

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211377

面向电力巡检的 MEC 非正交共享传输方案研究

郭志民¹, 田杨阳¹, 张焕龙², 李暖暖¹, 刘伟华², 王延峰², 徐晋²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 郑州轻工业大学, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了解决电力巡检回传系统中视频传输占用带宽大、连接数量多、传输资源利用不充分等问题, 针对多载波多用户上行传输网络, 提出了一种基于移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)网络架构下分簇技术与非正交共享传输联合设计方案。考虑 5G 基站与客户终端设备(Customer Premise Equipment, CPE)通信链路的远近效应并将其 CPE 终端分簇来进行信息传输, 从而提高 CPE 连接数量和频谱效率。为了消除簇间干扰, 采用信号对齐技术, 分别提出簇间最大信干噪比算法和簇间最小干扰泄露算法。为了消除簇内用户间干扰, 采用了串行干扰消除技术。该方案使系统每个 CPE 都能达到最大的自由度, 从而实现较高的系统和速率性能。仿真结果表明, 所提方案相比于传统正交接入方案具有更高的系统和速率性能。

关键词: 电力巡检; 移动边缘计算; 非正交多址接入; 信号对齐; 系统和速率

A non-orthogonal share transmission scheme of mobile edge computing for power inspection

GUO Zhimin¹, TIAN Yangyang¹, ZHANG Huanlong², LI Nuannuan¹, LIU Weihua², WANG Yanfeng², XU Jin²

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: There are problems in power inspection of a transmission system e.g., large bandwidth requirement, massive terminal connection and inefficient transmission resource utilization. Thus a joint design scheme that combines clustering and non-orthogonal multiple access (NOMA) is proposed based on mobile edge computing (MEC). This is for a multi-carrier multi-user uplink access network. Considering the near-far effect between a 5G base station and customer premises equipment (CPE), the CPEs are divided into several clusters to transmit information, with an increased number of connected CPEs and spectral efficiency. In order to mitigate inter-cluster interference, signal alignment is used, and a maximum signal to inter-cluster interference and noise ratio (Max-SICINR) algorithm and a minimum inter-cluster interference leakage (Min-ICIL) algorithm are proposed. To mitigate the inter-user interference in the same cluster, a successive interference cancellation is used. With the proposed scheme, each CPE can achieve the maximum degree of freedom, which leads to improved system sum-rate performance. Simulation results demonstrate that the proposed scheme has a higher system sum-rate performance than the conventional orthogonal multiple access scheme.

The work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873246, No. 61901418, No. 62072416, No. 62006213, and No. 62102373).

Key words: power inspection; mobile edge computing; non-orthogonal multiple access; signal alignment; system sum-rate performance

0 引言

2019年, 国家电网启动了能源互联网的建设工

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873246, 61901418, 62072416, 62006213, 62102373); 国家电网公司科技项目资助(5600-202046347A-0-0-00)“面向智能电网运维场景的视听觉主动感知与协同认知技术研究及应用”

作, 加快推进了“三型两网、世界一流”战略的落地实施, 旨在建设健壮又安全的智能电网和具有“云-管-边-端”协同的泛在电力物联网^[1-3]。网络切片^[4]、移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)^[5-7]及新兴信息通信技术^[8-10]是实现以上目标的有效技术手段。在线信息采集、监控为电网的高效可靠运行和职能决策控制提供了坚实的信息化保障。然而在实际中存在如下3方面的问题亟待解

决^[11-12]。根据电网中 3 个不同特点的业务类型进行分别阐述。

(1) 控制类业务。诸如差动保护、同步向量测量及精准负荷控制等^[13], 这类业务对网络演示的要求极其严格。差动保护要求业务端到端的时延降低到 15 ms 以内。同步授时业务要求精度小于 10 μ s。精准负荷控制业务要求延时低于 50 ms, 并且具有极高的网络可靠性要求^[14]。为了避免业务阻塞导致网络崩溃, 智能电网采用网络切片技术进行网络隔离, 并且可以定制指标需求, 空口资源、传输资源、核心网资源的高效利用得到保证, 切片之间隔离度高, 切片之间的故障、网络拥塞等问题不会互相影响。5G 网络切片可以在基础网络设备中划分出多个逻辑隔离的端到端虚拟网络, 形成一种新型网络构架, 满足差异化、多样化的应用需求^[4]。国网公司与中国电信、华为公司合作对现有变电站、配电网业务模式进行创新, 融合 5G 技术构建智能配电网, 在南京完成了基于 5G 承载精准负控业务的测试验证。这初步验证了核心网切片应用的可行性, 经实测端到端平均时延低至 37 ms, 带宽、时延等关键参数性能都能得以保障。

(2) 数据采集类业务。诸如分布式能源、能耗管理、路灯控制、智能抄表、电力基础设施等密集部署通信场景下的信息采集类业务。该类业务对时延和带宽要求不高但是要求连接数量巨大, 连接密度可达每平方千米几千个终端用户。对于电力基础设施来说, 因光缆敷设难度大、成本高, 该场景下信息采集类业务可以采用无线通信方式来承载。5G 通信场景中的增强型机器类型通信(Enhanced Machine Type Communication, MTC)技术的用户连接密度指标为 100 万个/ km^2 , 完全能够满足该类海量连接业务的需求^[14]。另外由于信息采集的数据具有多样性, 5G 切片技术可提供更高强度的安全隔离, 为电网信息采集业务提供安全性、稳定性的保障。

(3) 视频巡检类业务。这类业务是电力生产管理系统中高压线路物理特性巡检类的移动应用业务, 诸如进行无人机或者机器人定期巡检、高清视频监控、AR/VR 辅助维修及培训等^[15-16]。这些业务都需要大量的图片、视频或者媒体流的回传。前端设备集成人工智能模块^[17-18], 实时拍照并进行检测。它们需要同基站进行实时视频数据流的传输, 占用大量的网络带宽资源。为了避免海量数据集中向云端传输而导致阻塞, 现代网络采用边缘计算进行计算卸载, 将异常结果回传到后端, 减少大量无用数据的传输, 节省了带宽。MEC 通过将核心网用户面功能(User Plane Function, UPF)网元下沉, 具备本地业

务的分流和边缘计算能力。按照就近原则, MEC 部署于邻近电力业务系统一端, 并融合网络传输、存储等创新技术, 提高每个节点的数据处理效率。在该网络架构下, 只需把结果向后台反馈, 可以实时地对前台需求做出响应, 缩短响应时间, 降低传输时延。同时, 这也从源头上保护了数据的安全性和隐私性, 为相关业务部门提供基于 5G 的应用平台, 满足未来爆发式电力物联网业务增长需求。

实现对电网输电线路的在线监控是保证其正常运行的信息基础。MEC 和网络切片技术在网络系统结构等方面解决了云端通信的拥塞和延时问题。网络切片技术也能提高网络业务隔离度和健壮性。但是在 MEC 无线接入层方面有尚待解决的问题, 将监控设备的海量用户连接需求和数据传输的大带宽需求进行联合优化设计对提升电网信息传输效率有着重要的研究意义。

5G 通信中大规模多天线(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术和多载波(Multiple Carrier, MC)调制技术能够显著地提高无线接入系统的频谱效率和节能效率, 已经成为无线通信的主流技术^[19-20]。非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)通过将多用户调度至相同的时频资源进行共享传输, 不仅能支持更多的用户连接数量, 而且具有比正交接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)更高的频谱效率^[21-23]。电网监控系统中分布着大量的视频采集终端, 本文称其为客户端设备(Customer Premise Equipment, CPE)。由于电网视频类监控中 CPE 与基站的距离不同从而产生远近效应, 因此本文提出将 CPE 进行分簇并联合采用 MIMO 和 NOMA 技术来进一步提高大带宽大连接应用场景的传输效率。

本文的主要研究工作如下:

(1) 提出了一种基于 MEC 网络架构下分簇技术与非正交共享传输联合设计方案。采用信号对齐技术, 联合设计发送端预编码和接收端滤波, 来消除簇间干扰; 采用串行干扰消除技术, 消除簇内用户间干扰。

(2) 因无法直接求解, 采用迭代算法求解预编码矩阵和接收滤波矩阵。提出了簇间最大信干噪比算法(Maximum Signal to Inter-Cluster Interference and Noise Ratio, Max-SICINR)和簇间最小干扰泄露算法(Minimum Inter-Cluster Interference Leakage, Min-ICIL), 来求解预编码矩阵和滤波矩阵。

(3) 推导 MIMO-NOMA 系统中实现的最大 CPE 终端自由度(Degree of Freedom, DoF)。理论分析和

仿真实验均表明, 本文所提方案具有更高的系统和速率性能。

1 系统模型

如图 1 所示, 建立系统模型如下: 假设基站配置 N 根天线, 考虑其多载波传输的时频资源上的 S 个资源元素(可代表 S 个时隙或 S 个子载波)。将 CPE 分成 K 个簇, 为了简化分析, 每个簇上调度两个用户(实际网络中可调度多个用户)。假设其中一个用户位于临近基站的位置, 具有较高的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)。另一个用户位于小区的边缘位置, 具有较低的信噪比。每个用户都配置 M 个天线。考虑上行传输网络, 基站接收第 $k(1 \leq k \leq K)$ 个簇中两个用户的信号可分别表示。

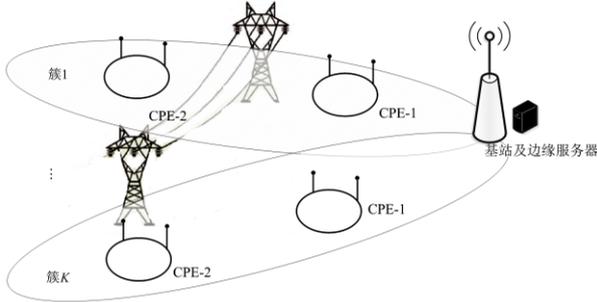


图 1 MEC 电力系统上行通信网络模型

Fig. 1 Uplink communication network for power system

$$\begin{cases} \mathbf{y}_k^i = \sum_{j=1}^2 \mathbf{H}_k^j \mathbf{V}_k^j \sqrt{p_k} \mathbf{x}_k^j + \sum_{l=1, l \neq k}^K \sum_{j=1}^2 \mathbf{H}_l^j \mathbf{V}_l^j \sqrt{p_l} \mathbf{x}_l^j + \mathbf{z}_k^i, \\ i=1, 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{z}_k^i \in \mathbb{C}^{NS \times 1}$ 为基站接收第 k 个簇两个用户的噪声向量, 用户 1 和 2 分别为小区中心用户和小区边缘用户, 信道矩阵分别为 $\mathbf{H}_k^1 \in \mathbb{C}^{NS \times MS}$ 、 $\mathbf{H}_k^2 \in \mathbb{C}^{NS \times MS}$, 其中 $\mathbb{C}^{NS \times MS}$ 表示 $MS \times NS$ 维复数域矩阵。每个信道矩阵 \mathbf{H} 包含 $M \times N$ 个分块对角矩阵, 可表示为

$$\mathbf{H} = (\mathbf{A}_{n,m})_{N \times M}, \quad 1 \leq n \leq N, \quad 1 \leq m \leq M \quad (2)$$

式中: 每个分块矩阵 $\mathbf{A}_{n,m}$ 都是一个 $S \times S$ 的对角矩阵, 表示第 m 个发送天线至第 n 个接收天线之间的信道增益矩阵。基站对第 k 个簇的用户 j 采用的预编码矩阵为 $\mathbf{V}_k^j \in \mathbb{C}^{MS \times d}$, 并且满足 $(\mathbf{V}_k^j)^\dagger \mathbf{V}_k^j = \mathbf{I}_d$, 其中 $(\mathbf{V}_k^j)^\dagger$ 表示 \mathbf{V}_k^j 的共轭转置矩阵。 d 是每个用户所能传输的数据流个数, 也表示用户的自由度。 \mathbf{x}_k^j 表示第 k 个簇用户 j 的传输信息, 即在 NOMA 共享信道传输机理情况下, 第 k 个簇用户 j 传输给基站的信息。 p_k 表示第 k 个簇中两个用户每个数量流的

总功率, 满足 $p_k = \sum_{j=1}^2 p_k^j$ 。规定同一个簇内两个用户

的功率分配因子为 $\alpha_1 > 0$ 和 $\alpha_2 > 0$, 满足 $\frac{p_k^1}{p_k} = \alpha_1^2, \alpha_1^2 + \alpha_2^2 = 1$ 。不失一般性, 将噪声功率归一化, 上述的系统模型用 $NS \times (MS, d)^K$ 来表示。

2 最大自由度的干扰消除方案

上述 MIMO-NOMA 系统面临着簇间干扰和簇内用户间干扰的问题。为了消除簇间干扰, 使用信号对齐技术。为了消除簇内用户间干扰, 使用 NOMA 系统中串行干扰消除算法。通过该方案每个用户都能达到最大的自由度, 从而最大限度地利用系统中空域和频率资源。本节详细地论述了最大化自由度的信号对齐方案及其设计方法。

2.1 实现的自由度

以第 k 个簇的位于小区中心的用户 1 为例, 为了在基站侧检测其信号, 设计的滤波矩阵为 $\mathbf{U}_k \in \mathbb{C}^{NS \times d}$ 。

$$\begin{aligned} (\mathbf{U}_k)^\dagger \mathbf{y}_k^1 = & (\mathbf{U}_k)^\dagger \mathbf{H}_k^1 \mathbf{V}_k^1 \sqrt{p_k} \alpha_1 \mathbf{x}_k^1 + \underbrace{(\mathbf{U}_k)^\dagger \mathbf{H}_k^2 \mathbf{V}_k^2 \sqrt{p_k} \alpha_2 \mathbf{x}_k^2}_{\text{簇内干扰}} + \\ & \sum_{l=1, l \neq k}^K \sum_{j=1}^2 \underbrace{(\mathbf{U}_k)^\dagger \mathbf{H}_l^j \mathbf{V}_l^j p_l \mathbf{x}_l^j}_{\text{簇间干扰}} + (\mathbf{U}_k)^\dagger \mathbf{z}_k^1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, 滤波矩阵 \mathbf{U}_k 是酉矩阵, 即 $(\mathbf{U}_k)^\dagger \mathbf{U}_k = \mathbf{I}_d$ 。为了达到完全消除簇间干扰的目的, 需要通过联合设计预编码矩阵 \mathbf{V}_k^1 和滤波矩阵 \mathbf{U}_k 。对于 $l \neq k$, 必须使 $(\mathbf{U}_k)^\dagger \mathbf{H}_l^j \mathbf{V}_l^j = 0$ 。

同样, 对于小区边缘用户, 簇间干扰同样通过设计其预编码矩阵 $\mathbf{V}_k^2 \in \mathbb{C}^{MS \times d}$ 来消除簇间干扰, 对于任意的 $l \neq k$ 只需满足 $\text{span}(\mathbf{H}_k^2 \mathbf{V}_k^2) = \text{span}(\mathbf{H}_k^1 \mathbf{V}_k^1) \perp \mathbf{U}_l$, 其中 $\text{span}(\mathbf{A})$ 表示矩阵 \mathbf{A} 的列向量所张成的子空间。从上述分析可知, 消除簇间干扰, 关键是求解小区中心用户的预编码矩阵 \mathbf{V}_k^1 和其对应簇的滤波矩阵 \mathbf{U}_k 。对于任意的 k , 信号对齐技术所能取得的最大自由度有 $d = \text{rank}((\mathbf{U}_k)^\dagger \mathbf{H}_k^1 \mathbf{V}_k^1)$, 如下给出:

对于一个分簇 MIMO-NOMA 系统 $NS \times (MS, d)^K$, 采用信号对齐方案每个用户所能取得的最大自由度 $d = \frac{(M+N)S}{K+1}$ 。

为了实现上述的最大自由度, 提出了簇间最大信干噪比算法和簇间最小干扰泄露算法求解预编码

矩阵和滤波矩阵。

2.2 簇间最大信干噪比算法

对于第 k 个簇中的小区中心用户, 即用户 1, 其第 $i(1 \leq i \leq d)$ 个数据流的信号发射功率与簇间干扰加噪声功率之和的比为

$$\gamma_{k,i} = \frac{p_{k,i} \mathbf{u}_{k,i}^\dagger \mathbf{H}_k^1 \mathbf{v}_{k,i}^1 (\mathbf{v}_{k,i}^1)^\dagger \mathbf{H}_k^1 \mathbf{u}_{k,i}}{\mathbf{u}_{k,i}^\dagger \mathbf{B}_{k,i} \mathbf{u}_{k,i}} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{u}_{k,i}$ 、 $\mathbf{v}_{k,i}^1$ 分别是滤波矩阵 \mathbf{U}_k 和预编码矩阵 \mathbf{V}_k^1 的第 i 列; $p_{k,i}$ 表示分配到第 i 个数据流的发射功率; $\mathbf{B}_{k,i} \in \mathbb{C}^{NS \times NS}$ 表示簇间干扰和噪声。

$$\mathbf{B}_{k,i} = \sum_{l=1}^K \sum_{j=1}^d p_{l,j} \mathbf{H}_l^1 \mathbf{v}_{l,j}^1 (\mathbf{v}_{l,j}^1)^\dagger (\mathbf{H}_l^1)^\dagger - p_{k,i} \mathbf{H}_k^1 \mathbf{v}_{k,i}^1 (\mathbf{v}_{k,i}^1)^\dagger (\mathbf{H}_k^1)^\dagger + \mathbf{I}_{NS}$$

为了使信号发射功率与簇间干扰加噪声功率之和的比取得最大, 滤波矩阵 \mathbf{U}_k 的第 i 个列向量 $\mathbf{u}_{k,i}$ 为

$$\mathbf{u}_{k,i} = \frac{(\mathbf{B}_{k,i})^{-1} \mathbf{H}_k^1 \mathbf{v}_{k,i}^1}{\|(\mathbf{B}_{k,i})^{-1} \mathbf{H}_k^1 \mathbf{v}_{k,i}^1\|} \quad (5)$$

对通信链路进行逆操作, 预编码向量 $\mathbf{v}_{k,i}^1$ 则为

$$\mathbf{v}_{k,i}^1 = \frac{(\hat{\mathbf{B}}_{k,i})^{-1} (\mathbf{H}_k^1)^\dagger \mathbf{u}_{k,i}}{\|(\hat{\mathbf{B}}_{k,i})^{-1} (\mathbf{H}_k^1)^\dagger \mathbf{u}_{k,i}\|} \quad (6)$$

其中, $\hat{\mathbf{B}}_{k,i} = \sum_{l=1}^K \sum_{j=1}^d p_{l,j} (\mathbf{H}_l^1)^\dagger \mathbf{u}_{l,j} \mathbf{u}_{l,j}^\dagger \mathbf{H}_l^1 - p_{k,i} (\mathbf{H}_k^1)^\dagger \mathbf{u}_{k,i} \mathbf{u}_{k,i}^\dagger \mathbf{H}_k^1 + \mathbf{I}_{MS}$ 。

小区边缘用户, 即用户 2 的预编码矩阵 \mathbf{V}_k^2 计算如式(7)。

$$\mathbf{V}_k^2 = (\mathbf{H}_k^2)^\dagger (\mathbf{H}_k^2 (\mathbf{H}_k^2)^\dagger)^{-1} \mathbf{H}_k^1 \mathbf{V}_k^1 \quad (7)$$

算法 1 详细叙述了簇间最大信干噪比(max-SICINR)算法。

算法 1: 簇间最大信干噪比(max-SICINR)算法
输入变量: 所有的信道矩阵 $\mathbf{H}_1^1, \mathbf{H}_1^2, \mathbf{L}, \mathbf{H}_k^1, \mathbf{H}_k^2, \mathbf{L}, \mathbf{H}_K^1, \mathbf{H}_K^2$ 和簇总发射功率 p_k 。

初始化: 设置所有簇内小区中心用户的预编码矩阵 \mathbf{V}_k^1 。

步骤 1: 根据式(5)计算滤波矩阵 \mathbf{U}_k ;

步骤 2: 根据式(6)计算预编码矩阵 \mathbf{V}_k^1 ;

步骤 3: 迭代执行步骤 1 和步骤 2 直至算法收敛;

步骤 4: 用式(7)计算簇内小区边缘用户的预编码矩阵 \mathbf{V}_k^2 ;

步骤 5: 输出所有的预编码矩阵 \mathbf{V}_k^1 、 \mathbf{V}_k^2 和所有

的滤波矩阵 \mathbf{U}_k 。

2.3 簇间最小干扰泄露算法

滤波矩阵和预编码矩阵在簇间干扰泄露最小化的约束下求解, 此时第 k 个簇的小区中心用户的簇间干扰泄露为

$$I_k = \text{Tr}[(\mathbf{U}_k)^\dagger \mathbf{Q}_k \mathbf{U}_k]$$

式中, $\mathbf{Q}_k = \sum_{l=1, l \neq k}^K p_l \mathbf{H}_l^1 \mathbf{V}_l^1 (\mathbf{V}_l^1)^\dagger (\mathbf{H}_l^1)^\dagger \in \mathbb{C}^{NS \times NS}$ 为簇间干扰的协方差矩阵。为了使簇间干扰泄露最小化, 滤波向量 $\mathbf{u}_{k,i}$ 可以通过式(8)计算。

$$\mathbf{u}_{k,i} = \mathbf{v}_i[\mathbf{Q}_k] \quad (8)$$

式中, $\mathbf{v}_i[\mathbf{Q}_k]$ 表示矩阵 \mathbf{Q}_k 的第 i 个最小特征值对应的特征向量。同样的方法, 通过反转通信链路, 预编码向量 $\mathbf{v}_{k,i}^1$ 为

$$\mathbf{v}_{k,i}^1 = \mathbf{v}_i[\hat{\mathbf{Q}}_k] \quad (9)$$

式中, $\hat{\mathbf{Q}}_k = \sum_{l=1, l \neq k}^K p_l (\mathbf{H}_l^1)^\dagger \mathbf{U}_l (\mathbf{U}_l)^\dagger \mathbf{H}_l^1$ 。

簇间最小干扰泄露(min-ICIL)算法如算法 2 所示, 其输入变量、初始化步骤和输出变量与算法 1 相同, 故在叙述中略去。

算法 2: 最小化簇间干扰泄露(min-ICIL)算法

步骤 1: 根据式(8)计算滤波矩阵 \mathbf{U}_k ;

步骤 2: 根据式(9)计算预编码矩阵 \mathbf{V}_k^1 ;

步骤 3: 迭代执行步骤 1 和步骤 2 直至算法收敛;

步骤 4: 使用式(7)计算簇内小区边缘用户的预编码矩阵 \mathbf{V}_k^2 。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真场景与参数设置

在实验仿真部分, 假设一个基站服务一定范围内电力系统 CPE 终端监控或巡检业务, 半径为 100 m。基站服务范围可分为 K 个簇, 根据小区内 CPE 终端总数可动态调整簇的个数, 以满足所有终端连接需求。每个簇有 2 个 CPE 终端, 分别称为小区中心 CPE 终端和小区边缘 CPE 终端。小区中心 CPE 终端随机分布在离基站 30 m 远的圆周区域内, 小区边缘 CPE 终端随机分布在离基站 30~100 m 远的圆周区域内。每个簇的 CPE 终端总的发射功率一

样, 簇内 2 个 CPE 终端的功率分配为 $\frac{\alpha_1^2}{\alpha_2^2} = \frac{1}{4}$, 每

个 CPE 终端传输的 d 个数据流之间的功率分配是采用等功率分配方案。使用速率 R_k^i 量化第 k 个簇中第 i 个 CPE 终端与基站信息传输性能, $R_k^i =$

$\log \left| \mathbf{I}_d + \frac{p_k^i}{d} \bar{\mathbf{H}}_k^i (\bar{\mathbf{H}}_k^i)^\dagger (\sigma^2 \mathbf{I}_d + \mathbf{U}_k \mathbf{Q}_k^i (\mathbf{U}_k)^\dagger)^{-1} \right|$, 其中,
 $\bar{\mathbf{H}}_{k,i} = \mathbf{U}_k^\dagger \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{V}_{k,i}$ 为第 k 个簇中第 i 个 CPE 终端到基站的实际接收信道矩阵, $\mathbf{Q}_k^i = \sum_{l=1, l \neq k}^K \sum_{j=1}^2 p_{l,j} \mathbf{H}_l^j \mathbf{V}_l^j \cdot (\mathbf{V}_l^j)^\dagger (\mathbf{H}_l^j)^\dagger \in \mathbb{F}^{NS \times NS}$ 为使用串行干扰消除技术的干扰协方差矩阵。实验仿真中采用的性能指标为系统和速率, 单位为 bits/s/Hz。

为了验证本文所提方案的性能, 对比不同的传输方案如下:

1) 传统正交化传输方案 MIMO-OMA: 分为两个时隙, 每个时隙从 K 个簇中挑选几个 CPE 终端进行业务传输。由于使用了两个时隙资源, 它们之间的信息传输不会有干扰, 但每个时隙内多个 CPE 终端与基站的信息传输会有干扰。为了消除 CPE 终端间的干扰, 使用干扰对齐技术的最大信干噪比算法^[24]。

2) 使用干扰对齐最小干扰泄露算法^[24]的传统正交化传输方案 MIMO-OMA。

3) 分簇的 MIMO-NOMA 方案。该方案通过 NOMA 和分簇技术提高了单位资源服务的 CPE 终端数, 为了消除簇间干扰, 使用了簇间最大信干噪比算法。为了消除簇内 CPE 终端间的干扰, 使用串行干扰消除算法。

4) 使用簇间最小干扰泄露算法的分簇 MIMO-NOMA 方案。

3.2 仿真结果分析

图 2 对比了上述 4 种传输方案在不同发射功率下的系统和速率性能。从图 2 中可看出, NOMA 方案显然优于 OMA 方案, 非正交多址接入方案通过频谱资源在多个 CPE 终端业务传输复用, 提高资源利用率, 能够有效缓解电力系统频谱稀缺的问题。另外, 通过分簇技术能够进一步复用频谱资源, 提高服务的 CPE 终端数。所提方案能够使用迭代干扰对齐算法消除簇间干扰, 使用串行干扰消除算法消除簇内 CPE 终端信息传输干扰, 能够最大化提高网络容量, 满足电力系统视频流信息传输的高速率传输要求。OAM 技术虽能通过无线资源正交化避免干扰, 但降低了单位资源下的 CPE 终端数和资源利用率, 导致其系统和速率性能有所降低。在较低发射功率下, 该电力上行通信系统是一个噪声受限的系统, 所提算法虽能有效消除干扰, 但此时只有增大发射功率才能有效提高系统传输速率。因此, 在低发射功率下, 在系统和速率方面, 使用分簇技术的 MIMO-NOMA 传输方案略低于 MIMO-OMA 方案。

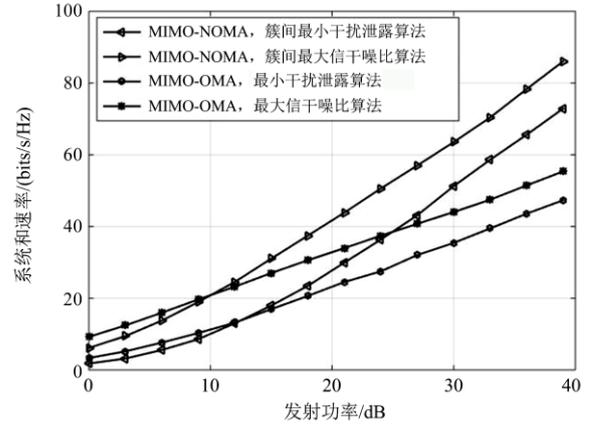


图 2 不同传输方案的系统和速率性能

Fig. 2 System sum-rate performance of different transmission schemes

自由度是衡量通信系统传输性能的一个指标, 一般情况下, 自由度表示通信网络无干扰并行传输能力。在较高信噪比情况下, 自由度越大表示并行传输数据流越多, 系统速率越高。本文推导了自由度上界, 但当系统配置非均衡天线时, 该自由度无法达到。图 3 对比了不同通信场景下不同自由度下 MIMO-NOMA 传输方案(使用簇间最大信干噪比算法)的系统和速率性能。从图 3 中可以看出, 在相同分簇数 $K=3$ 和子载波数 $S=2$ 情况下, 系统 $6 \times (2, 2)^3$ 实现的系统和速率性能远远高于系统 $4 \times (4, 2)^3$ 。原因是在系统中, 其天线配置是非均衡天线, 自由度是无法达到的, 即该系统使用信号对齐技术是非可行的, 导致其系统和速率性能大幅度降低。另外, 对于信号对齐技术可行系统, 若降低其发射天线或接

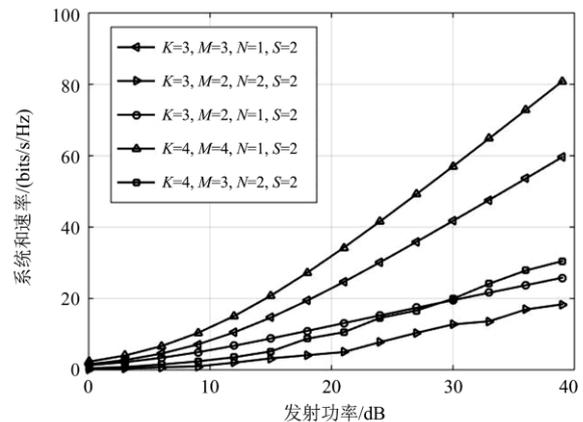


图 3 不同通信场景的系统和速率性能

Fig. 3 System sum-rate performance of different communication scenarios

收天线数目, 变为系统 $4 \times (2, 2)^3$, 此时自由度是无法达到的, 其系统和速率性能也会大幅度降低。类似地, 对于分簇数 $K = 4$ 和子载波数 $S = 2$ 场景下的系统 $8 \times (2, 2)^4$, 自由度无法达到, 系统和速率性能也会降低。

图 4 给出不同天线数下 MIMO-NOMA 传输方案(使用簇间最大信干噪比算法)的系统和速率性能。从图 4 中可看出, 随着天线数的线性增加, 可实现的自由度也在线性增加, 系统和速率呈指数式增长。这说明本文提出的方案可充分利用空域资源, 最大化提高系统和速率性能。类似地, 图 5 给出不同子载波数下 MIMO-NOMA 传输方案(使用簇间最大信干噪噪比算法)的系统和速率性能, 说明提出的方案也可充分利用频域资源, 提高系统和速率性能。

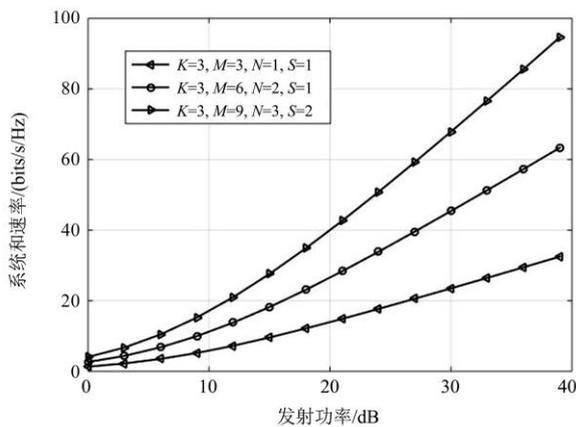


图 4 不同天线数 MIMO-NOMA 传输方案的系统和速率性能

Fig. 4 System sum-rate performance of MIMO-NOMA with different numbers of antennas

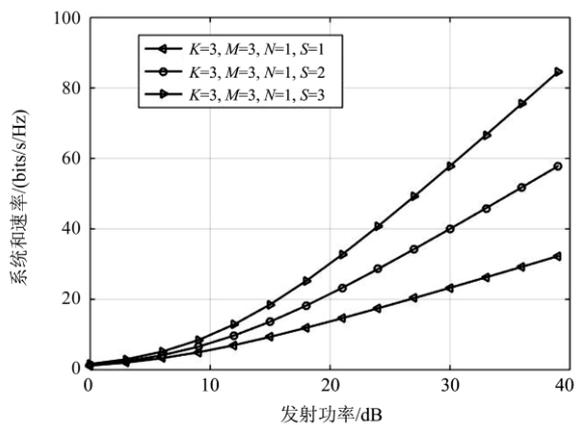


图 5 不同子载波数 MIMO-NOMA 传输方案的系统和速率性能

Fig. 5 System sum-rate performance of MIMO-NOMA with different numbers of subcarriers

4 结论

面向电力系统的巡检业务, 本文对基于 MEC 网络架构下多终端连接、大带宽上行信息传输技术进行了研究, 提出了分簇技术与非正交共享传输联合设计方案。首先, 将 CPE 终端进行分簇, 采用 NOMA 接入技术。使用信号对齐技术来消除簇间干扰, 并提出簇间信干噪比最大化算法和簇间干扰泄露最小化算法两种算法求解预编码矩阵与滤波矩阵。使用串行干扰消除技术来消除簇内用户间干扰。理论与仿真结果均表明该方案能够实现最大的自由度, 相比于传统正交接入方案具有更高的系统和速率性能。

参考文献

- [1] 国家电网有限公司. 泛在电力物联网建设大纲[EB/OL]. [2019-08-22]. <https://max.book118.com/html/2019/0822/6240103224002055.shtm>. State Grid Corporation of China. Construction outline of ubiquitous power internet of things[EB/OL]. [2019-08-22]. <https://max.book118.com/html/2019/0822/6240103224002055.shtm>.
- [2] 孔垂跃, 陈羽, 赵乾名. 基于 MQTT 协议的配电物联网云边通信映射研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 168-176. KONG Chuiyue, CHEN Yu, ZHAO Qianming. Research on cloud-side communication mapping of the distribution internet of things based on MQTT protocol[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 168-176.
- [3] KONG X, XU Y, JIAO Z, et al. Fault location technology for power system based on information about the power internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(10): 6682-6692.
- [4] 王莹, 王雪, 刘嫚, 等. 面向智能电网的 5G 网络切片应用前瞻性思考[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(8): 1-7. WANG Ying, WANG Xue, LIU Man, et al. Prospective thinking of 5G network slicing application in smart grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(8): 1-7.
- [5] 韩青, 高昆仑, 赵婷. 边云协同智能技术在电力领域的应用[J]. 物联网学报, 2021, 5(1): 62-71. HAN Qing, GAO Kunlun, ZHAO Ting. Application of edge-cloud collaborative intelligence technologies in power grids[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2021, 5(1): 62-71.
- [6] 黄冬梅, 何立昂, 孙锦中, 等. 基于边缘计算的电网假数据攻击分布式检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 1-9. HUANG Dongmei, HE Li'ang, SUN Jinzhong, et al. Distributed detection method for a false data attack in a power grid based on edge computing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 1-9.

- [7] MAO Y, YOU C, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: the communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2322-2358.
- [8] 高志远, 彭林, 李炳林, 等. 新兴 ICT 技术对电力系统自动化的协同支撑作用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 160-166.
GAO Zhiyuan, PENG Lin, LI Binglin, et al. Research on the collaborative support of emerging new ICTs for power system automation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 160-166.
- [9] HU Zhuangli, HE Tong, ZENG Yihui, et al. Fast image recognition of transmission tower based on big data[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 149-158.
- [10] 杨哈竹, 完颜绍澎, 胡光宇, 等. 基于区块链的电力泛在业务接入网关的研究[J]. 广东电力, 2020, 33(8): 54-61.
YANG Hanzhu, WANYAN Shaopeng, HU Guangyu, et al. Research on power universal service access gateway based on blockchain[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8): 54-61.
- [11] 瞿水华, 郭钊杰, 许乐飞. 5G 技术在智能电网中的实践和验证[J]. 供用电, 2021, 38(5): 2-9.
QU Shuihua, GUO Zhaojie, XU Lefei. Practice and verification of 5G technology in smart grid[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(5): 2-9.
- [12] 陈兆雁, 柴宜, 平常, 等. 基于 5G 边缘计算的可调节负荷互动技术研究[J]. 华电技术, 2021, 43(3): 9-13.
CHEN Zhaoyan, CHAI Yi, PING Chang, et al. Research on adjustable load interaction technology based on 5G edge computing[J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 9-13.
- [13] 胡光宇, 张影, 孔为为, 等. 5G 环境下差动保护在电力系统中的应用[J]. 山东电力技术, 2020, 47(6): 10-17.
HU Guangyu, ZHANG Ying, KONG Weiwei, et al. Research on application of differential protection in power system under 5G environment[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(6): 10-17.
- [14] ZTE. Uplink multi-user transmission for massive MTC[C] // 3GPP TSG RAN Meeting(RP-152208), December 2015, Anaheim, USA.
- [15] 冯积家. 基于 5G 无人机在电力输电线路自动巡线的实现与研究[J]. 电力设备管理, 2020(9): 203-204.
FENG Jijia. Implementation and research of automatic line inspection of power transmission lines based on 5G UAV[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(9): 203-204.
- [16] 据泽立, 杨博, 孙浩飞, 等. 面向电力智能巡检的多机器人系统协同路径规划算法[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 92-97.
JU Zeli, YANG Bo, SUN Haofei, et al. Cooperative path planning of multi-robot system for power grid intelligent inspection[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 92-97.
- [17] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16.
- [18] 白昱阳, 黄彦浩, 陈思远, 等. 云边智能: 电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(3): 397-410.
BAI Yuyang, HUANG Yanhao, CHEN Siyuan, et al. Cloud-edge intelligence: status quo and future prospective of edge computing approaches and applications in power system operation and control[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 397-410.
- [19] DING Z, ADACHI F, POOR H V. The application of MIMO to non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 537-552.
- [20] BUZZI S, D'ANDREA C, ZAPPONE A, et al. User-centric 5G cellular networks: resource allocation and comparison with the cell-free massive mimo approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(2): 1250-1264.
- [21] DAI L L, WANG B, YUAN Y, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.
- [22] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access[C] // IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), June 2-5, 2013, Dresden, Germany: 1-5.
- [23] 余蕊, 张宁池, 王艳茹, 等. 面向电力物联网的 5G 通信认知无线电 NOMA 系统研究[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 35-45.
SHE Rui, ZHANG Ningchi, WANG Yanru, et al. Research on cognitive radio non-orthogonal multiple access system in 5G communications oriented to ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 35-45.
- [24] GOMADAM K, CADAMBE V R, JAFAR S A. A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(6): 3309-3322.

收稿日期: 2021-10-12; 修回日期: 2021-11-28

作者简介:

郭志民(1977—), 男, 学士, 教授级高工, 研究方向为人工智能、信息安全和泛在电力物联网等; E-mail: 1519883890@qq.com

田杨阳(1993—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为机器学习, 信息安全等; E-mail: Tianyangyang199306@163.com

张焕龙(1981—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为模式识别、人工智能、泛在电力物联网和信息融合等。E-mail: zhl_lit@163.com

(编辑 魏小丽)