

基于非完美功率域非正交多址接入网络的上行链路低功耗研究

任桂山¹ 吴冕泽² 陈学梅¹ 苏 锋¹ 李红艳¹

¹(中国石油大港油田公司采油工艺研究院 天津 300280)

²(中国石油大学(北京)信息科学与工程学院 北京 102249)

摘 要 功率域非正交多址接入(PD-NOMA)技术可以有效提高无线网络频谱利用率,满足大规模节点接入及低时延等需求,但存在功耗大的缺点,在工业传感器网络中面临巨大挑战。对此,基于 PD-NOMA 的上行网络,接收机使用串行干扰抵消(SIC)迭代解码,在给定实时性需求下,通过用户调度和功率分配的联合优化,最小化网络的功耗。通过分析最优解存在的充分必要条件,提出功率阈值向量,将其转换成一个二部图最大匹配问题,用 KM 算法求得最优。仿真结果表明,时延性需求、残差和阈值对系统功耗有着较大影响。

关键词 非正交多址接入 串行干扰抵消 上行 调度 功耗

中图分类号 TP3

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2021.02.020

UPLINK LOW-POWER FOR RADIO ACCESS NETWORKS BASED ON IMPERFECT POWER-DOMAIN NOMA

Ren Guishan¹ Wu Mianze² Chen Xuemei¹ Su Feng¹ Li Hongyan¹

¹(Oil Production Technology Institute, Petro China Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China)

²(College of Information Science and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract Power domain non-orthogonal multiple access (PD-NOMA) technology can effectively improve the spectrum utilization of wireless networks and support massive connections and low latency. However, it suffers from high power consumption on transmitters, which faces huge challenges for industrial wireless sensors networks. In this paper, with the given real time performance, we study the problem of minimizing aggregate power consumption of transmitters under the imperfect PD-NOMA based on successive interference cancellation (SIC) receivers. To solve the problem, joint optimization of power allocation and users scheduling were utilized. For the existence of optimal solution, we presented an explicit sufficient and necessary condition. Then, we converted it into a maximum matching of bipartite graph by power threshold vector and got optimal solution by using the KM algorithm. The simulation results show that the delay requirement, residul and threshold have great impacts on the system power consumption.

Keywords PD-NOMA Successive interference cancellation Uplink Scheduling Power Consumption

0 引 言

工业无线网络中,传感器通常被用来部署以感知周围环境,定时采集数据,通过无线网络将参数汇集到基站进行分析处理,从而有效地应对工业生产中的各种事件。不同于移动通信网络,工业无线网络更加侧

重于上行链路。其特点主要是数据包很小,上传请求次数频繁。工业无线网络对上传实时性需求较高,数据包能否及时上传反映了系统感知紧急事件的敏感性。随着互联网时代的到来,未来工业无线网络面临诸多挑战:高频谱效率、高连接数,以及超低延迟和功耗^[1]。

传统的多址接入技术,在频域、时域和码域对用户

进行复用,但其基于正交资源的特性会导致频谱利用率较低。时分复用 (Time Division Multiple Access, TDMA) 可以将接入延迟限制在一定范围内,但其一个时刻只允许接入一个用户,无法满足未来网络高连接以及低延迟的需求。因此,开发新型多址接入技术显得至关重要,受到了学界和业界的较大关注。

近年来,功率域非正交多址接入 (Power Domain Non-orthogonal Multiple Access, PD-NOMA) 受到了人们的关注^[2-4]。它突破了传统复用方式的限制,可以支持同一时刻同一空间在相同频段多个发送节点,极大增加了用户设备的接入密度。同时,通过设计相应的协议,可以缩短用户设备接入时延。

PD-NOMA 的两个关键技术是功率域复用和串行干扰抵消 (Successive Interference Cancellation, SIC)。PD-NOMA 利用用户之间的自然信道条件差异或发送端非均匀功率分配来实现资源的非正交复用^[5-6]。PD-NOMA 在发送端采用功率域叠加编码,主动引入干扰信息,基站采用 SIC 进行多用户检测,可以达到更高的频谱利用效率,在有限的资源下增大终端的接入密度。SIC 接收器从混合信号解码最大功率信号,并将其分离,对剩余的混合信号重复此过程,从而解码所有用户。解码过程中干扰主要来自两方面:一方面,功率较小的信号会对期望信号产生直接干扰;另一方面,由于幅度估计不准等,信号分离并不能完全彻底,会导致分离出的信号部分残留,影响解码,这就是非完美 SIC。Xu 等^[7]研究了完美 SIC 下的功率最优研究。本文考虑非完美干扰取消的情况,即残差不为 0,主要源自非完美的幅度估计和相位估计。本文探讨的残差与信号接收功率呈线性关系,即一个用户信号的接收功率为 p , 干扰取消之后造成的残差为 εp , ε 为残差系数。

非完美 SIC 现在受到了越来越多的关注。线性残差模型在 2003 年首次被提出,并被广泛使用^[8-9]。以一个简单的示例来说明 SIC 对接收混合信号的功率结构的要求,如图 1 所示。UE₁ 和 UE₂ 是两个用户设备,它们要通过无线网络将传感器数据上传到基站 BS。假设两个信号在基站 BS 处的功率分别为 r_{p1} 和 r_{p2} , 假设 $r_{p1} > r_{p2}$, 如果 UE₁ 的信干噪比 (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR) 不小于 γ 即 $SINR(UE_1) \geq \gamma$, γ 代表解码阈值,则 UE₁ 的信号可以正确解码,从混合信号中去除 UE₁ 的信号,同时由于信道估计存在误差等,会造成 UE₁ 部分残留。因此, $SINR(UE_2) = \frac{S_2}{N_0 + \varepsilon S_1}$, ε 为残差系数。如果 $SINR(UE_2) \geq \gamma$, 用户

UE₂ 的信号可以正确解码。与 TDMA 相比,信道接入时延降低了一半。

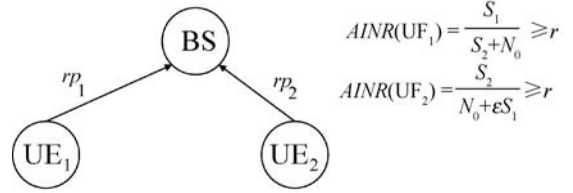


图 1 上行链路 SIC 原理

值得注意的是,PD-NOMA 克服干扰需要巨大的能耗,这是由 SIC 功率域复用所决定的,因而低功耗调度算法显得尤为重要。对于非完美功率域非正交多址接入,在满足用户 SINR 的约束条件下,本文提出了一种基于功耗最优的资源分配方法。通过定义功率阈值向量,将该问题解耦为用户调度和功率分配问题,使原始问题转换成一个完全平衡二部图最大匹配问题,使用 KM 算法求解最优化问题。

1 系统模型

考虑一个简易的非正交多址接入网络,存在 n 个单天线传感器设备 u_1, u_2, \dots, u_n 和一个单天线基站 BS。基站装备一个 k -SIC 接收器,最多可以同时支持 k 个用户接入。基于 SIC 迭代解码原理,如果干扰取消之后每个用户的 SINR 都不小于解码阈值 γ ,接收器可以同时解码 k 路信号,实现 k 路并行传输。

以帧为单位对时间进行划分,一帧又被划分为多个时槽。每个用户在一帧内仅被调度一次,所有传感器设备的发送速率及数据包大小都一样,一个数据包在一个时槽内被发送完成。如图 2 所示,网络包含三个用户,一帧分为 2 时槽,每个用户选择合适功率在一帧内调度一次。

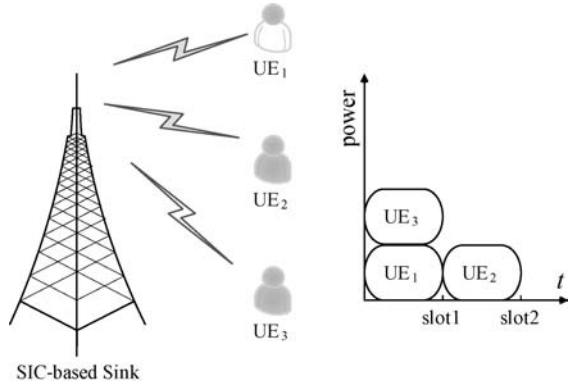


图 2 系统模型

用户 u_i 到基站之间的信道增益记为 G_i , 发射功率是 p_i , 则接收功率是 $G_i p_i$ 。同时假设信道增益在一帧内是固定不变的,本文采用如下信道增益模型:

$$CG = -20\log f - 26\log d + 19.2 \quad (1)$$

式中: f 是信号频率, 单位为 MHz; d 代表终端与基站之间的欧氏距离, 单位为 m。

定义 1 非完美 k-SIC 实时性最小功耗调度 (Real-time Minimal Power Scheduling for Imperfect k-SIC, RMPSI-kSIC)。在给定实时性需求 L 时槽的前提下, 为寻求上行链路的最小功率调度, 对该网络做如下假设:

- (1) n 个用户在一帧内仅被调度一次;
- (2) 帧长(时槽总数)不能超过实时性要求 L ;
- (3) 每个用户的 SINR 都必须不小于解码阈值。

形式化如下:

$$\begin{aligned} \min_{\{S, p_1, p_2, \dots, p_n\}} & \sum_{i=1}^n p_i \\ \text{s. t.} & FL(S) < L \\ & 0 \leq |S[j]| \leq k \quad j = 1, 2, \dots, L \\ & \frac{G_i p_i}{I_i + n_0} \geq \gamma \quad p_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

式中: S 代表用户调度策略; p_i 代表用户 u_i 的发射功率; $S[j]$ 代表在第 j 个时槽内调度的所有用户; I_i 代表用户 u_i 节解码时所遭受的干扰, 如果用户的发射功率已知, I_i 显然取决于用户调度策略; L 是时槽总数, 代表实时性需求; n_0 为噪声功率。

由于本文致力于将系统功耗最小化, 故对用户的最大发射功率不做约束。

定义 2 r 路并行传输最小功率分配 (Minimal Power Allocating for r Parallel Transmitters, MPArPT)。上行网络中由 r 个用户 u_1, u_2, \dots, u_r 和 k-SIC 接收机组成, 信道增益分别为 G_1, G_2, \dots, G_r 。我们分别用 p_1, p_2, \dots, p_r 代表 r 个用户的发射功率。 r 个用户同时传输, 保证可解码的前提下即信噪比都大于解码阈值, 使得用户的总功率和最小。

将该问题形式化如下:

$$\begin{aligned} \min_{\{p_1, p_2, \dots, p_r\}} & \sum_{i=1}^r p_i \\ \text{s. t.} & \frac{G_r p_r}{\sum_{i=1}^{r-1} G_i p_i + n_0} \geq \gamma \\ & \frac{G_l p_l}{\sum_{i=1}^{l-1} G_i p_i + \varepsilon \sum_{i=l+1}^r G_i p_i + n_0} \geq \gamma \quad l = 2, 3, \dots, r-1 \\ & \frac{G_1 p_1}{\varepsilon \sum_{i=2}^r G_i p_i + n_0} \geq \gamma \\ & p_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (3)$$

定义 3 r -SIC 非完美功率阈值向量 (Power Threshold Vector for Imperfect r -SIC, PTVI- r)。 $\hat{X}^{(r)}$ 满足如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\hat{X}_r^{(r)}}{\sum_{i=1}^{r-1} \hat{X}_i^{(r)} + n_0} = \gamma \\ \frac{\hat{X}_l^{(r)}}{\sum_{i=1}^{l-1} \hat{X}_i^{(r)} + \varepsilon \sum_{i=l+1}^r \hat{X}_i^{(r)} + n_0} = \gamma \quad l = 2, 3, \dots, r-1 \\ \frac{\hat{X}_1^{(r)}}{\varepsilon \sum_{i=2}^r \hat{X}_i^{(r)} + n_0} = \gamma \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\hat{X}_i^{(r)} > 0, i = 1, 2, \dots, r$ 且 $\gamma > 1$ 。很明显, $\hat{X}_r^{(r)} \geq \hat{X}_{r-1}^{(r)} \geq \dots \geq \hat{X}_1^{(r)}$ 。 PTVI- r 是一个等比数列, 公比为 $\delta = \frac{(\gamma+1)}{(1+\gamma\varepsilon)}$ 。

定理 1 当 r 个用户的发射功率和最优, 接受功率必然符合 PTVI- r 。

证明: 运用反证法进行证明。 r 个用户的最优接受功率为 x_1, x_2, \dots, x_n 。第 i 个功率不一样, 由用户调度策略确定, 因为 $\hat{X}_i^{(r)} < x_i$, 将 $\hat{X}_i^{(r)}$ 替换 x_i , 会得到更优的发射功率。这与已知条件相矛盾, 故定理 1 得证。

定理 2 当 $r \geq 2$ 时, 当且仅当 $\varepsilon\delta^r < 1$, PTVI- r 存在。

证明: 因为 $\hat{X}_1^{(r)} = \frac{\gamma n_0}{\delta_{r-1} - \gamma \sum_{i=0}^{r-2} \delta^i} > 0$, 所以 $\delta_{r-1} - \gamma \sum_{i=0}^{r-2} \delta^i > 0$, 即 $\varepsilon\delta^r < 1$ 。定理 2 得证。

引理 1 $\hat{X}_1^{(r)}$ 是以 r 为自变量的单调递增函数, r 代表单时槽并发用户数, 即 $\hat{X}_1^{(r)} < \hat{X}_1^{(r+1)}$ 。

证明: 对 $g(r) = \delta^{r-1} - \gamma \sum_{i=0}^{r-2} \delta^i$ 求导得 $dr < 0$, 因此 $\hat{X}_1^{(r)} = \frac{\gamma n_0}{\delta_{r-1} - \gamma \sum_{i=0}^{r-2} \delta^i}$ 单调递增。引理 1 得证。

又因为 $\hat{X}^{(r)}$ 是一个等比数列, 公比 δ 与并发用户数无关, $\hat{X}_i^{(r)} < \hat{X}_i^{(r+1)}, i = 1, 2, \dots, r$ 。

MPArPT 解决了单时槽下, 用户调度策略确定时, r 路并行用户的功率分配问题。下面考虑多时槽下的联合调度问题。

定理 3 如果 $n \leq kL$, RMPSI-kSIC 的最优功耗调度策略是:

(1) 任一时槽的用户数目为 $\lceil n/L \rceil$ 或 $\lfloor n/L \rfloor$;

(2) $\lfloor n/L \rfloor$ 并行用户时槽有 $L\lfloor n/L \rfloor - n$, $\lceil n/L \rceil$ 并行用户时槽有 $L - L\lfloor n/L \rfloor + n$ 。

证明:根据鸽巢原理,对最优功率调度策略,若一个时槽 S_1 用户数少于 $\lfloor n/L \rfloor$,必然存在一个时槽 S_2 用户大于 $\lceil n/L \rceil$ 。根据引理 1 和引理 3 可知,如果将 S_2 中的一个用户放入 S_1 ,新调度策略的总功耗也必然小于原先的调度策略,这与原调度策略的最优性相矛盾。同理可证不存在用户数多于 $\lceil n/L \rceil$ 的时槽。确定时槽类型后,假设有 m 个 $\lceil n/L \rceil$ 时槽,因为 $m\lfloor n/L \rfloor + (L - m)\lceil n/L \rceil = n$,则 $m = L\lceil n/L \rceil - n$ 。定理 3 得证。

2 最优算法设计

基于 PTVI 和定理 2,将问题转换成求解完全二部图的最大权匹配。

算法 1 RMPSI-kSIC 的最优化算法

输入: n, k, L 。

输出:最优的调度策略。

1. 构建一个完全二部图 $GH(n, k, L)$, 左部包括 n 个节点, 右部包括 $L\lfloor n/L \rfloor - n$ 个 $\lfloor n/L \rfloor$ 节点和 $L - L\lfloor n/L \rfloor + n$ 个 $\lceil n/L \rceil$ 节点;
2. 计算 $PTVI\lceil n/L \rceil$, $PTVI\lfloor n/L \rfloor$ 作为接受功率;
3. 根据 $p_i = G_i p_i$, 计算发射功率, 将 $-p_i + M$ 赋给对应边权重;
4. 寻找该图的最大权匹配;
5. 最大权匹配映射为发送节点的功率调度策略。

二部图左部 n 个节点代表网络中的 n 个传感设备, 右部节点代表相对应的时槽。算法 1 中第 1 行构建的是一个完全平衡二部图, 第 2 行到第 3 行设置边相应权重。 M 是一个最大整数值, 确保边的权重为正值。定理 4 显示了该策略是最优的调度。通过一个如图 3 所示的例子来简要说明。网络存在 5 个用户, 实时性需求 L 为 2, 并发支持数 k 为 3。为图片清晰起见, 将边权值省略。

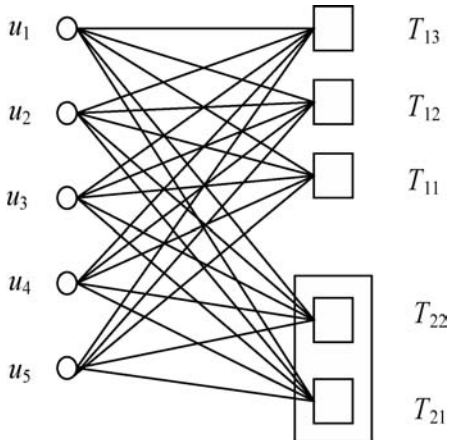


图 3 $n=5, L=2, k=3$ 例子

定理 4 当且仅当 $\varepsilon \delta^{\lceil n/L \rceil} < 1$, 算法 1 输出 RMPSI-kSIC 的最优解。

证明:二部图中 $GH(n, k, L)$ 、 (u_i, T_{hj}) 表示用户 u_i 在第 h 个时槽被调度。任何满足定理 3 的策略都可以映射为 $GH(n, k, L)$ 的最大匹配, 反之亦然。根据定理 1 设置最优的发射功率, 求得所有用户的最小功率和。

3 实验

本文考虑一个简易网络, 包含 30 个传感节点和 1 个基站。基站被放置在一个 120 米长的正方形中心区域, 用户随机均匀分布于整个网络。基于此进行一系列实验探究功率消耗与实时性, 解码阈值, 噪声密度以及残差系数的关系。实验的默认参数设定如下: 噪声功率谱密度为 -169 dBm/Hz, 信道带宽为 200 kHz, 因此噪声为 -116 dBm。频率为 2.4 GHz, 解码阈值为 2, 残差系数 ε 为 0.01。

3.1 功率消耗与实时性需求

本次实验采用系统默认参数, 观察用户功耗与实时性之间的关系。基于引理 1 和定理 3, 如果实时性需求更加严格, 即可调度的时槽数更小, 则总功耗更大。实验分别探究 k 分别为 1、2、3、4 时帧长从严格到宽松的情况。

总功耗与实时性关系如图 4 所示。可以看到, 总功耗随着帧长的递增指数递减。直观上理解, 这与 $PTVI-r$ 等比数列有关, 且四条曲线出现重合。这说明总功耗主要取决于实时性需求, 与 k 值没有明显关系。另一方面, 对于典型的 k 值, 功率消耗是可以接受的, 例如: $k=3, L=10$ 时, 功耗大约为 0.05 mW, 这在实际的工业生产中是可以接受的。

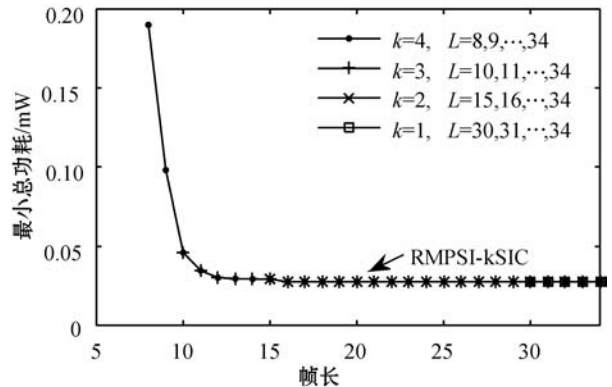


图 4 总功耗与实时性关系

3.2 功率消耗与解码阈值, 环境噪声和残差系数

本实验将揭示总功耗与阈值之间的关系, 其他参

数设置为默认值。解码阈值分别采用 1.5、2、2.5 时的具体关系如图 5 所示。相对应地将残差系数设为 0、0.01、0.02、0.05、0.1, 讨论分析残差对网络性能的影响, 如图 6 所示。噪声功率密度为 -169 dBm/Hz、 -171 dBm/Hz、 -173 dBm/Hz 的实验结果如图 7 所示。

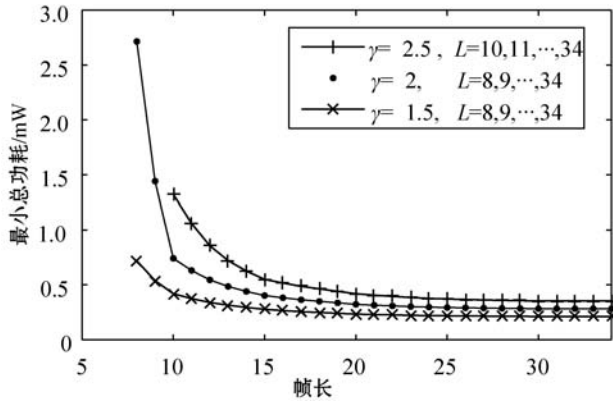


图5 阈值对总功耗影响

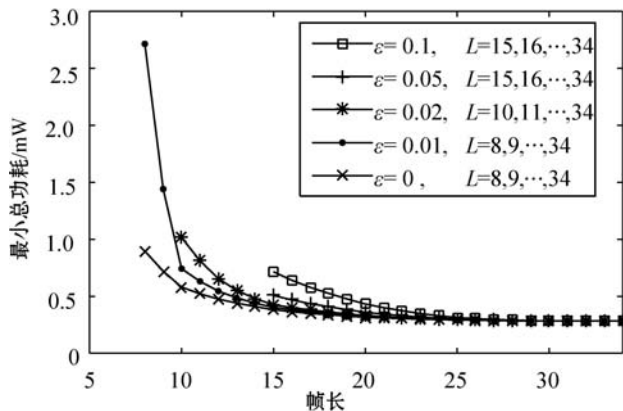


图6 阈值对总功耗影响

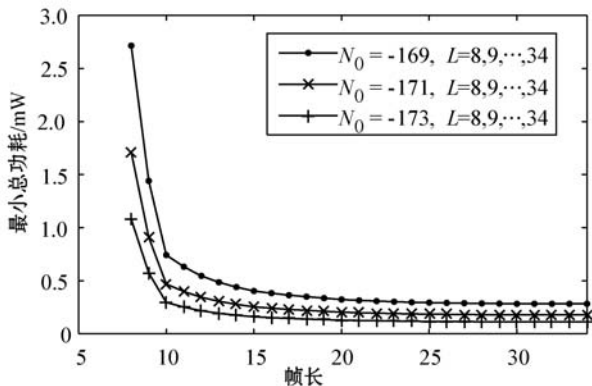


图7 阈值对总功耗影响

可以看到,总功耗与阈值、噪声功率密度和残差系数之间呈正相关。为了克服残差和噪声的干扰,用户必须采用更高的功率,这也与实际相符。

4 结语

SIC 技术作为新型多址接入技术,可以有效提高

频谱利用率,降低接入时延,但功耗问题是一个弊端。本文针对非完美功率域 NOMA,致力于探究上行传输功耗与实时性需求之间的均衡,从功率分配和用户调度进行联合优化,提出了功耗最优算法。仿真结果表明,实时性需求对功耗有着主要影响。用户需要采用额外功率克服残差系数、噪声功率对信号的干扰。

参 考 文 献

- [1] Ding Z, Lei X, Karagiannidis G K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2181-2195.
- [2] Rabee F A, Davaslioglu K, Gitlin R. The optimum received power levels of uplink non-orthogonal multiple access (NOMA) signals[C]//2017 IEEE 18th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON). IEEE, 2017: 1-4.
- [3] Manglayev T, Kizilirmak R C, Kho Y H, et al. NOMA with imperfect SIC implementation[C]//IEEE EUROCON 2017 17th International Conference on Smart Technologies. IEEE, 2017: 22-25.
- [4] 王钢,许尧,周若飞,等. 无线网络中的功率域非正交多址接入技术[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(4): 329-336.
- [5] Benjebbour A, Li A X, Saito Y, et al. System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements[C]//2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2013: 66-70.
- [6] Xia B, Wang J L, Xiao K X, et al. Outage performance analysis for the advanced SIC receiver in wireless NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 6711-6715.
- [7] Xu C N, Ma K C, Xu Y D, et al. Optimal power scheduling for uplink transmissions in SIC-based industrial wireless networks with guaranteed real-time performance[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(4): 3216-3228.
- [8] Tweed D, Le-Ngoc T. Dynamic resource allocation for uplink mimo noma vwn with imperfect SIC[C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018: 1-6.
- [9] Tweed D, Parsaeefard S, Derakhshani M, et al. Dynamic resource allocation for MC-NOMA VWNs with imperfect SIC[C]//2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2017: 1-5.