

非理想干扰消除全双工协作NOMA系统 性能分析及功率分配

申滨, 蒋慧林, 董坤明

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 随着非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术的不断发展,协作NOMA (Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access, CNOMA)也受到广泛关注. 该文研究了由一个基站(Base Station, BS)、一个远端用户和一个近端用户组成的全双工(Full-Duplex, FD)协作NOMA (FD-CNOMA)系统,其中近端用户作为一个FD解码转发中继以传输远端用户的信号. 考虑实际情况中存在基站与远端用户有无直接链路两种情况,以及非理想连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)对系统带来的残留干扰问题,该文提出并解决了在该模型下用户的功率分配问题. 最后,该文基于此模型给出了中继用户和远端用户的中断概率闭式表达式和遍历速率的近似闭式表达式. 理论分析与仿真结果表明,即便存在非理想SIC和自干扰,相对于半双工(Half-Duplex, HD)协作NOMA (HD-CNOMA)和NOMA系统而言,FD-CNOMA系统表现出更好的系统性能. 同时,非理想SIC和中继用户自干扰都会对用户性能产生负面影响,且非理想SIC在遍历速率上对HD机制的影响较FD机制更为严重. 最后,文中提出的功率分配方法较随机功率分配和固定功率分配分别获得了13%和10%的速率提升.

关键词: 协作非正交多址接入;中断概率;平均可实现速率;非理想干扰消除

基金项目: 国家自然科学基金(No.62071078)

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)03-0792-11

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220267

Performance Analysis and Power Allocation of Full Duplex Cooperative NOMA System with Imperfect SIC

SHEN Bin, JIANG Hui-lin, DONG Kun-ming

(School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: With the development of non-orthogonal multiple access (NOMA) technology, cooperative non-orthogonal multiple access (CNOMA) has received extensive attention. This paper investigates a full-duplex (FD) cooperative NOMA (FD-CNOMA) system, including one base station (BS), one near user, and one far user, where the near user acts as one FD relay to transmit the signal of the far user. Considering whether there is a direct link between the BS and the far user, and the residual interference caused by imperfect successive interference cancellation (SIC), the task of user power allocation under this model is also addressed in this paper. Finally, based on this model, we derive the closed-form expression of the outage probability and the average rate of the relay user and the far user. Theoretical analysis and simulation results show that the FD-CNOMA system performs better than the half-duplex (HD) cooperative NOMA (HD-CNOMA) and NOMA systems, even in the presence of imperfect SIC and self-interference. At the same time, both imperfect SIC and relay user self-interference have negative effects on user performance, and the effect of imperfect SIC on the ergodic rate of the HD mechanism is more notable than that of the FD mechanism. Finally, compared with random and fixed power allocation, the proposed power allocation method achieves 13% and 10% system sum-rate improvement respectively.

Key words: cooperative non-orthogonal multiple access; outage probability; average achievable rate; imperfect successive interference cancellation

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62071078)

1 引言

为了满足日益增加的频谱效率要求,非正交多址接入技术(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)作为一种新型多址接入方法,近年来受到极大关注. NOMA 技术允许在同一个资源块(时间/频率/编码)中通过不同的功率^[1]同时为多个用户服务. 与正交多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)的不同之处在于, NOMA 在发送端采用功率复用和叠加编码技术,为不同用户分配不同功率,以便于接收端根据不同功率区分用户,故而接收端可以利用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)来获取传输信息^[2,3],这使其具有比 OMA 更好的频谱效率. 一般而言,如果将两个用户通过接收功率大小分为近端用户和远端用户,同时远端用户通过近端用户接收基站发出信号,这样的系统被称为协作 NOMA (Cooperative NOMA, CNOMA),具有提高用户性能的优势^[3].

已有文献对各种 CNOMA 场景进行了研究. 文献[3]研究了多个用户半双工中继的 CNOMA 系统,包括两个近端用户,一个远端用户和一个基站(Base Station, BS). 其中 BS 与两个近端用户之间存在直连信道,远端用户则通过近端用户的协作传输来获取基站发送的信号,最后文献给出了该系统模型下远近用户中断概率的闭式表达. 文献[4]研究了全双工(Full Duplex, FD) CNOMA (FD-CNOMA)系统并给出了该系统下精确的用户中断概率闭式表达,同时还提出了一种基于地理限制的远近用户配对策略以提高能量效率. 仿真和分析表明,使用 FD-CNOMA 时,远端用户有时比近端用户有更好的中断概率. 文献[5]研究了理想干扰消除条件下 CNOMA 系统的性能,并给出了在不同模型下半双工(Half Duplex, HD) CNOMA (HD-CNOMA)和 FD-CNOMA 的中断概率及遍历速率的闭式表达,通过仿真详细分析了呈现该结果的原因. 文献[6]研究了一种基于 NOMA 的双跳协同中继网络,并进行了遍历速率和中断概率的度量,给出了用户在解码转发(Decode and Forward, DF)和放大转发(Amplify and Forward, AF)两种协议下的中断概率闭式表达. 仿真表明基于 NOMA 的 DF 中继优于基于 NOMA 的 AF 中继和现有的其他基于 NOMA 的协作通信方案. 文献[7]分析了 CNOMA 系统的误码率,并给出了精确的端到端误码率表达式. 最后讨论了功率分配对误码率的影响. 文献[8]研究了非理想 SIC 下的 FD-CNOMA 系统,并给出了用户遍历速率的闭式解. 通过仿真表明,远端用户对于非理想 SIC 更敏感. 文献[9]研究了密集小区中能量采集驱动的 CNOMA 系统,并给出了在该模型下用户的中断概率和遍历速率表达

式. 文献[10]提出了一种新型的基于阈值的 CNOMA 模型,即只有当蜂窝内用户的信号与干扰加噪声比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)大于预定的阈值时才会选择 CNOMA 传输,同时通过计算不同调制星座下的误差概率,从数据可靠性方面分析了系统性能. 文献[11]研究了 AF 模式下 CNOMA 系统的功率分配,并给出了用户的渐进中断概率表达式. 仿真表明,该系统与 NOMA 相比具有更好的中断性能. 总体来看,尽管目前对于 CNOMA 的研究较为丰富,但大部分都局限于半双工模式下,少部分全双工模式下对于用户自干扰的研究也仅仅将其建模为常数处理^[8],且对于 SIC 也是理想情况下的处理,缺乏全面的研究.

除了对于 CNOMA 系统的性能研究,也有较多文献对 NOMA 系统的功率分配展开了研究. 文献[12]考虑了多用户的动态用户簇 NOMA 系统,在上行链路和下行链路两种模型下,分别给出了满足最大和速率约束下的用户功率分配方案. 文献[13]通过罗列两个用户和三个用户条件下 NOMA 系统速率的情况,通过求导方式求解该模型下用户最大和速率,进而求得该模型下用户最优功率分配的近似解. 文献[14]考虑多小区网络下行链路的动态功率分配问题,建立了新的 JT-CoMP-NOMA 模型,提出了最优联合功率分配问题,从而根据此优化问题提出了一种分布式功率优化方法. 仿真结果表明,该功率分配方法相较于传统的多小区间用户功率分配表现出了更好的能量效率. 文献[15]以最大用户间公平性为目标,给出了满足该条件的 NOMA 系统最优功率分配解,仿真表明该分配方法比传统的随机和固定用户功率大小具有更好的性能. 文献[16]结合解码转发中继模式和无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)设计了一种新型功率分配方案,该方案通过最大化系统和速率寻求 SWIPT 的最优功率分割因子,从而获得系统的中断概率闭式表达. 文献[17]建立了满足远端用户最小系统吞吐量和近端用户最大干扰约束的次用户功率分配模型,主要通过凸差规划算法将目标函数等效为凸函数差形式,再采用次 Dinkelbach 算法和梯度算法,利用拉格朗日函数,最后得到最优子信道功率消耗率. 文献[20]建立了密集无线网络环境的理论模型,在下行链路中利用选择性和随机配对两种方案,分别采用基于顺序动态功率分配和改进的链路功率分配方案,进而获得整体的性能增益. 目前大部分文献对于传统 NOMA 系统功率分配的研究都集中在 NOMA 上下行链路中多用户的功率分配,然而对于 CNOMA 系统功率分配的研究很少见.

此外,在关于 CNOMA 的大部分现有工作中,虽然

已经对不同场景下的系统性能进行了分析,但在 CNOMA 系统中集成全双工机制并进行性能分析的研究较为少见. 由于 NOMA 接收机的复杂性,在实际应用中几乎不可能达到理想的 SIC,所以非理想 SIC 条件对 CNOMA 系统的影响值得进行研究. 目前的文献中几乎未见文献研究同时受限于非理想 SIC 和自干扰消除条件下的全双工协作 NOMA 系统. 为了扩展文献[5]中仅仅考虑理想 SIC 的研究设定,同时将 FD 机制集成到 CNOMA 系统中,本文研究了非理想 SIC 条件下的全双工 CNOMA 系统,给出了该模型下用户的中断概率的闭式解和遍历速率的近似解,并在性能上与 HD-CNOMA 和 NOMA 进行比较. 此外,考虑到目前 CNOMA 系统功率分配的研究仍较少,而用户之间功率分配的优化可以进一步提高用户的性能. 因此,本文还提出了一种在 FD-CNOMA 系统下满足用户最大最小速率约束的用户功率分配方案,仿真表明该功率分配方法比传统方法在性能上有一定的提升.

2 FD-CNOMA 系统

FD-CNOMA 系统如图 1 所示,包括一个近端用户 UE_a 、一个远端用户 UE_b 以及一个 BS,其中 UE_a 共有两根天线. 在第一个传输阶段,BS 发送一个叠加信号到 UE_a 和 UE_b . 在第二个传输阶段, UE_a 作为一个全双工中继发送信号给 UE_b ,同时受到自干扰影响. 而此时,BS 会传输下一个时隙的 BS 信号到 UE_a 与 UE_b . 假设 h_1, h_2, h_{12} 分别表示 BS 与 UE_a 、BS 与 UE_b 、以及 UE_a 与 UE_b 之间的信道参数. 不失一般性,假设对应的信道增益分别为 $|h_1|^2, |h_2|^2, |h_{12}|^2$,其服从参数为 λ_1, λ_2 和 λ_{12} 的指数分布. 除此之外,由于不完全自干扰消除是另一个系统因素,可用 h_r 表示 UE_a 收发天线之间自干扰信道参数,且假设其对应的信道增益服从参数为 λ_r 的指数分布.

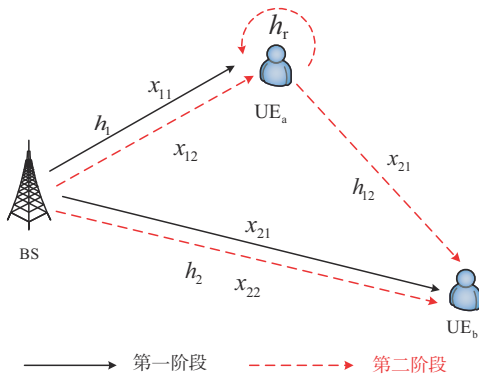


图1 FD-CNOMA 系统

整个传输过程分为两个阶段. 在第一个阶段,BS 传输一个叠加信号给 UE_a 和 UE_b ,该信号可以表示为

$$x_{s1} = \sqrt{\alpha_1 P_s} x_{11} + \sqrt{\alpha_2 P_s} x_{21} \quad (1)$$

其中 P_s 表示 BS 发送功率, x_{11}, x_{21} 分别表示在第一阶段由 BS 发送给 UE_a 和 UE_b 的信号, α_1 和 α_2 分别表示 UE_a 和 UE_b 的功率分配因子,且满足 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 及 $\alpha_1 < \alpha_2$. 除此之外,令 $\sqrt{\alpha_1 P_s} = P_1, \sqrt{\alpha_2 P_s} = P_2$.

第 i 个用户 $UE_i, i \in \{a, b\}$,接收到的信号可以表示为

$$y_{i1} = h_i x_{s1} + n_{i1} \quad (2)$$

其中 n_{i1} 表示第一阶段 UE_i 处服从均值为 0 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN).

UE_a 在解码自身信号 x_{11} 之前需要先解码信号 x_{21} . 当 UE_a 采用 SIC^[15] 去解码 x_{11}, x_{21} 时,对应的 SINR 可以分别表示为

$$\gamma_{1 \rightarrow 2} = \frac{|h_1|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho}, \quad \gamma_{1 \rightarrow 1} = \frac{|h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + \beta |h_1|^2 \alpha_2 \rho} \quad (3)$$

其中发送信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 表示为 $\rho = P_s / \sigma^2, \beta \in (0, 1)$ 表示非理想 SIC 的残差因子. 值得一提的是,当 $\beta = 0$ 时,有 $\gamma_{1 \rightarrow 1} = |h_1|^2 \alpha_1 \rho$. 当 UE_b 解码自身信号 x_{21} 时, SINR 可以表示为

$$\gamma_{2 \rightarrow 2} = \frac{|h_2|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_2|^2 \alpha_1 \rho} \quad (4)$$

在传输的第二阶段, UE_a 接收到的信号可以表示为

$$y_{a2} = h_1 x_{s2} + h_r \sqrt{P_r} x_{21} + n_{12} \quad (5)$$

其中 $x_{s2} = \sqrt{\alpha_1 P_s} x_{12} + \sqrt{\alpha_2 P_s} x_{22}, x_{12}, x_{22}$ 分别表示 UE_a 和 UE_b 在第二阶段的目标信号. 同时, n_{12} 表示第二阶段 UE_a 处服从均值为 0 方差为 σ^2 的 AWGN, P_r 表示 UE_a 作为中继时的传输功率. 为了便于分析,假设 $P_r = P_s$.

对于 UE_b 而言,其接收到的信号为

$$y_{b2} = h_2 x_{s2} + h_{12} \sqrt{P_r} x_{21} + n_{22} \quad (6)$$

其中 n_{22} 表示第二阶段 UE_b 处服从均值为 0、方差为 σ^2 的 AWGN. 同时, UE_a 解码 x_{22} 和 x_{12} 的 SINR 可以表示为

$$\hat{\gamma}_{1 \rightarrow 2} = \frac{|h_1|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho} \quad (7)$$

$$\hat{\gamma}_{1 \rightarrow 1} = \frac{|h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_r|^2 \rho}$$

假设从 BS 和 UE_a 传输的两个信号在 UE_b 处完全可解析^[18,19],则它们可以通过最大比率合并 (Maximal-Ratio Combining, MRC) 适当地共相和合并. 因此, UE_b 通过中继链路去解码 x_{21} 和通过直连链路去解码 x_{22} 的 SNR 分别可以表示为

$$\begin{aligned} \gamma_2^i &= |h_{12}|^2 \rho \\ \gamma_2^d &= \frac{|h_2|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_2|^2 \alpha_1 \rho} \end{aligned} \quad (8)$$

在 UE_b 处可以采用 MRC, 则 UE_b 处总的 SINR 可以表示为

$$\gamma_2^{\text{MRC}} = |h_{12}|^2 \rho + \frac{|h_2|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_2|^2 \alpha_1 \rho} \quad (9)$$

综上所述, UE_a 和 UE_b 的速率可以分别表示为

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2} \left(\log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta} \right) \right) \\ &+ \frac{1}{2} \left(\log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + |h_r|^2 \rho + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta} \right) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} R_{2,\text{dir}} &= \log_2 \left(1 + \min \left(|h_{12}|^2 \rho + \frac{|h_2|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_2|^2 \alpha_1 \rho}, \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \frac{|h_1|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho} \right) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $R_{2,\text{dir}}$ 中出现的 dir 表示 UE_b 与 BS 之间存在直连链路。

3 性能分析

本节评估 FD-CNOMA 两种典型场景下的中断性能和平均可实现速率。

3.1 缺乏直接链路的用户中继系统

(1) UE_a 的中断概率

对于 UE_a 而言, 中断可能发生在 UE_a 未能成功解码 x_{1i} 或 x_{2i} , 或两者皆未能成功解码时。因此, UE_a 的中断概率可以表示为

$$\begin{aligned} P_{1i}^{\text{out}} &= 1 - \Pr \left(\hat{\gamma}_{1 \rightarrow 2} > 2^{\bar{R}_2} - 1, \hat{\gamma}_{1 \rightarrow 1} > 2^{\bar{R}_1} - 1 \right) \\ &= 1 - \Pr \left(\frac{|h_1|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho} > \Delta_2, \right. \\ &\quad \left. \frac{|h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_r|^2 \rho} > \Delta_1 \right) \\ &= 1 - \Pr \left(|h_1|^2 > \frac{\Delta_2 (1 + |h_r|^2 \rho)}{\rho (\alpha_2 - \alpha_1 \Delta_2)}, |h_1|^2 > \frac{\Delta_1 (1 + |h_r|^2 \rho)}{\rho (\alpha_1 - \alpha_2 \Delta_1 \beta)} \right) \\ &= 1 - \int_0^{+\infty} \int_{(1+\rho x)\theta_1}^{+\infty} f_{|h_1|^2}(x) f_{|h_1|^2}(y) dy dx \end{aligned}$$

$$= \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta_1 \geq \frac{\alpha_1}{\beta \alpha_2} \text{ or } \Delta_2 \geq \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \\ 1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \rho \theta_1 \lambda_r} e^{-\frac{\theta_1}{\lambda_1}}, & \text{others} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\Pr(A)$ 表示事件 A 发生的概率, \bar{R}_i 表示 UE_i 处的服务质量 (Quality of Service, QoS) 要求, $f_{|h_r|^2}, f_{|h_1|^2}$ 分别表示信道增益 $|h_r|^2, |h_1|^2$ 的概率密度函数。且有 $\Delta_1 = 2^{\bar{R}_1} - 1, \Delta_2 = 2^{\bar{R}_2} - 1, \theta_1 = \max(\alpha_1, \alpha_2), \alpha_1 = \frac{\Delta_2}{\rho(\alpha_2 - \alpha_1 \Delta_2)}, \alpha_2 =$

$$\frac{\Delta_1}{\rho(\alpha_1 - \alpha_2 \Delta_1 \beta)}.$$

(2) UE_b 的中断概率

对于 UE_b 而言, 当 UE_a 未成功解码 x_{2i} , 或者 UE_a 成功解码 x_{2i} , 但是在 UE_b 处的 SINR 小于其服务质量要求值时, UE_b 处就会发生中断。因此, UE_b 的中断概率可以表示为

$$\begin{aligned} P_{2i}^{\text{out}} &= \Pr(\hat{\gamma}_{1 \rightarrow 2} < \Delta_2) + \Pr(\hat{\gamma}_{1 \rightarrow 2} > \Delta_1, \gamma_2^r < \Delta_2) \\ &= \Pr \left(|h_1|^2 < \frac{\Delta_2 (1 + |h_r|^2 \rho)}{\rho (\alpha_2 - \alpha_1 \Delta_2)} \right) \\ &+ \Pr \left(|h_1|^2 > \frac{\Delta_2 (1 + |h_r|^2 \rho)}{\rho (\alpha_2 - \alpha_1 \Delta_2)}, |h_{12}|^2 < \frac{\Delta_2}{\rho} \right) \\ &= \int_0^\infty \int_0^{a_1(1+y\rho)} f_{|h_1|^2}(x) f_{|h_1|^2}(y) dx dy \\ &+ \int_0^\infty \int_{a_1(1+y\rho)}^\infty f_{|h_1|^2}(x) f_{|h_1|^2}(y) dx dy \cdot \int_0^{\frac{\Delta_2}{\rho}} f_{|h_{12}|^2}(z) dz \\ &= \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta_1 \geq \frac{\alpha_1}{\beta \alpha_2} \text{ or } \Delta_2 \geq \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \\ 1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \rho \theta_1 \lambda_r} e^{-\frac{\alpha_1}{\lambda_1} + \frac{\alpha_2}{\rho \lambda_{12}}}, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $\alpha_1 = \frac{\Delta_2}{\rho(\alpha_1 - \alpha_1 \Delta_2)}$.

(3) UE_a 的平均可实现速率

UE_a 的平均可实现速率可以表示为

$$\begin{aligned} R_1^{\text{avg}} &= \frac{1}{2} \mathbb{E}(\log_2(1 + \gamma_{1 \rightarrow 1})) + \frac{1}{2} \mathbb{E}(\log_2(1 + \hat{\gamma}_{1 \rightarrow 1})) \\ &= \frac{1}{2} \mathbb{E} \left(\log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta} \right) \right) \\ &+ \frac{1}{2} \mathbb{E} \left(\log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + |h_r|^2 \rho + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta} \right) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \underbrace{\mathbb{E} \left(\log_2 \left(1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_1|^2 \alpha_1 \rho \right) \right)}_{q_1} \\
&\quad - \frac{1}{2} \mathbb{E} \left(\log_2 \left(1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho \right) \right) \\
&\quad + \frac{1}{2} \underbrace{\mathbb{E} \left(\log_2 \left(1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho \right) \right)}_{q_2} \\
&\quad - \frac{1}{2} \mathbb{E} \left(\log_2 \left(1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho \right) \right) \quad (14)
\end{aligned}$$

因为 $\mathbb{E}[Y] = \int_{t>0} P(Y>t) dt^{[5]}$, 所以上式中的 q_1 可

以表示为

$$\begin{aligned}
&\mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_1|^2 \alpha_1 \rho \right) \right] \\
&= \int_{t>0} \Pr \left(\log_2 \left(1 + \beta |h_1|^2 \alpha_2 \rho + |h_1|^2 \alpha_1 \rho \right) > t \right) dt \\
&= \frac{1}{\ln 2} \int_{t>0} \frac{1}{1+t} \Pr \left(|h_1|^2 > \frac{t}{\rho(\alpha_2 \beta + \alpha_1)} \right) dt \\
&= \frac{1}{\ln 2} \int_{t>0} \frac{e^{-\frac{t}{\lambda_1 \rho (\alpha_2 \beta + \alpha_1)}}}{1+t} dt \\
&= -\frac{1}{\ln 2} e^\mu [\text{Ei}(-\mu)] \quad (15)
\end{aligned}$$

其中 $\mu = \frac{1}{\lambda_1 \rho (\alpha_2 \beta + \alpha_1)}$, $\text{Ei}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt, x > 0$, 并且 q_2 可

以表示为

$$\begin{aligned}
&\mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho \right) \right] \\
&= \int_{t>0} \Pr \left(\log_2 \left(1 + \beta |h_1|^2 \alpha_2 \rho + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho \right) > t \right) dt \\
&= \frac{1}{\ln 2} \int_{t>0} \frac{1}{1+t} \Pr \left(|h_1|^2 > \frac{t - |h_r|^2 \rho}{\rho(\alpha_2 \beta + \alpha_1)} \right) dt \\
&= \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{f_{|h_1|^2}(x) f_{|h_r|^2}(y)}{1+t} dx dy dt \\
&= \frac{1}{\ln 2} \frac{\lambda_1 (\alpha_2 \beta + \alpha_1)}{\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_1 \alpha_2 \beta - \lambda_r} \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{t}{\lambda_1 \rho (\alpha_2 \beta + \alpha_1)}}}{1+t} dt \\
&= -\frac{1}{\ln 2} \frac{\lambda_1 (\alpha_2 \beta + \alpha_1)}{\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_1 \alpha_2 \beta - \lambda_r} e^\mu [\text{Ei}(-\mu)] \quad (16)
\end{aligned}$$

同理, 可以得到 R_1^{avg} 的结果为

$$\begin{aligned}
R_1^{\text{avg}} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{\ln 2} e^\mu [\text{Ei}(-\mu)] + \frac{1}{\ln 2} e^\mu [\text{Ei}(-\eta)] \right. \\
&\quad - \frac{1}{\ln 2} \frac{\lambda_1 (\alpha_2 \beta + \alpha_1)}{\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_1 \alpha_2 \beta - \lambda_r} e^\mu [\text{Ei}(-\mu)] \\
&\quad \left. + \frac{1}{\ln 2} \frac{\lambda_1 \alpha_1}{\lambda_1 \alpha_1 - \lambda_r} e^\mu [\text{Ei}(-\eta)] \right) \quad (17)
\end{aligned}$$

其中 $\eta = \frac{1}{\lambda_1 \rho \alpha_1}$.

(4) UE_b 的平均可实现速率

UE_b 的平均可实现速率可以表示为

$$\begin{aligned}
R_{2, \text{nodir}}^{\text{avg}} &= \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \min(\hat{\gamma}_{1 \rightarrow 2}, \gamma_2^r) \right) \right] \\
&= \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1 - F_Z(z)}{1+z} dz \quad (18)
\end{aligned}$$

其中 $Z = \min \left(\frac{|h_1|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho}, |h_{12}|^2 \rho \right)$, $R_{2, \text{nodir}}^{\text{avg}}$ 中的 nodir 表示 UE_b 与 BS 之间不存在直接链路。

由于 Z 的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 难以求解, 因此给出了 UE_b 在高 SNR 条件下平均可实现速率的近似值。

$$R_{2, \text{nodir}}^{\text{avg}, +\infty} = \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \min \left(|h_{12}|^2 \rho, \frac{|h_1|^2 \alpha_2}{|h_1|^2 \alpha_1 + |h_r|^2} \right) \right) \right] \quad (19)$$

基于 $K = \min \left(|h_{12}|^2 \rho, \frac{|h_1|^2 \alpha_2}{|h_1|^2 \alpha_1 + |h_r|^2} \right)$, K 的 CDF 可

以表示为

$$\begin{aligned}
F_K(k) &= 1 - \Pr \left(|h_{12}|^2 \rho > k, \frac{|h_1|^2 \alpha_2}{|h_1|^2 \alpha_1 + |h_r|^2} > k \right) \\
&= 1 - \Pr \left(|h_{12}|^2 > \frac{k}{\rho}, |h_1|^2 > \frac{|h_r|^2 k}{\alpha_2 - \alpha_1 k} \right) \\
&= 1 - \int_{\frac{k}{\rho}}^\infty f_{|h_{12}|^2}(z) dz \cdot \mathbb{U} \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} - k \right) \int_0^\infty \int_{\frac{y k}{\alpha_2 - \alpha_1 k}}^\infty f_{|h_1|^2}(x) f_{|h_r|^2}(y) dx dy \\
&= 1 - \mathbb{U} \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} - k \right) \frac{\lambda_1 (\alpha_2 - \alpha_1 k)}{\lambda_1 (\alpha_2 - \alpha_1 k) + \lambda_r k} e^{-\frac{k}{\lambda_{12} \rho}} \quad (20)
\end{aligned}$$

其中 $\mathbb{U}(y)$ 为阶跃函数, 即当 $y > 0$ 时, 其值为 1, 反之则为 0. 基于式 (20), 在高 SNR 条件下 UE_b 的平均可实现速率可以表示为

$$R_{2, \text{nodir}}^{\text{avg}, +\infty} = \int_0^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \frac{1}{1+k} \frac{\lambda_1 (\alpha_2 - \alpha_1 k)}{\ln 2 \lambda_1 (\alpha_2 - \alpha_1 k) + \lambda_r k} e^{-\frac{k}{\lambda_{12} \rho}} dk \quad (21)$$

3.2 有直接链路的用户中继系统

(1) UE_b 的中断概率

对于 UE_b 而言, 当 UE_a 和 UE_b 都未能成功解码 x_{2i} , 或者当 UE_a 成功解码 x_{2i} , 但是在 UE_b 处经过 MRC 后获得的 SINR 小于质量要求值时, UE_b 就会发生中断. 由此可以得出 UE_b 的中断概率表达式为

$$\begin{aligned}
P_{2, \text{dir}}^{\text{out}} &= \Pr(\hat{\gamma}_{1 \rightarrow 2} > \Delta_2, \gamma_2^{\text{MRC}} < \Delta_2) + \Pr(\hat{\gamma}_{1 \rightarrow 2} < \Delta_2, \gamma_{2 \rightarrow 2} < \Delta_2) \\
&= \Pr \left(\underbrace{\frac{|h_1|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho}}_{J_1} > \Delta_2, |h_{12}|^2 \rho + \frac{|h_2|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_2|^2 \alpha_1 \rho} < \Delta_2 \right)
\end{aligned}$$

$$+ \Pr \left(\underbrace{\frac{|h_1|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho} < \Delta_2, \frac{|h_2|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_2|^2 \alpha_1 \rho} < \Delta_2}_{J_2} \right) \quad (22)$$

经过数学处理后可以得到 UE_b 的中断概率为

$$P_{2, \text{dir}}^{\text{out}} = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta_1 \geq \frac{\alpha_1}{\beta a_2} \text{ or } \Delta_2 \geq \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \\ P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{12}, a_1), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

其中

$$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{12}, a_1) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \rho a_1 \lambda_r} e^{-\frac{a_1}{\lambda_1}} e^{-\frac{a_2}{\lambda_2 \rho (\alpha_2 - \alpha_1 \Delta_2)}} - \frac{a_1}{2} \sum_{i=1}^N w_i f_1(t_i) + \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \rho a_1 \lambda_r} e^{-\frac{a_1}{\lambda_1}} \right) \left(1 - e^{-\frac{a_1}{\lambda_2}} \right)$$

进而计算 J_1 (见式 (22)):

$$J_1 = \Pr \left[|h_1|^2 > \frac{\Delta_2 (1 + |h_r|^2)}{\rho (\alpha_2 - \alpha_1 \Delta_2)} \right] \times \Pr \left[|h_{12}|^2 < \frac{\Delta_2 - \frac{|h_2|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_2|^2 \alpha_1 \rho}}{\rho}, |h_2|^2 < \frac{\Delta_2}{\rho (\alpha_2 - \alpha_1 \Delta_2)} \right] \quad (24)$$

其中

$$J_{11} = \int_0^\psi f_{|h_2|^2}(x) \int_0^{\frac{\Delta_2 - \frac{x \alpha_2 \rho}{1 + x \alpha_1 \rho}}{\rho}} f_{|h_{12}|^2}(y) dy dx = \int_0^\psi f_{|h_2|^2}(x) \left[1 - e^{-\frac{1}{\lambda_{12}} \cdot \frac{\Delta_2 - \frac{x \alpha_2 \rho}{1 + x \alpha_1 \rho}}{\rho}} \right] dx = \int_0^\psi f_{|h_2|^2}(x) dx - \underbrace{\int_0^\psi f_{|h_2|^2}(x) e^{-\frac{1}{\lambda_{12}} \left(\frac{\Delta_2 - \frac{x \alpha_2 \rho}{1 + x \alpha_1 \rho}}{\rho} \right)} dx}_{J_{12}} \quad (25)$$

其中, $\psi = \frac{\Delta_2}{\rho (\alpha_2 - \alpha_1 \Delta_2)}$.

由于 J_{12} 目前几乎无法求解, 所以尝试使用高斯-切比雪夫近似来计算, 可以得到

$$J_{12} \approx \frac{a_1}{2} \sum_{i=1}^N w_i f_1(t_i) \quad (26)$$

$$f_1(t_i) = \sqrt{1 - (t_i)^2} e^{-\frac{1}{\lambda_{12}} \cdot \frac{\Delta_2 - \frac{a_1(t_i+1)\alpha_2\rho}{1 + \frac{a_1}{2}(t_i+1)\alpha_1\rho}}{\rho}} \cdot f_x\left(\frac{a_1}{2}(t_i+1)\right) \quad (27)$$

其中 N 是确定近似复杂度和准确度的参数, 其它参数分别表示为 $t_i = \cos \frac{(2i-1)\pi}{2N}$, $w_i = \frac{\pi}{N}$. 随即 J_1 可以表示为

$$J_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \rho a_1 \lambda_r} e^{-\frac{a_1}{\lambda_1}} \cdot \left(e^{-\frac{a_2}{\lambda_2 \rho (\alpha_2 - \alpha_1 \Delta_2)}} - \frac{a_1}{2} \sum_{i=1}^N w_i f_1(t_i) \right) \quad (28)$$

现在可以求得 J_2 表示为

$$J_2 = \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \rho a_1 \lambda_r} e^{-\frac{a_1}{\lambda_1}} \right) \left(1 - e^{-\frac{a_1}{\lambda_2}} \right) \quad (29)$$

(2) UE_b 的平均可实现速率

对于 UE_b 而言, 其平均可实现速率表示为

$$R_{2, \text{dir}}^{\text{avg}} = E \left[\log_2 \left(1 + \min(\hat{\gamma}_{1 \rightarrow 2}, \gamma_2^{\text{MRC}}) \right) \right] = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1 - F_z(z)}{1+z} dz \quad (30)$$

其中

$$Z' = \min \left(\frac{|h_1|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho}, |h_{12}|^2 \rho + \frac{|h_2|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_2|^2 \alpha_1 \rho} \right)$$

同样地, 由于 Z' 的 CDF 难以求得, 所以考虑高 SNR 条件下 UE_b 的平均可实现速率可以表示为

$$R_{2, \text{dir}}^{\text{avg}+\infty} = E \left[\log_2 \left(1 + \min \left(|h_{12}|^2 \rho + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \frac{|h_1|^2 \alpha_2}{|h_1|^2 \alpha_1 + |h_r|^2} \right) \right) \right] \quad (31)$$

基于 $K' = \min \left(|h_{12}|^2 \rho + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \frac{|h_1|^2 \alpha_2}{|h_1|^2 \alpha_1 + |h_r|^2} \right)$, K' 的

CDF 可以表示为

$$F_{K'}(k) = 1 - \Pr \left(|h_{12}|^2 \rho + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} > k, \frac{|h_1|^2 \alpha_2}{|h_1|^2 \alpha_1 + |h_r|^2} > k \right) = 1 - \Pr \left(|h_{12}|^2 > \frac{k - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\rho}, |h_1|^2 > \frac{|h_r|^2 k}{\alpha_2 - \alpha_1 k} \right) = 1 - \left[1 - U \left(k - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right) e^{-\frac{k - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\rho \lambda_{12}}} \right] \cdot U \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} - k \right) \int_0^\infty \int_{\frac{y k}{\alpha_2 - \alpha_1 k}}^\infty f_{|h_1|^2}(x) f_{|h_r|^2}(y) dx dy = 1 - U \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} - k \right) \frac{\lambda_1 (\alpha_2 - \alpha_1 k)}{\lambda_1 (\alpha_2 - \alpha_1 k) + \lambda_r k} \quad (32)$$

基于式 (32), 高 SNR 条件下 UE_b 的平均可实现速率可以表示为

$$R_{2,\text{dir}}^{\text{avg},+\infty} = \int_0^{\alpha_2} \frac{1}{1+k} \cdot \frac{\lambda_1(\alpha_2 - \alpha_1 k)}{\ln 2\lambda_1(\alpha_2 - \alpha_1 k) + \lambda_r k} dk \quad (33)$$

4 功率分配

以上性能分析的条件是UE_a、UE_b的发送功率为固定参数. 本节将讨论有直连链路的FD-CNOMA系统的功率分配优化问题. 考虑零均值和单位方差的用户处高斯白噪声,且将中继用户处的发送功率设置为 P_r ,且 $P_r \neq P_s$. 可以将用户速率重写为

$$R'_1 = \frac{1}{2} \left(\log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_{r1}}{1 + |h_1|^2 P_{r2} \beta} \right) \right) + \frac{1}{2} \left(\log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_{r1}}{1 + |h_r|^2 P_r + |h_1|^2 P_{r2} \beta} \right) \right) \quad (34)$$

$$R'_{2,\text{dir}} = \log_2 \left(1 + \min \left(|h_{12}|^2 P_r + \frac{|h_2|^2 P_{r2}}{1 + |h_2|^2 P_{r1}}, \frac{|h_1|^2 P_{r2}}{1 + |h_1|^2 P_{r1} + |h_r|^2 P_r} \right) \right) \quad (35)$$

其中 P_{r1}, P_{r2} 分别表示分配给UE_a和UE_b的功率.

采用最大最小速率思想,进一步,可以将优化问题表示为

$$P_1: \max_p \min \{R'_1, R'_{2,\text{dir}}\} \\ \text{s.t. C0: } P_{r1} + P_{r2} \leq P_s^{\max} \\ \text{C1: } \mathbf{p} \geq 0 \\ \text{C2: } P_r \leq P_r^{\max} \quad (36)$$

其中 $\mathbf{p} \triangleq [P_{r1}, P_{r2}, P_r]^T$ 表示传输功率矢量, C0表示用户功率分配和小于等于基站发送最大功率, C1表示功率分配矢量大于0, C2表示中继用户发送功率小于等于中继用户可发送最大功率.

由于优化问题 P_1 既不是凸的也不是凹的^[18],因此难以直接求解,但是,可以通过以下两步进行求解. 首先,通过将 P_r 看作一个常数从而将 P_1 转换拟凸问题,然后将拟凹问题转化为一系列凸可行性问题,得到闭形式解.

令 $P_r = \hat{P}_r$,则优化问题可以表示为

$$P_2: \max_{\hat{\mathbf{p}}} \min \{\hat{R}'_1, \hat{R}'_{2,\text{dir}}\} \\ \text{s.t. C0: } P_{r1} + P_{r2} \leq P_s^{\max} \\ \text{C1: } \hat{\mathbf{p}} \geq 0 \quad (37)$$

其中 $\hat{\mathbf{p}} \triangleq [P_{r1}, P_{r2}]^T$, $\hat{R}'_1, \hat{R}'_{2,\text{dir}}$ 分别表示当 $P_r = \hat{P}_r$ 时用户的速率. 由于问题 P_2 是拟凹的,因此可以将 P_2 转化为一系统凸可行性问题. 设 ζ^* 是问题 P_1 的最优解. 对于一个给定的 $\zeta_h > 0$,定义如下问题

$$P_3: \text{find: } \hat{\mathbf{p}} \\ \text{s.t. C0: } P_{r1} + P_{r2} \leq P_s^{\max} \\ \text{C1: } \hat{\mathbf{p}} \geq 0 \\ \text{C2: } \hat{R}'_1 \geq \zeta_h \\ \text{C3: } \hat{R}'_{2,\text{dir}} \geq \zeta_h \quad (38)$$

如果问题 P_3 是可行的,则有 $\zeta^* > \zeta_h$;如果问题不可行,则有 $\zeta^* \leq \zeta_h$. 此外,可将可行性问题 P_3 等价于如下的凸优化问题.

$$P'_3: \min \{P_{r1} + P_{r2}\} \\ \text{s.t. C1: } \hat{\mathbf{p}} \geq 0, \\ \text{C2': } \hat{R}'_1 \geq \zeta_h, \\ \text{C3': } \hat{R}'_{2,\text{dir}} \geq \zeta_h \quad (39)$$

然后检查 P'_3 的功率分配解是否满足约束条件C0.

由于 P'_3 是凸问题,所以可以写出 P'_3 的拉格朗日函数为

$$L = P_{r1} + P_{r2} - \sum_{n=1}^2 \omega_n P_{rn} \\ + \lambda_1 \left(\mathcal{G}_h - \min \left(|h_{12}|^2 \hat{P}_r + \frac{|h_2|^2 P_{r2}}{1 + |h_2|^2 P_{r1}}, \frac{|h_1|^2 P_{r2}}{1 + |h_1|^2 P_{r1} + |h_r|^2 P_r} \right) \right) \\ + \lambda_2 \left(\mathcal{G}'_h - \left(\frac{1 + |h_1|^2 P_{r2} \beta + |h_1|^2 P_{r1}}{1 + |h_1|^2 P_{r2} \beta} \right) \times \frac{1 + |h_1|^2 P_{r2} \beta + |h_r|^2 P_r + |h_1|^2 P_{r1}}{1 + |h_1|^2 P_{r2} \beta + |h_r|^2 P_r} \right) \quad (40)$$

其中 $\mathcal{G}_h = 2^{\zeta_h} - 1$, $\mathcal{G}'_h = 2^{\zeta_h} - 1$; $\omega_n, \lambda_1, \lambda_2$ 分别是约束条件C1、C2'、C3'的拉格朗日因子. 由于 P'_3 是凸问题,所以它的KKT条件是获得最优解的充分必要条件. 为了便于计算,将KKT分为两种情况,可以表示为

$$\lambda_2 \left(\mathcal{G}'_h - \left(\frac{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta} \right) \times \frac{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_r|^2 \rho + |h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_r|^2 \rho} \right) = 0 \quad (41)$$

$$\mathcal{G}'_h - \left(\frac{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta} \right) \times \frac{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_r|^2 \rho + |h_1|^2 \alpha_1 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_2 \rho \beta + |h_r|^2 \rho} \leq 0 \quad (42)$$

$$\omega_n \alpha_n = 0, n = 1, 2 \quad (43)$$

$$\lambda_n \geq 0, n=1,2 \quad (44)$$

$$\omega_n \geq 0, n=1,2 \quad (45)$$

$$p \geq 0 \quad (46)$$

其中 $\zeta_1 = \frac{|h_1|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_1|^2 \alpha_1 \rho + |h_r|^2 \rho}$, $\zeta_2 = |h_{12}|^2 \rho - \frac{|h_2|^2 \alpha_2 \rho}{1 + |h_2|^2 \alpha_1 \rho}$. 因此,该凸问题中 KKT 条件的推导形式

依赖于 ζ_1 和 ζ_2 之间的关系.

由于式(41)~(46)未知系数的个数与方程个数相等,所以可以直接求解,进而可以得出具体的功率分配方式.至此,求得 P_3^* 的最优解.

5 仿真结果

本节给出了 FD-CNOMA 系统性能的数值评估和仿真评估.若无特别说明,则假设信道增益参数 $\lambda_1=2, \lambda_2=1, \lambda_{12}=1.5, \lambda_r=-25$ dB,信噪比 $\rho=20$ dB;非理想 SIC 残余因子 $\beta=0.03$;NOMA 用户的 QoS 分别为 $\bar{R}_1=1$ bit/s/Hz, $\bar{R}_2=0.5$ bit/s/Hz;功率分配系数分别为 $\alpha_1=0.3, \alpha_2=0.7$.

图 2 探讨了不同系统下用户中断性能随 SNR 的变化情况.图 2 中包括 FD-CNOMA, HD-CNOMA, 无直连 FD-CNOMA, 无直连 HD-CNOMA 和 NOMA 系统,并分别列举了 $\beta=0$ 和 $\beta=0.03$ 两种情况下用户中断概率的变化情况.对比图 2(a)、图 2(b) 两图发现,理想 SIC 时用户的中断性能明显优于非理想 SIC 时用户的中断性能.为了保证公平性,不同系统中相同用户的服务质量要求都是一致的.通过观察发现,随着 SNR 的持续增加,不同系统下用户中断性能都在逐渐变好,尤其是 NOMA 系统,其中断性能随 SNR 线性变化.值得一提的是,当 SNR 大于 20 dB 时,FD-CNOMA 中 UE_a 和无直连 FD-CNOMA 中 UE_b 的中断概率下降速率变缓后趋于某定值,这是中心用户的残余自干扰增加造成的.其次,有直连链路的协作 NOMA 系统的中断性能总是优于无直连链路.此外,仿真结果还说明高 SNR 条件下,FD-CNOMA 系统的中断性能不如 HD-CNOMA 系统,这同样是中继用户的自干扰残余导致的.因此,如何解决中继用户的自环干扰是保证 FD 技术性能优势的关键.由图所示,蒙特卡洛仿真验证了数值分析的正确性.

图 3 描述了不同功率分配因子下用户中断性能随 SNR 的变化情况.显示了 SNR 对用户中断概率的影响,其中 Nodir 表示 UE_b 和 BS 之间缺乏直连链路.随着 SNR 的增加, UE_a 和 UE_b 的中断性能都在增强,并且随着 α_1 的增加 UE_a 获得更多的功率,因此 UE_a 的中断性能也会随之增强.同理,随着 α_1 的增加, UE_b 的中断性能会变弱.当 SNR > 30 dB 时,FD-CNOMA 中 UE_a 的中断性能不及 HD-CNOMA,这是由于用户性能是同时受

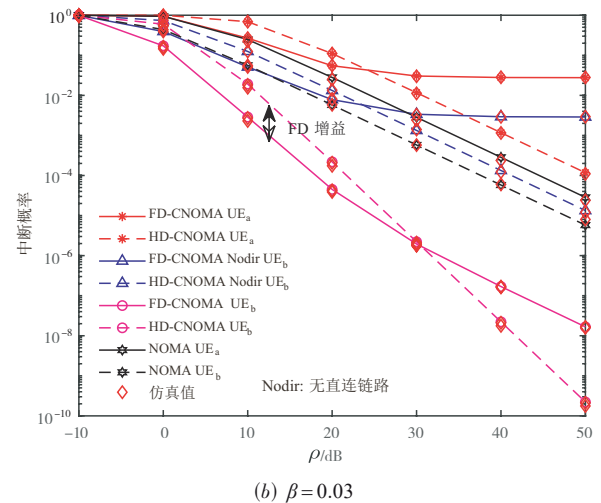
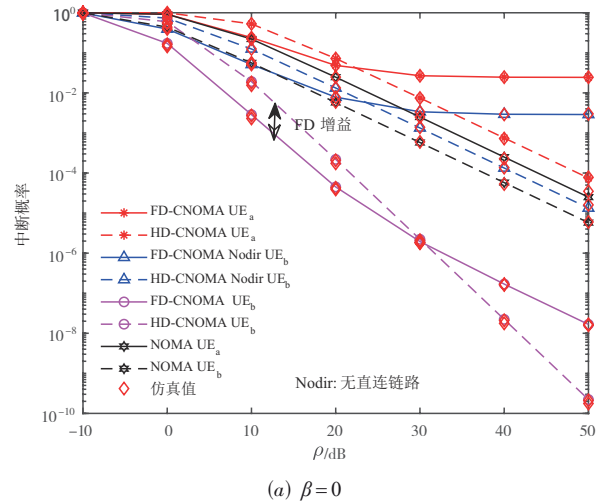


图 2 不同 SNR 下用户的中断概率变化情况

SNR 和自干扰影响.当 SNR 足够大时,继续增大 SNR 对于性能的提升效果将趋于饱和,此时,FD 协作模式带来的自干扰会对性能起到瓶颈抑制作用.同时,通过仿真发现当 UE_a 和 BS 之间有直连链路时, UE_a 的中断性能较不存在直连链路的情况更好.除此之外,借助于 FD 机制,FD-CNOMA 系统的中断性能是优于 HD-CNOMA 系统和 NOMA 系统的.

图 4 描绘了不同 β 条件下 HD-CNOMA, FD-CNOMA 系统的遍历和速率.随着 β 的增加,所有系统的和速率都在降低,这是由于用户间互相干扰增加而导致的.同时用户和速率与 α_1 成正比,即随着 α_1 的增加和速率也随之增加.概括来说,性能评估结果与预期结果一致,在同一条件下 FD-CNOMA 系统的和速率明显始终高于 HD-CNOMA 系统和 NOMA 系统.同时,有直连链路的协作式 NOMA 系统和速率略高于无直连链路的协作式 NOMA 系统,由此可见,BS 与远端用户之间有无直连链路对系统性能影响较小.最后,通过对比图 4 中同一 β 条件下两个不同系统的可

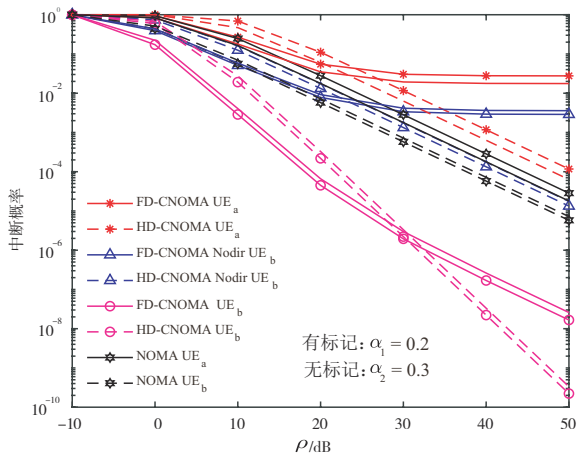


图3 不同功率分配因子对用户中断概率的影响

达和速率差异可知,非理想SIC干扰因子对HD-CNOMA系统速率的影响较FD-CNOMA系统更明显.

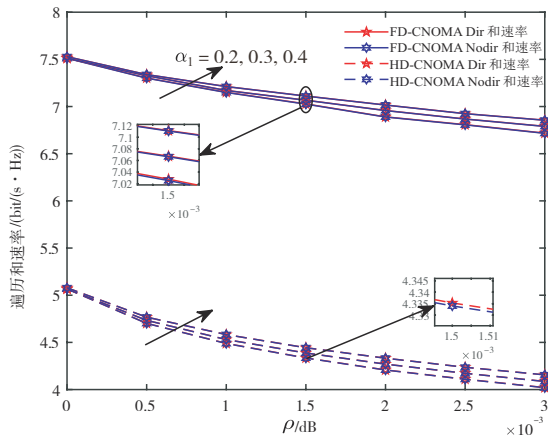


图4 不同非理想SIC因子β下的平均用户和速率

图5显示了在不同自干扰程度下的用户遍历速率与SNR的变化关系.当SNR < 30 dB时,FD-CNOMA系统的用户速率随着SNR的增加而显著增加;而当SNR > 30 dB时,用户的速率不再相应增加.产生这种结果的原因是当SNR达到一定值时,用户速率的主要影响因素从SNR转换为自干扰.同时,随着UE_a自干扰的增加,用户的性能将严重退化.总体来说,FD-CNOMA系统的速率要优于NOMA系统和HD-CNOMA系统.值得一提的是,有直连链路的UE_b的性能要优于不存在直连链路的情况.

图6绘制了FD-CNOMA和HD-CNOMA系统中遍历和速率随用户概率分配因子的变化关系.其中,α₁和α₂的取值范围在(0,1)区间内.通过观察发现,当α₁和α₂中任意一个变量保持不变时,随着另一变量的增加,用户速率都呈现上升趋势.由此可知,用户功率分配与用户速率之间存在一种正比的约束关系,当α₁和α₂的取值不合适时,用户速率变低,则用户很容易发生中断,从而影响系统性能.因此,可借助仿真结果进行场景中参数的选择.

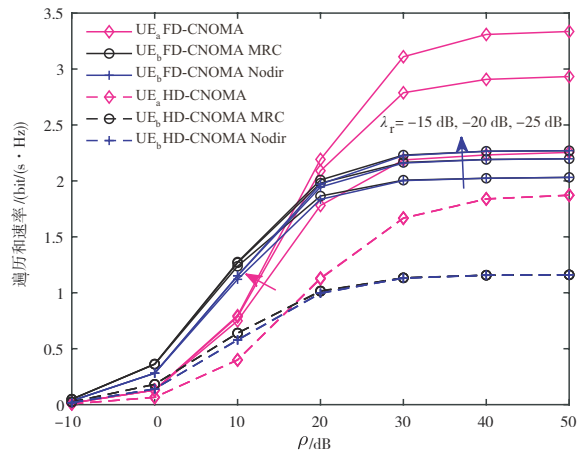


图5 不同SNR下UE_a和UE_b的遍历速率

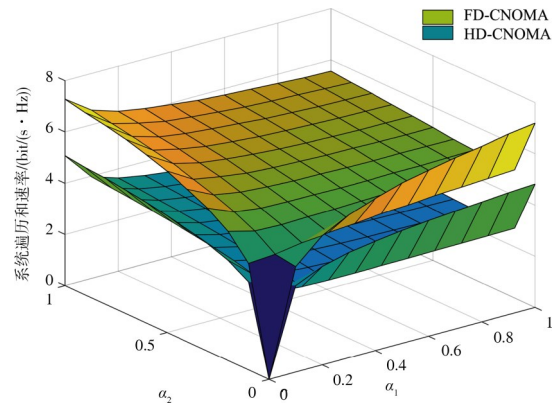


图6 不同协作系统中速率随α₁和α₂的变化关系

图7刻画了不同协作方案下用户遍历速率随信噪比ρ变化的关系.从之前的图2可知,当理想SIC条件具备时,即图7(a),低SNR情况下,FD-CNOMA系统表现出比HD-CNOMA系统更好的中断性能,如图示的FD增益.因此,当用户的服务质量要求相同时,FD-CNOMA系统的速率在低SNR时总是高于HD-CNOMA系统.然而当SNR > 30 dB时,HD-CNOMA系统的速率反超FD-CNOMA系统,导致FD增益消失甚至劣化.同样地,这也是由FD模式带来的自干扰导致的.当存在非理想SIC时,即图7(b),由仿真结果可知,此时FD-CNOMA系统的速率始终优于HD-CNOMA系统,FD增益保持稳定,这是由于非理想SIC带给HD-CNOMA的性能损失大于非理想SIC和自干扰所导致的FD-CNOMA系统的性能损失.同时,通过观察比较图7(a)和图7(b)两图可以发现,非理想SIC给FD-CNOMA系统和HD-CNOMA系统都带来了较大的性能损失.除此之外,随着SNR的不断增长,用户速率不会无限增长,而是先呈上升趋势,后逐渐减缓上升趋势直至趋于稳定.同时可以发现,有直连的系统速率略高于无直连的系统,只是两种系统下用户和速率的差距随着SNR

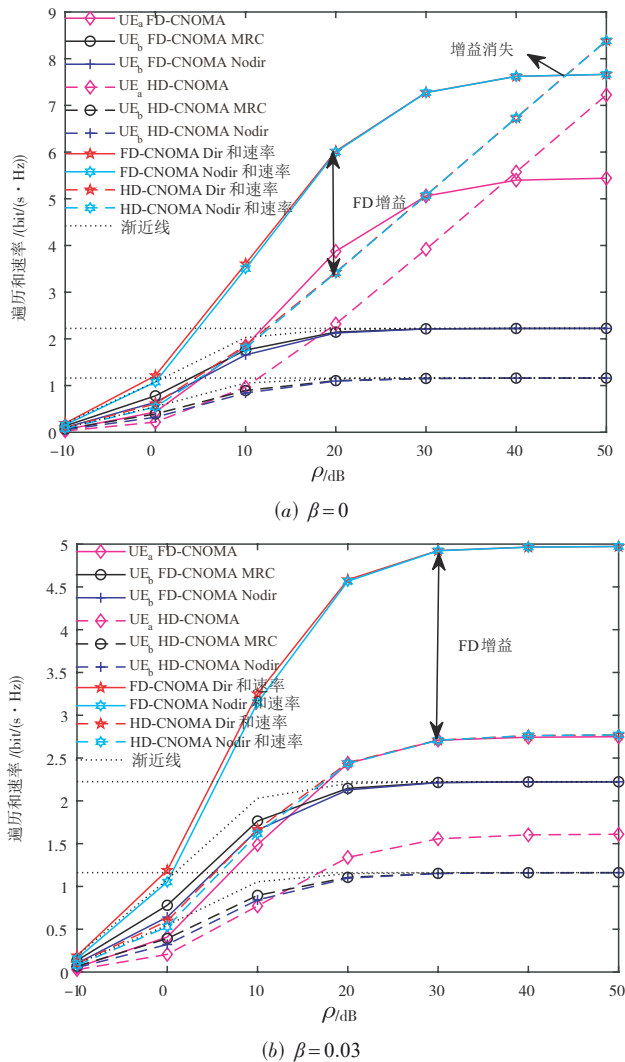


图7 遍历速率随SNR不同的变化情况

的增加逐渐减小。

图8显示了在不同功率分配方式下用户遍历和速

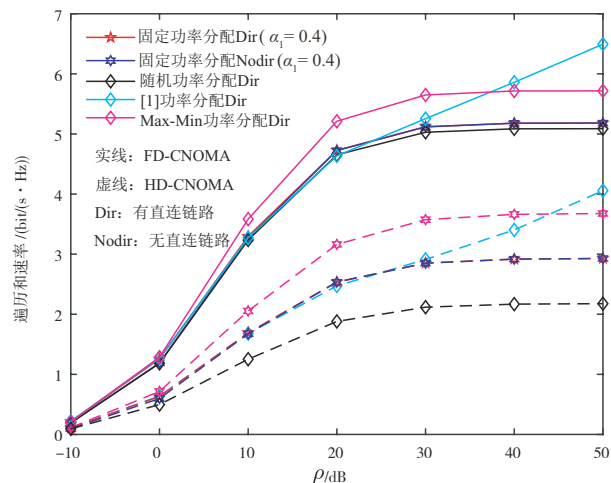


图8 不同功率分配下用户遍历速率随SNR变化情况

率随SNR变化的变化情况。总体来说,随着SNR的增加,所有系统的和速率都呈现上升趋势,同时,提出的Max-Min功率分配优化算法的和速率明显高于随机功率分配和固定功率分配方法,且在信噪比小于40 dB时,Max-Min功率分配方式具有较文献[1]更好的和速率性能。

6 结束语

本文针对非理想SIC和自干扰消除条件下FD-CNOMA系统,通过理论分析给出了该模型下用户中断概率和遍历速率的闭式表达式,并且通过仿真验证了理论分析的正确性。研究表明,非理想的SIC和FD模式的用户自干扰都会对用户中断性能和遍历速率产生明显负面影响。即便在非理想SIC和自干扰同时存在的条件下,FD-CNOMA系统的中断性能和遍历速率皆优于HD-CNOMA系统和NOMA系统。在理想SIC条件下,随着SNR的逐渐增加,HD-CNOMA系统的遍历速率会优于FD-CNOMA系统;而在非理想SIC条件下,FD-CNOMA系统的遍历速率始终优于HD-CNOMA系统,即非理想SIC对HD机制遍历速率的影响明显大于FD机制。最后,仿真表明本文提出的最大最小用户速率的功率分配方法在和速率上也明显优于采用随机或固定功率分配的CNOMA系统以及文献[1]中所提出的功率分配算法。

参考文献

- [1] ZHU L P, ZHANG J, XIAO Z Y, et al. Optimal user pairing for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 328-331.
- [2] XU P, YUAN Y, DING Z G, et al. On the outage performance of non-orthogonal multiple access with 1-bit feedback[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(10): 6716-6730.
- [3] LIAU Q Y, LEOW C Y. Successive user relaying in cooperative NOMA system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 921-924.
- [4] WANG S L, WU T M. Stochastic geometric performance analyses for the cooperative NOMA with the full-duplex energy harvesting relaying[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4894-4905.
- [5] YUE X W, LIU Y W, KANG S L, et al. Exploiting full/half-duplex user relaying in NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(2): 560-575.
- [6] HUANG R L, WAN D H, JI F, et al. Performance analysis of NOMA-based cooperative networks with relay selection

- [J]. China Communications, 2020, 17(11): 111-119.
- [7] KARA F, KAYA H K. On the error performance of cooperative-NOMA with statistical CSIT[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(1): 128-131.
- [8] LI X W, LIU M, DENG C, et al. Full-duplex cooperative NOMA relaying systems with I/Q imbalance and imperfect SIC[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(1): 17-20.
- [9] GUO C, XIN J, ZHAO L Q, et al. Performance analysis of cooperative NOMA with energy harvesting in multi-cell networks[J]. China Communications, 2019, 16(11): 120-129.
- [10] KARA F, KAYA H K. Threshold-based selective cooperative-NOMA[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(7): 1263-1266.
- [11] ABBASI O, EBRAHIMI A, MOKARI N. NOMA inspired cooperative relaying system using an AF relay[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(1): 261-264.
- [12] ALI M S, TABASSUM H, HOSSAIN E. Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems[J]. IEEE Access, 2016, 4: 6325-6343.
- [13] KARA F, GEMICI O F, HOKELEK I, et al. Optimal power allocation for DL NOMA systems[C]//2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Piscataway: IEEE, 2017: 1-4.
- [14] ALI M S, HOSSAIN E, AL-DWEIK A, et al. Downlink power allocation for CoMP-NOMA in multi-cell networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(9): 3982-3998.
- [15] LIU F, MAHONEN P, PETROVA M. Proportional fairness-based power allocation and user set selection for downlink NOMA systems[C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE, 2016: 1-6.
- [16] 赵亚楠, 季薇, 宋云超, 等. 协作NOMA系统中的一种新型节能功率分配方案[J]. 信号处理, 2021, 37(7): 1324-1331
ZHAO Y N, JI W, SONG Y C, et al. A novel energy-saving power allocation strategy in cooperative NOMA system[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(7): 1324-1331. (in Chinese)
- [17] 王江涛, 周梦园, 陈东, 等. 非正交多址认知无线网络功率分配算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(6): 945-953.
WANG J T, ZHOU M Y, CHEN D, et al. Power allocation algorithm in NOMA-based cognitive radio networks [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 32(6): 945-953. (in Chinese)
- [18] LIU G, CHEN X H, DING Z G, et al. Hybrid half-duplex/full-duplex cooperative non-orthogonal multiple access with transmit power adaptation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(1): 506-519.
- [19] ZHANG Z Q, MA Z, XIAO M, et al. Full-duplex device-to-device aided cooperative non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 4467-4471.
- [20] ZHANG Z K, SUN H J, HU R Q. Downlink and uplink non-orthogonal multiple access in a dense wireless network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(12): 2771-2784.

作者简介



申滨 男, 1978年1月出生, 贵州兴义人. 教授, 博士, 研究方向为信号处理、MIMO系统和认知无线电.

E-mail: shenbin@cqupt.edu.cn



蒋慧林 女, 1996年12月出生, 四川资阳人. 重庆邮电大学硕士, 研究方向为非正交多址接入.

E-mail: S190131036@stu.cqupt.edu.cn



董坤明 男, 1996年7月出生, 四川广元人. 重庆邮电大学硕士, 研究方向为非正交多址接入、认知无线电.

E-mail: 1370178823@qq.com