
10:    for  $m = 1 : M$  do
11:      if  $u_m \in u_{a_n}$  then
12:        if  $u_m \in u_{\text{Center}}$  then //  $u_m$  与  $a_n$  关联且  $u_m$  为中心区域用户时,  $a_n$  的发射功率减小  $\Delta P_n$ 
13:           $R_{m,n}^* = P_{\text{MAX}} - \Delta P_n - L_{m,n}^P$ ; // 其中  $L_{m,n}^P$  为  $u_m$  与  $a_n$  间路径损耗
14:        else //  $u_m$  与  $a_n$  关联且  $u_m$  不属于中心区域用户时,  $a_n$  的发射功率取最大值
15:           $R_{m,n}^* = P_{\text{MAX}} - L_{m,n}^P$ ;
16:        end if
17:      else //  $a_n$  为  $u_m$  的干扰 AP 时,  $a_n$  的发射功率减小  $\Delta P_n$ 
18:         $R_{m,n}^* = P_{\text{MAX}} - \Delta P_n - L_{m,n}^P$ ;
19:      end if
20:    end for
21:  end for
22:  for  $m = 1 : M$  do
23:     $\gamma_m = R_{m,n}^* / (\sum_{k=1, k \neq n}^N R_{m,k}^* + \omega)$ ; //  $R_{m,n}^*$  表示用户  $u_m$  接收到关联 AP 发射信号的 RSSI 值
24:    if  $\gamma_m \leq \gamma_{\text{MIN}}$  then
25:       $K = K + 1$ ;
26:    end if
27:  end for
28:   $\delta_i = K/M$ ;
29:  if  $\delta_i \leq \delta_{\text{TH}}$  then
30:     $C_i = \sum_{m=1}^M B_m \log_2(1 + \gamma_m)$ ;
31:  end if
32: end for
33:  $i_{\text{opt}} = \arg \max_{1 \leq i \leq 4^N} C_i$ ;
34: for  $n = 1 : N$  do
35:    $P_n^{\text{opt}} = P_{\text{MAX}} - A[n, i_{\text{opt}}]$ ;
36: end for

```

主 AP a^c 通过算法 2 计算出各个 AP 最优中心发射功率 P_n^{opt} 后, 需要向从 AP a^s 发送 Trigger 帧, 指示 a^s 应采用的中心发射功率. 因此本研究在 Trigger 帧中添加 Trigger power 字段, 具体如图 6 所示. 其中, Element ID 占用一个字节, 用于表示该字段类型; Length 占用一个字节, 用于指示整个字段长度(单位为字节); AP MAC address 占用 6 个字节, 用于表示 a^s 的 MAC 地址; AP center TX power 占用一个字节, 用于指示 a^s 向中心区域用户传输数据时的发射功率.

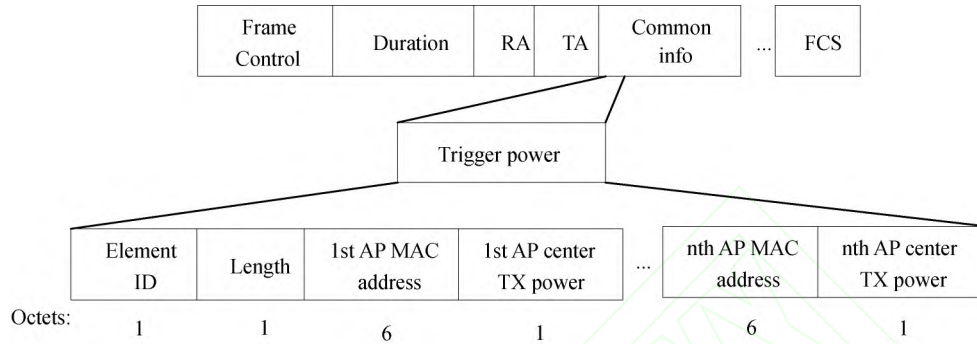


图 6 Trigger 帧中添加的 Trigger power 字段

3 仿真分析

为了验证本研究中算法能有效改善灾后电力应急通信系统的数据传输能力以及本地覆盖能力, 将本研究算法与现有多 AP 协作技术和软频率复用技术进行仿真对比. 图 7 是电力设备通过 Wi-Fi 无线 AP 节点完成本地入网后, 与 AP 进行数据传输的仿真场景示意图. 该仿真场景中共有 4 个 AP 进行协作通信, 定义 d_{AP} 为相邻 AP 间距离, 单位为 m, 且任意相邻 AP 间距离相等; M_n 表示第 n 个 AP a_n 关联电力设备个数, 且每个电力设备都随机分布在以 AP a_n 为中心, 边长为 $2d_{AP}$ 的正方形区域内. 其他仿真参数设置如下: 系统带宽为 80 MHz; AP

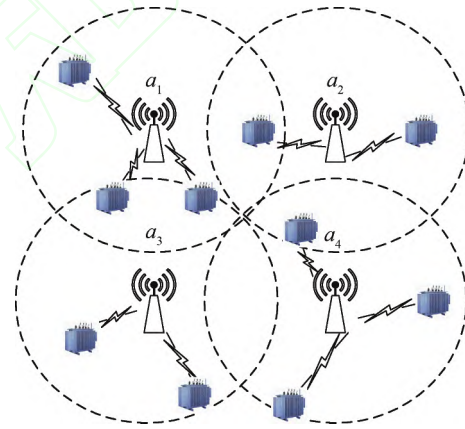


图 7 仿真场景示意图

最大发射功率值为 30 dBm; 白噪声系数为 7 dB; 信道衰落模型为 IEEE 802.11be 室外场景模型.

图 8 仿真了当 $d_{AP} \in \{100, 150, 200\}$, $M_n = 50$, $1 \leq n \leq 4$ 时, 本研究算法与 CSR&OFDMA 算法的系统容量对比, 其中, 两种算法设置相同仿真参数; 系统容量定义见式(11). 根据图 8 仿真结果可以得出结论: 1) 本研究算法具有更大系统容量, 提高了数据传输能力. 这是因为 CSR&OFDMA 算法为了提升边缘用户 SINR 值, 牺牲了一定频谱复用率, 而本研究算法在保证所有用户通信速率大于或等于最低速率条件下尽量提高频谱复用率, 此时频谱复用率提高对系统容量的增益贡献大于用户 SINR 值提升带来的贡献. 2) 随着 d_{AP} 增大, 系统容量也随之增大. 因为随着 d_{AP} 增大, 用户间干扰减小, 用户 SINR 值增大, 从而整体系统容量也随之增大.

图 9 仿真了当 $d_{AP} = 200$, $M_n = 50$, $1 \leq n \leq 4$ 时, 本研究算法与 CSR&OFDMA 算法的 AP 容量对比, 其中, 两种算法设置相同仿真参数; 此处 AP 容量统计各 AP 关联用户信道容量之和. 根据图 9 仿真结果可以看出, 本研究算法提升了 a_1, a_2, a_3, a_4 的 AP 容量, 该结果表明本研究算法对各 AP 数据传输能力都有提升, 因此, 本研究算法具有很好的公平性.

图 10 仿真了当 $d_{AP} = 200$, $M_n \in \{30, 40, 50\}$, $1 \leq n \leq 4$ 时, 本研究算法与现有软频率复用技术的系统容量对比, 其中, 两种算法设置相同仿真参数. 根据图 10 的仿真结果可得出结论: 1) 本文中算法具有更

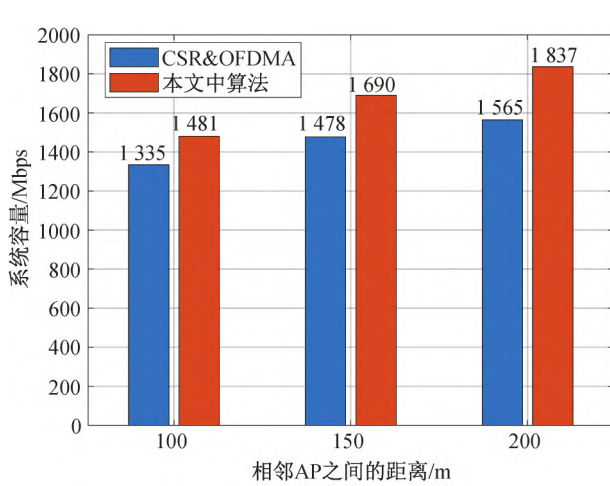


图8 CSR&OFDMA 算法与本文中算法的系统容量对比

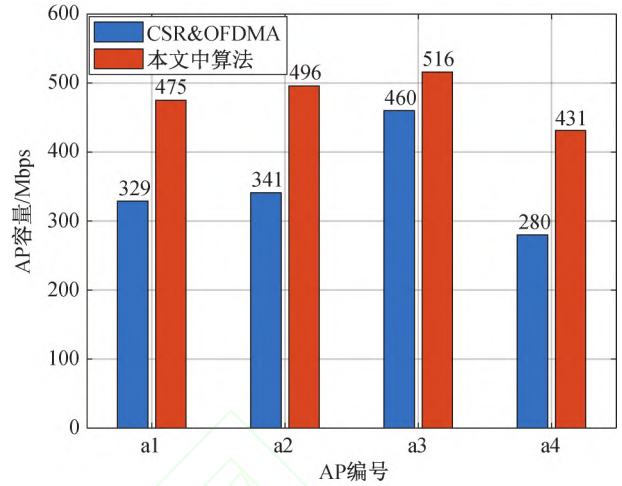


图9 CSR&OFDMA 算法与本文中算法的AP容量对比

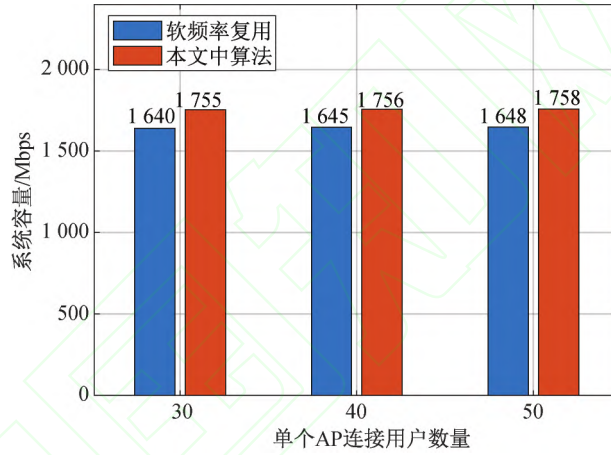


图10 软频率复用技术与本文中算法的系统容量对比

大系统容量,提高了数据传输能力。现有软频率复用技术其AP中心区域发射功率是固定值,而本文中算法结合了AP协作技术的优势,通过AP间信息交互,主AP获取更详细用户信息(如各用户关联AP的RSSI值和干扰AP的RSSI值),由此主AP能计算出各个AP最优中心区域发射功率值 P_n^{opt} ,从而提升整体系统容量。(2)随着 M_n 增大,系统容量无较大变化。其原因是系统容量主要与用户SINR值和系统总带宽相关,本文中算法通过为不同类型用户合理的分配频谱资源,以及控制AP中心发射功率,有效地管理好AP间干扰。因此当接入用户数不同时,用户SINR值无明显差别,且每次仿真系统总带宽相同,从而整体系统容量无较大变化。

本研究仿真并分析了在系统用户承载能力相近条件下,所提算法与现有AP协作技术的系统覆盖性能对比,其中,两种算法设置相同仿真参数。Wi-Fi网络使用OFDMA技术来增强系统用户承载能力,当AP分配到更多频谱资源时,其可用子载波更多,从而提升系统用户承载能力。在CSR技术中,每个AP都能复用全部频谱资源,具有较高的用户承载能力。本研究中所提算法将一小部分频谱资源分配给C-OFDMA区域用户,每个AP都可复用剩余的频谱资源,同样具有较高的用户承载能力。

图11(a)仿真了当 $d_{\text{AP}}=100$ 时,CSR技术的系统覆盖性能。图中非OBSS区域表示该区域用户具有较高的SINR,用户通信质量良好;OBSS区域表示该区域用户受到干扰较大,系统对该区域信号覆盖较差,OBSS区域用户SINR低于 γ_{MIN} ,因此OBSS区域用户不能正常通信。图11(a)计算得,在CSR技术下用户通信质量良好区域占整个系统覆盖区域的84%。

图11(b)仿真了当 $d_{\text{AP}}=100$ 时,本研究所提算法的系统覆盖性能。其中,在中心区域和CSR区域中用户具有较高的SINR,用户通信质量良好;在3dB区域中用户受到干扰较大,但通过所提算法2,提升

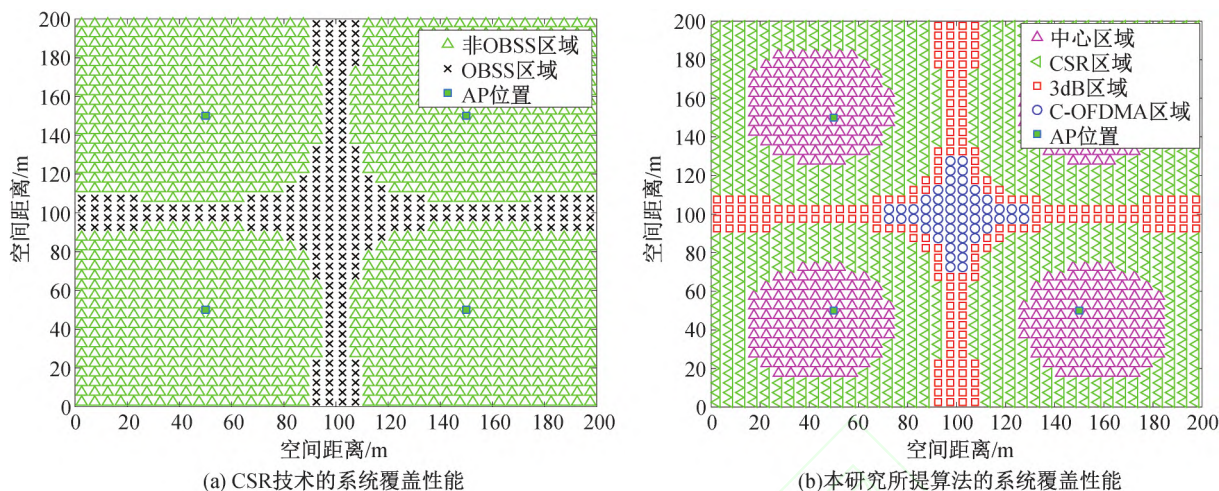


图 11 系统覆盖性能对比

了用户 SINR,使得 3 dB 区域用户获得良好通信质量;在 C-OFDMA 区域中用户受到干扰较大,但所提算法 1 为 C-OFDMA 区域用户分配正交的 RU,且该部分频谱资源不在各 AP 间复用,因此 C-OFDMA 区域用户不受其他协作 AP 的干扰,从而获得良好通信质量,且 C-OFDMA 区域面积较小,向该区域用户分配小部分频谱资源即可。图 11(b) 计算得,在本研究所提协作式功率控制技术下用户通信质量良好区域占整个系统覆盖区域的 100%,相比于 CSR 技术下用户通信质量良好区域占系统覆盖区域的 84%,本研究所提算法提高了系统本地覆盖能力。

4 结语

基于第 7 代 Wi-Fi 多 AP 协作通信技术,提出了一种协作式功率控制技术,有效地管理好多 AP 间干扰,改善灾后电力应急通信系统的数据传输能力和本地覆盖能力。本研究增加无线接入过程中用户类型,并调整部分协议帧结构,具化相关字段用于指示新增用户类型;结合 AP 协作技术和软频率复用技术设计了频谱资源分配算法和 AP 中心功率控制算法。仿真结果表明,与现有 Wi-Fi 系统多 AP 协作技术和软频率复用技术相比,所提算法有效提高了数据传输能力;与现有多 AP 协作技术相比,在用户承载能力相近条件下,可提高信号覆盖范围。

5 参考文献

- [1] 臧家义. 现代电力系统稳态与暂态分析方法探究[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2019: 1-2.
- [2] 李茂源,王直杰,马琳,等. 基于 WiFi 和北斗卫星导航系统的灾后应急基站[J]. 电子科技, 2014, 27(12): 81-84.
- [3] DENG Cailian, FANG Xuming, HAN Xiao, et al. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2136-2166.
- [4] AIO K. Coordinated Spatial Reuse Performance Analysis[EB/OL]. https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1534&is_group=0eht, 2019.
- [5] GUO J Y. AP Coordination in EHT[EB/OL]. https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=0103&is_group=0eht, 2019.
- [6] KHOROV E, LEVITSKY I, AKYILDIZ I F. Current status and directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7[J]. IEEE Access, 2020(8): 88664-88688.
- [7] OTERI K. Coordinated multi-AP transmission for EHT[EB/OL]. https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=0071&is_group=0eht, 2019.
- [8] YANG R, LOU H, SUN L H, et al. On joint C-SR and C-OFDMA M-AP transmission[EB/OL]. https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1399&is_group=0eht, 2020.
- [9] HUAWEI. Soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE: R1-050507[R]. Athens, Greece: 3GPP, 2005.

- [10] ADEJO A, HUSSEIN J, BOUSSAKTA S, et al. Optimal transmit power configuration for soft frequency reuse in irregular cellular networks [C]//2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Piscataway: IEEE, 2017: 711-713.
- [11] YANG Xuezhi. A multilevel soft frequency reuse technique for wireless communication systems [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(11): 1983-1986.
- [12] 杨双. 一种用于北斗大容量通信的丢包重传机制的实现 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48(1): 196-202.
- [13] 张薇, 何宏伦, 王玮, 等. 一种适用于北斗短报文通信的天线波束指向算法 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 2848-2853.
- [14] 徐挺, 兰海, 孙勇, 等. VSAT 系统建设的成本分析和优化 [J]. 通信技术, 2020, 53(6): 1397-1405.
- [15] 王晓明, 胡鑫, 宋辉, 等. 基于多网融合的电力应急通信系统设计 [J]. 信息技术, 2019, 43(6): 60-63+68.
- [16] IEEE P802.11be™/D1.2—Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 8: Enhancements for extremely high throughput (EHT) [S]. 2021.

(责任编辑 赵燕)