



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108600997 A

(43)申请公布日 2018.09.28

(21)申请号 201810286303.2

(22)申请日 2018.04.03

(71)申请人 暨南大学

地址 510632 广东省广州市天河区黄埔大道西601号

(72)发明人 施政 杨光华 陈德举 马少丹 屈挺

(74)专利代理机构 广州市华学知识产权代理有限公司 44245

代理人 陈燕娴

(51)Int.Cl.

H04W 4/70(2018.01)

H04W 52/24(2009.01)

H04W 72/04(2009.01)

H04L 1/18(2006.01)

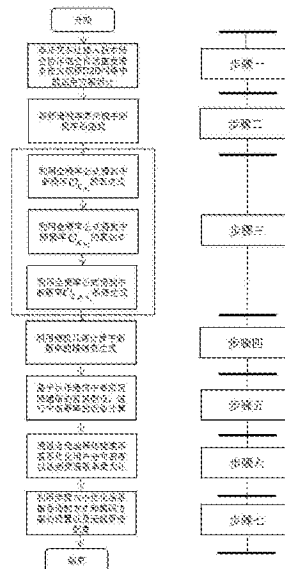
权利要求书4页 说明书15页 附图2页

(54)发明名称

一种基于HARQ辅助NOMA的大规模D2D通信方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于HARQ辅助NOMA的大规模D2D通信方法,该方法首先利用随机几何方法分析大规模D2D网络中叠加干扰对中断概率的影响,然后利用中断概率与频谱效率之间的关系,推导出频谱效率的具体表达式;最后基于这些理论分析结果构建资源分配的优化问题:通过合理设置不同D2D用户的信息传输速率甚至占用相同时频资源D2D终端的分布密度来最大化频谱效率(吞吐量或空间频谱利用率)并同时保证通信的可靠性。仿真和数值结果显示,本发明所提供的协作方式应用方案比非协作方式在中断概率上降低了23%,此外,应用非正交多址接入技术比应用正交多址接入技术在频谱效率上提高了17%。



1. 一种基于HARQ辅助NOMA的大规模D2D通信方法,其特征在于,所述的通信方法包括下列步骤:

S1、设计非正交多址接入技术NOMA结合协作混合自动重发请求HARQ的应用方案,发送设备首先根据混合自动重发请求将需要传输给两个D2D用户的信息 $s_1$ 和 $s_2$ 分别通过前向纠错编码产生各自对应的码字,然后采用支持多用户同时传输的非正交多址接入技术通过叠加编码向D2D用户发送信息 $\beta s_1 + \sqrt{1-\beta^2} s_2$ ,其中 $\beta$ 为功率分配因子;D2D用户分别解码信息,任何一个D2D用户的解码发生失败,D2D用户都将反馈NACK信号至发送设备,要求发送端重新发送信息,直至两个D2D用户都解码成功或者最大允许的传输次数 $K$ 达到;

S2、将吞吐量 $\eta$ 和空间频谱效率 $\Delta$ 表示成中断概率函数,其中吞吐量是衡量传输一条信息的频谱效率,空间频谱效率 $\Delta = \lambda \eta$ ,则是衡量整个网络的频谱效率, $\lambda$ 为占用相同时频资源的D2D用户分布密度,根据更新过程理论,吞吐量 $\eta$ 表示成

$$\eta = \frac{R_1 (1 - \mathcal{O}_{K, \theta_1}) + R_2 (1 - \mathcal{O}_{K, \theta_2})}{1 + \sum_{k=1}^{K-1} (\mathcal{O}_{k, \theta_1} + \mathcal{O}_{k, \theta_2} - \mathcal{O}_{k, \theta_1, \theta_2})}$$

式中各符号的含义如下:

$R_i$ :表示D2D用户 $i$ 预设的信息传输速率,

$\mathcal{O}_{K, \theta_i}$ :表示D2D用户 $i$ 在经过 $K$ 次传输之后发生中断的概率,

$\mathcal{O}_{k, \theta_1, \theta_2}$ :表示两个D2D用户在 $k$ 次传输之后发生中断的概率;

S3、中断概率的分解,通过全概率公式,将中断概率 $\mathcal{O}_{K, \theta_1}$ 、 $\mathcal{O}_{K, \theta_2}$ 和 $\mathcal{O}_{k, \theta_1, \theta_2}$ 表示成

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{K, \theta_1} &= \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^k \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \Theta_{\theta_2, k}] + \sum_{k=1}^K \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \Theta_{\theta_2, k}] \\ &\quad + \sum_{l=1}^K \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{\theta_2}] + \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \bar{\Theta}_{\theta_2}], \\ \mathcal{O}_{K, \theta_2} &= \sum_{l=1}^K \sum_{k=l}^K \mathbb{P}[\Theta_{\theta_1, 1, k}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{\theta_2}] + \sum_{l=1}^K \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{\theta_2}] + \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \bar{\Theta}_{\theta_2}], \\ \mathcal{O}_{k, \theta_1, \theta_2} &= \sum_{l=1}^k \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{\theta_2}] + \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \bar{\Theta}_{\theta_2}], \end{aligned}$$

式中各符号的含义如下:

$\mathbb{P}$ :表示事件发生的概率;

$\Theta_{\theta_1, i, l}$ :用户1在经过 $l$ 次传输后成功解码信号 $s_i$ 的事件;

$\bar{\Theta}_{\theta_1, i}$ :并集 $\bigcup_{l=1}^K \Theta_{\theta_1, i, l}$ 的补集,即用户1在 $K$ 次传输后依然无法解码信息 $s_i$ ;

$\Theta_{\theta_2, k}$ :经过 $k$ 次传输后,用户2成功解码自身消息的事件;

$\bar{\Theta}_{\theta_2}$ :并集 $\bigcup_{k=1}^K \Theta_{\theta_2, k}$ 的补集,也即用户2在经过 $K$ 次传输后,无法恢复自身信息;

S4、利用随机几何进行中断概率的精确计算,通过二维齐次泊松点过程来准确模拟干扰D2D用户的分布,再利用随机几何中的理论来推导上述中断概率的具体表达式,如下:

$$\begin{aligned}
& \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{a_1, l}, \Theta_{a_1, 2, l}, \Theta_{a_2, k} \right] = \\
& \left[ \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^{k-l} \sum_{\tau_3=0}^{K-k} \sum_{\tau_4=0}^{k-1} (-1)^{\sum_{j=1}^4 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_{k-l}^{\tau_2} C_{K-k}^{\tau_3} C_{k-1}^{\tau_4} \times \right. \\
& \left. \left[ \Psi \left( \mathbf{U}_a, \boldsymbol{\tau}_a; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_4+1 \right) - \Psi \left( \mathbf{U}_b, \boldsymbol{\tau}_b; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_4+1 \right) \right] \right]^*, \\
& \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{a_1, l}, \bar{\Theta}_{a_1, 2}, \Theta_{a_2, k} \right] = \sum_{\tau_1=0}^{k-k} \sum_{\tau_2=0}^k \sum_{\tau_3=0}^{k-1} (-1)^{\sum_{j=1}^3 \tau_j} C_{K-k}^{\tau_1} C_k^{\tau_2} C_{k-1}^{\tau_3} \times \\
& \Psi \left( \left( \frac{2^{R_1}-1}{\ell(d_1)}, \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}} \right), (\tau_1, \tau_2); \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_3+1 \right), \\
& \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{a_1, l}, \Theta_{a_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{a_2} \right] = \left[ \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^{K-l} \sum_{\tau_3=0}^K (-1)^{\sum_{j=1}^3 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_{K-l}^{\tau_2} C_K^{\tau_3} \times \right. \\
& \left. \left[ \Psi \left( \mathbf{U}_b, \boldsymbol{\tau}_b; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_3 \right) - \Psi \left( \mathbf{U}_k, \boldsymbol{\tau}_k; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_3 \right) \right] \right]^*, \\
& \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{a_1, l}, \bar{\Theta}_{a_1, 2}, \bar{\Theta}_{a_2} \right] = \sum_{\tau_1=0}^K \sum_{\tau_2=0}^K (-1)^{\sum_{j=1}^2 \tau_j} C_K^{\tau_1} C_K^{\tau_2} \Psi \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \tau_1; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_2 \right), \\
& \mathbb{P} \left[ \Theta_{a_1, l, k}, \Theta_{a_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{a_2} \right] = \\
& \left[ \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^l \sum_{\tau_3=0}^{K-l} (-1)^{\sum_{j=1}^3 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_l^{\tau_2} C_{K-l}^{\tau_3} \times \right. \\
& \left. \Psi \left( \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \max \left\{ \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^2 \ell(d_1)} \right\} \right), (\tau_1, 1); \right. \right. \\
& \left. \left. \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \frac{2^{R_2}-1}{\ell(D)+\ell(d_2)} \right), (\tau_2, \tau_3) \right) \right]^*, \quad k=l \\
& \left[ \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^{k-l-1} \sum_{\tau_3=0}^k \sum_{\tau_4=0}^{K-k} (-1)^{\sum_{j=1}^4 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_{k-l-1}^{\tau_2} C_k^{\tau_3} C_{K-k}^{\tau_4} \times \right. \\
& \left. \left. \times \left( \Psi \left( \mathbf{U}_d, \boldsymbol{\tau}_d; \mathbf{U}_e, \boldsymbol{\tau}_e \right) - \Psi \left( \mathbf{U}_d, \boldsymbol{\tau}_d; \mathbf{U}_e, \boldsymbol{\tau}_e \right) \right) \right]^*, \quad k>l
\end{aligned}$$

式中各符号的含义如下：

$\tau_a = (\tau_1+1, \tau_2, \tau_3)$ ,  $\tau_b = (\tau_1, \tau_2+1, \tau_3)$ ,  $\tau_c = (\tau_1+1, \tau_2)$ ,  $\tau_d = (\tau_1, \tau_2+1)$ ,  $\tau_e = (\tau_3, \tau_4)$ ,  $\tau_f = (\tau_1+1, \tau_2+1)$ ,  $\tau_g = (\tau_1, \tau_2+2)$ ,

$$\mathbf{U}_a = \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^2 \ell(d_1)}, \frac{2^{R_1}-1}{\ell(d_1)} \right), \quad \mathbf{U}_b = \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^2 \ell(d_1)} \right),$$

$$\mathbf{U}_e = \left\{ \frac{2^{R_2} - 1}{(1 - 2^{R_2} \beta^2)^{\ell}(d_2)}, \frac{2^{R_2} - 1}{\ell(D) + \ell(d_2)} \right\}, \mathbf{U}_d = \left\{ \frac{2^{R_2} - 1}{(1 - 2^{R_2} \beta^2)^{\ell}(d_1)}, \frac{2^{R_1} - 1}{\beta^{2\ell}(d_1)} \right\},$$

函数  $\Psi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})$  定义为  $\Psi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}) = e^{-\frac{\sigma^2}{P}(\mathbf{U}\boldsymbol{\tau}^T + \mathbf{U}\boldsymbol{\tau}^T) - \lambda\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})}$ , 这里  $\mathbf{U} = (U_1, \dots, U_N)$ ,  $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_N)$ ,  $\hat{\mathbf{U}} = (\hat{U}_1, \dots, \hat{U}_M)$ ,  $\hat{\boldsymbol{\tau}} = (\hat{\tau}_1, \dots, \hat{\tau}_M)$ ,  $\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})$  表示成二重积分形式

$$\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}) = \int_{\mathbb{R}^2} \left\{ 1 - \prod_{n=1}^N \frac{1}{(1 + U_n \ell(\|u\|))^{\tau_n}} \prod_{n=1}^M \frac{1}{(1 + \hat{U}_n \ell(\|u + o_1 - o_2\|))^{\hat{\tau}_n}} \right\} du;$$

S5、短距通信的前提假设下中断概率近似计算, 考虑到D2D用户之间的距离D非常接近, 且由于协作通信的缘故, 假设  $D \approx 0$ , 二重积分  $\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})$  可以近似为

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \hat{\mathbf{U}}, \hat{\boldsymbol{\tau}}) &\approx \varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{0}, \mathbf{0}) \\ &= \pi B \left( 1 - \frac{2}{\alpha}, \sum_{i=1}^{N+M} \tilde{\tau}_i + 1 \right) K_{\frac{2}{\alpha}} \tilde{U}_{\mu}^{\frac{2}{\alpha}-1} \sum_{\kappa=1}^{N+M} \tilde{\tau}_{\kappa} \tilde{U}_{\kappa} \\ &\times F_D^{(N+M-1)} \left( 1 - \frac{2}{\alpha}, (\tilde{\tau}_i + \delta_{i-\kappa})_{i=1, i \neq \mu}^{N+M}; \sum_{i=1}^{N+M} \tilde{\tau}_i + 1; \left( 1 - \frac{\tilde{U}_i}{\tilde{U}_{\mu}} \right)_{i=1, i \neq \mu}^{N+M} \right), \end{aligned}$$

其中,  $\mathbf{U} = (\mathbf{U}, \mathbf{U}) = (\tilde{U}_1, \dots, \tilde{U}_{N+M})$ ,  $\boldsymbol{\tau} = (\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\tau}) = (\tilde{\tau}_1, \dots, \tilde{\tau}_{N+M})$ ,  $\delta_s$  定义狄利克雷函数,  $F_D^{(N)}(\mathbf{a}; \mathbf{b}; \mathbf{x})$  定义第四类Lauricella函数,  $B(a, b)$  定义Beta函数, 如果  $N+M=1$ , 则上述近似将变为等式;

S6、频谱效率最大化, 通过合理选择用户的信息传输速率  $R_1$  和  $R_2$  来最大化吞吐量  $\eta$  同时保证服务的可靠性, 优化问题的数学形式表示成

$$\begin{aligned} &\text{maximize}_{R_1, R_2} \quad \eta \\ &\text{subject to} \quad \mathcal{O}_{\kappa, \varrho_i} \leq \varepsilon_i, i = 1, 2 \\ &0 \leq \beta^2 < 2^{-R_2}, \end{aligned}$$

式中各符号的含义如下:

$\varepsilon_i$ : 表示D2D用户  $i$  的最大允许中断概率,

$\mathcal{O}_{\kappa, \varrho_i}$ : 表示用户  $i$  在第  $\kappa$  次传输之后发生中断的概率,

$\beta^2$ : 表示预设的功率分配因子;

通过优化D2D用户的分布密度, 最大化空间频谱利用率  $\Delta$  同时保证服务质量, 因此优化问题的数学形式如下:

$$\begin{aligned} &\text{maximize}_{R_1, R_2, \lambda} \quad \Delta \\ &\text{subject to} \quad \mathcal{O}_{\kappa, \varrho_i} \leq \varepsilon_i, i = 1, 2 \\ &0 \leq \beta^2 < 2^{-R_2}, \end{aligned}$$

$\lambda > 0$ ,

式中各符号含义如下:

$\lambda$ : 表示干扰用户的分布密度,

$\varepsilon_i$ :表示D2D用户i的最大允许中断概率,

$\mathcal{O}_{K,\varepsilon_i}$ :表示用户i在第K次传输之后发生中断的概率,

$\beta^2$ :表示预设的功率分配因子;

S7、调制方式和编码方案的设置以及无线资源配置,利用优化得到的传输速率 $R_1^*$ 和 $R_2^*$ 以及D2D用户分布密度 $\lambda^*$ 值来配置无线资源。

2.根据权利要求1所述的一种基于HARQ辅助NOMA的大规模D2D通信方法,其特征在于,所述的步骤S1、设计非正交多址接入技术NOMA结合协作混合自动重发请求HARQ的应用方案中,根据两个D2D用户的路径损耗来决定解码顺序,路径损耗模型表示成 $\ell(d) = \kappa d^{-\alpha}$ ,其中 $\kappa$ 表示距离为1m的参考路径损耗值, $\alpha$ 为路径损耗指数,d为距离。

3.根据权利要求1所述的一种基于HARQ辅助NOMA的大规模D2D通信方法,其特征在于,所述的步骤S6、频谱效率最大化中对优化问题利用内点法进行优化求解,得到传输速率 $R_1^*$ 和 $R_2^*$ 以及D2D用户分布密度 $\lambda^*$ 值。

4.根据权利要求1所述的一种基于HARQ辅助NOMA的大规模D2D通信方法,其特征在于,所述的S7、调制方式和编码方案的设置以及无线资源配置的过程如下:通过优化的传输速率 $R_1^*$ 和 $R_2^*$ 在发送端设置合理的调制方式和编码方案;通过最优的 $\lambda^*$ 指导无线资源分配,并针对频谱资源进行频谱复用率配置。

## 一种基于HARQ辅助NOMA的大规模D2D通信方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及无线通信技术领域,具体涉及一种基于HARQ辅助NOMA的大规模D2D通信方法。

### 背景技术

[0002] 根据国际电联发布的白皮书ITU-R M.2083-0,下一代移动蜂窝网络(5G)的目标不仅要增强移动宽带业务,而且要为未来物联网模式下提供支持大量终端的无线链路,同时需要保证超可靠性和低时延的通信服务。在物联网中支持大量机器形式连接,以及为某些服务提供超可靠和低延迟通信。这些新需求给传统基于正交多址接入(OMA)方式和以基站为中心的通信带来了前所未有的挑战。因此,3GPP则考虑采用更加贪婪的高频谱利用率方案,如D2D通信和非正交多址接入技术(NOMA),从而来支持大量的连接。尽管D2D通信会增加原有网络的干扰水平,但是由于其低功耗和短距直通通信的性能优势,D2D依然可以显著提高整个通信系统的空间频谱利用率。而NOMA技术则是通过利用相同的时频资源来为多个用户同时提供服务,这种方式相比于传统的方式可以显著提高频谱利用率,NOMA技术的核心是利用叠加编码(SC)和连续干扰消除(SIC)这两项技术来提供多用户分集,从而有效地提高频谱利用率。此外,通过分配更多的发射功率给信道条件较差的用户,NOMA技术可以在系统吞吐量和用户公平性之间达到非常好的平衡。

[0003] 为了进一步提供频谱利用率,本发明将NOMA技术应用到D2D通信中,但是由于D2D通信在大规模应用时,会遇到了一个非常致命的技术瓶颈,即有限的频谱资源和过度的频谱复用之间的矛盾,导致终端设备存在很强的网络叠加干扰,最终导致接收机接收性能急剧下降,如频谱效率降低和中断概率上升。然而以前大量的研究工作在讨论大规模D2D网络时,并没有考虑如何改善强网络叠加干扰所带来的负面效应。为了保证传输的可靠性和进一步提高频谱效率,本发明将结合混合自动重发请求(HARQ)技术来提高传输的可靠性,需要指出的是混合自动重发请求是一种有效保证可靠性传输的技术,它的技术核心是重发机制和前向纠错编解码。此外,在应用HARQ技术时,并不要求发送设备知道完美的瞬时信道状态信息,只需要知道部分信道状态信息或者信道的一些统计特征,这种方式可以有效减少频繁的信道测量和瞬时信噪比报告反馈,从而可以大大减少系统信令开销,这种优势反过来也让D2D通信在大规模网络中应用时成为一种可能。由于NOMA技术和HARQ方案的同时应用,也促使本发明通过协作通信进一步提高传输的可靠性,这是因为每个接收端都会收到叠加编码信号,叠加信号包含有所有用户的信息,因此先解码成功的用户可以作为中继将已经解码了其他用户的信息转发给这些用户。基于这些考虑,亟待提出一种非正交多址接入技术结合协作混合自动重发请求在大规模D2D网络中的应用方案。

### 发明内容

[0004] 大规模D2D通信的应用是为了分担传统移动蜂窝网络以基站为控制中心的负荷,然而由于有限的频谱资源和过度的频率复用之间的矛盾,导致D2D通信进行大规模应用时,

终端D2D设备之间存在很强的网络叠加干扰,最终导致接收机接收性能急剧下降,如频谱效率降低和中断概率上升。本发明的目的是为了解决现有技术中的上述缺陷,提供一种基于HARQ辅助NOMA的大规模D2D通信方法,旨在提高频谱效率和降低中断概率。

[0005] 本发明的目的可以通过采取如下技术方案达到:

[0006] 为了降低来至于基站的干扰,本发明假设D2D发送设备工作在overlay模式,即基站和D2D设备使用正交的频谱资源。同时假设所有的D2D发送设备服从齐次泊松点过程(HPPP),这是一种非常合理的假设,其有效性已经经过大量的实验测量验证。此外,为了降低硬件的复杂度要求、限制干扰水平和保证低时延等要求,本发明只考虑发送设备与两个D2D用户之间进行直连通信,同时利用NOMA技术结合协作HARQ方案改善大规模D2D通信应用时的频谱效率和中断概率,这种性能提升需要建立在合理调制和编码选择以及优化资源配置的基础上,系统模型如图1所示。具体的技术方案实施步骤如图2示,共由七个步骤组成,每个步骤详细内容如下所示:

[0007] S1、应用方案设计

[0008] 在基于非正交多址接入技术(NOMA)结合协作混合自动重发请求(HARQ)的应用方案中,发送设备首先根据混合自动重发请求将需要传输给两个用户的信息 $s_1$ 和 $s_2$ 分别通过前向纠错编码产生各自对应的码字,然后采用支持多用户同时传输的非正交多址接入技术,通过叠加编码向D2D用户发送信息 $\beta s_1 + \sqrt{1-\beta^2} s_2$ ,其中 $\beta$ 为功率分配因子。为了更合理利用非正交多址接入技术,需要利用D2D用户之间的信道差异来改善频谱利用率,因此要求根据两个用户路径损耗来决定解码顺序,路径损耗模型可以表示成 $\ell(d) = \kappa d^{-\alpha}$ ,其中 $\kappa$ 表示距离为1m的参考路径损耗值, $\alpha$ 为路径损耗指数。这里假设D2D用户1距离发送设备比用户2距离发送设备要近,它们之间的距离分别定义成 $d_1$ 和 $d_2$ ,并且 $d_1 < d_2$ 。根据非正交多址接入技术,用户1首先解码用户2的信息,再采用干扰消除技术消除用户2的干扰,继而再解码用户1自身信息;而用户2则直接解码自身信息,无需采用干扰消除技术。一旦任何一个用户的解码发生失败,D2D用户将反馈NACK信号至发送设备,要求发送端重新发送信息,直至两个用户都解码成功或者最大允许的传输次数 $K$ 达到。

[0009] S2、将频谱效率表示成中断概率函数

[0010] 频谱效率中最重要的两个评估性能指标是吞吐量 $\eta$ 和空间频谱效率 $\Delta$ ,前者衡量传输一条信息的频谱效率,后者则是衡量整个网络的频谱效率,并且两者的关系为 $\Delta = \lambda \eta$ ,其中 $\lambda$ 为占用相同时频资源的D2D用户分布密度。由此可见,吞吐量是衡量频谱效率至关重要的性能指标。根据更新过程理论,吞吐量 $\eta$ 可以表示成

$$[0011] \quad \eta = \frac{R_1 (1 - \mathcal{O}_{K, \theta_1}) + R_2 (1 - \mathcal{O}_{K, \theta_2})}{1 + \sum_{k=1}^{K-1} (\mathcal{O}_{k, \theta_1} + \mathcal{O}_{k, \theta_2} - \mathcal{O}_{k, \theta_1, \theta_2})}$$

[0012] 式中各符号的含义如下:

[0013]  $R_i$ :表示D2D用户 $i$ 预设的信息传输速率;

[0014]  $\mathcal{O}_{K, \theta_i}$ :表示D2D用户 $i$ 在经过 $K$ 次传输之后发生中断的概率;

[0015]  $\mathcal{O}_{k, \theta_1, \theta_2}$ :表示两个D2D用户在 $k$ 次传输之后发生中断的概率。

[0016] S3、中断概率的分解

[0017] 如上述步骤, 频谱效率最终表示成了很多中断概率的函数, 而中断概率也是性能分析中最关键的评估指标。因此, 通过全概率公式, 中断概率 $\mathcal{O}_{K, \theta_1}$ 、 $\mathcal{O}_{K, \theta_2}$ 和 $\mathcal{O}_{K, \theta_1, \theta_2}$ 表示成:

$$[0018] \quad \mathcal{O}_{K, \theta_1} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^k \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1, l}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \Theta_{\theta_2, k} \right] + \sum_{k=1}^K \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \Theta_{\theta_2, k} \right] \\ + \sum_{l=1}^K \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{\theta_2} \right] + \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \bar{\Theta}_{\theta_2} \right].$$

$$[0019] \quad \mathcal{O}_{K, \theta_2} = \sum_{l=1}^K \sum_{k=l}^K \mathbb{P} \left[ \Theta_{\theta_1, 1, k}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{\theta_2} \right] + \sum_{l=1}^K \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{\theta_2} \right] + \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \bar{\Theta}_{\theta_2} \right],$$

$$[0020] \quad \mathcal{O}_{K, \theta_1, \theta_2} = \sum_{l=1}^K \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{\theta_2} \right] + \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \bar{\Theta}_{\theta_2} \right],$$

[0021] 式中各符号的含义如下:

[0022]  $\mathbb{P}$ : 表示事件发生的概率;

[0023]  $\Theta_{\theta_1, i, l}$ : 用户1在经过*l*次传输后成功解码信号 $s_i$ 的事件;

[0024]  $\bar{\Theta}_{\theta_1, i}$ : 并集 $\bigcup_{l=1}^K \Theta_{\theta_1, i, l}$ 的补集, 即用户1在*k*次传输后依然无法解码信息 $s_i$ ;

[0025]  $\Theta_{\theta_2, k}$ : 经过*k*次传输后, 用户2成功解码自身消息的事件;

[0026]  $\bar{\Theta}_{\theta_2}$ : 并集 $\bigcup_{k=1}^K \Theta_{\theta_2, k}$ 的补集, 也即用户2在经过*K*次传输后, 无法恢复自身信息。

[0027] S4、利用随机几何进行中断概率的精确计算

[0028] 为了推导步骤S2中的概率 $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \Theta_{\theta_1, 2}, \Theta_{\theta_2, k} \right]$ 、 $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \Theta_{\theta_2, k} \right]$ 、

$\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{\theta_2} \right]$ 、 $\mathbb{P} \left[ \Theta_{\theta_1, 1, k}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \bar{\Theta}_{\theta_2} \right]$ 和 $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \bar{\Theta}_{\theta_2} \right]$ , 这里从信息论角度通过香农定理进行理论分析。此外, 通过二维齐次泊松点过程 (HPPP) 来准确模拟干扰D2D用户的分布, 再利用随机几何中的相关理论来推导这些概率的具体表达式, 如下:

$$[0029] \quad \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \Theta_{\theta_1, 2, l}, \Theta_{\theta_2, k} \right] = \left[ \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^{k-l} \sum_{\tau_3=0}^{K-k} \sum_{\tau_4=0}^{k-1} (-1)^{\tau_1} c_{l-1}^{\tau_1} c_{k-l}^{\tau_2} c_{K-k}^{\tau_3} c_{k-1}^{\tau_4} \times \left[ \Psi \left( \mathbf{U}_a, \boldsymbol{\tau}_a; \frac{2^{R_2} - 1}{(1 - 2^{R_2} \beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_4 + 1 \right) - \Psi \left( \mathbf{U}_a, \boldsymbol{\tau}_b; \frac{2^{R_2} - 1}{(1 - 2^{R_2} \beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_4 + 1 \right) \right] \right]^+$$

$$[0030] \quad \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\theta_1, 1}, \bar{\Theta}_{\theta_1, 2}, \Theta_{\theta_2, k} \right] = \sum_{\tau_1=0}^{K-k} \sum_{\tau_2=0}^k \sum_{\tau_3=0}^{k-1} (-1)^{\tau_1} c_{K-k}^{\tau_1} c_k^{\tau_2} c_{k-1}^{\tau_3} \times \Psi \left( \left( \frac{2^{R_1} - 1}{\ell(d_1)}, \frac{2^{R_2} - 1}{(1 - 2^{R_2} \beta^2)^{\ell(d_1)}} \right), (\tau_1, \tau_2); \frac{2^{R_2} - 1}{(1 - 2^{R_2} \beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_3 + 1 \right),$$



[0031]

$$\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2,l}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] = \left[ \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^{K-l} \sum_{\tau_3=0}^K (-1)^{\sum_{j=1}^3 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_{K-l}^{\tau_2} C_K^{\tau_3} \times \left[ \Psi \left( \mathbf{U}_b, \boldsymbol{\tau}_c; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_3 \right) - \Psi \left( \mathbf{U}_b, \boldsymbol{\tau}_d; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_3 \right) \right] \right]^*$$

[0032]

$$\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] = \sum_{\tau_1=0}^K \sum_{\tau_2=0}^K (-1)^{\sum_{j=1}^2 \tau_j} C_K^{\tau_1} C_K^{\tau_2} \Psi \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \tau_1; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \tau_2 \right),$$

$$\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1,k}, \bar{\Theta}_{o_1,2,l}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] = \left\{ \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^{l-K-l} \sum_{\tau_3=0}^K (-1)^{\sum_{j=1}^3 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_l^{\tau_2} C_{K-l}^{\tau_3} \times \left[ \Psi \left( \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \max \left\{ \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^{2\ell(d_1)}} \right\} \right), (\tau_1, 1); \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \frac{2^{R_2}-1}{\ell(D)+\ell(d_2)} \right), (\tau_2, \tau_3) \right) \right] \right\}, \quad k=l$$

$$\left[ \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^{k-l-1} \sum_{\tau_3=0}^k \sum_{\tau_4=0}^{K-k} (-1)^{\sum_{j=1}^4 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_{k-l-1}^{\tau_2} C_k^{\tau_3} C_{K-k}^{\tau_4} \right]^* \times \left( \Psi \left( \mathbf{U}_d, \boldsymbol{\tau}_f; \mathbf{U}_e, \boldsymbol{\tau}_g \right) - \Psi \left( \mathbf{U}_d, \boldsymbol{\tau}_g; \mathbf{U}_e, \boldsymbol{\tau}_e \right) \right), \quad k>l$$

[0034] 式中各符号的含义如下：

[0035]  $\tau_a = (\tau_1+1, \tau_2, \tau_3)$ ,  $\tau_b = (\tau_1, \tau_2+1, \tau_3)$ ,  $\tau_c = (\tau_1+1, \tau_2)$ ,  $\tau_d = (\tau_1, \tau_2+1)$ ,  $\tau_e = (\tau_3, \tau_4)$ ,  $\tau_f = (\tau_1+1, \tau_2+1)$ ,  $\tau_g = (\tau_1, \tau_2+2)$ ,

[0036]

$$\mathbf{U}_a = \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^{2\ell(d_1)}}, \frac{2^{R_1}-1}{\ell(d_1)} \right), \quad \mathbf{U}_b = \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^{2\ell(d_1)}} \right),$$

[0037]  $\mathbf{U}_c = \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_2)}}, \frac{2^{R_2}-1}{\ell(D)+\ell(d_2)} \right), \quad \mathbf{U}_d = \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^{\ell(d_1)}}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^{2\ell(d_1)}} \right),$

[0038] 函数  $\Psi(U, \boldsymbol{\tau}; U, \boldsymbol{\tau})$  定义为  $\Psi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}) = e^{-\frac{\sigma^2}{P}(\mathbf{U}\boldsymbol{\tau}^T + \mathbf{U}\boldsymbol{\tau}^T) - \lambda \varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})}$ , 这里  $\mathbf{U} = (U_1, \dots, U_N)$ ,

$\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_N)$ ,  $\mathbf{U} = (\hat{U}_1, \dots, \hat{U}_M)$ ,  $\boldsymbol{\tau} = (\hat{\tau}_1, \dots, \hat{\tau}_M)$ ,  $\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})$  可以表示成二重积分形式

$$\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}) = \int_{\mathbb{R}_+^2} \left[ 1 - \prod_{n=1}^N \frac{1}{(1 + U_n \ell(\|u\|))^{\tau_n}} \prod_{m=1}^M \frac{1}{(1 + \hat{U}_m \ell(\|u + o_1 - o_2\|))^{\hat{\tau}_m}} \right] du \circ$$

[0039] S5、短距通信的前提假设下中断概率近似计算

[0040] 如步骤S4中所述,所有的概率计算最后都需要计算对应的 $\Psi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})$ 函数,然而在计算过程涉及到计算复杂度很高的二重积分 $\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})$ ,为了降低计算复杂度同时便于后期的优化设计,提供一种近似计算方法非常有必要。考虑到D2D用户之间的距离D一般比较近,且由于协作通信的缘故,这种假设是非常合理的。令 $D \approx 0$ ,二重积分 $\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})$ 可以近似为

$$\begin{aligned}
 & \varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \hat{\mathbf{U}}, \hat{\boldsymbol{\tau}}) \approx \varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{0}, \mathbf{0}) \\
 [0041] \quad & = \pi B \left( 1 - \frac{2}{\alpha}, \sum_{i=1}^{N+M} \tilde{\tau}_i + 1 \right) \mathcal{K}_{\frac{2}{\alpha}}^{\frac{2}{\alpha}} \tilde{U}_\mu^{\frac{2}{\alpha}-1} \sum_{k=1}^{N+M} \tilde{\tau}_k \tilde{U}_k \\
 & \times F_D^{(N+M-1)} \left( 1 - \frac{2}{\alpha}, (\tilde{\tau}_i + \delta_{i-k})_{i=1, i+k}^{N+M}; \sum_{i=1}^{N+M} \tilde{\tau}_i + 1; \left( 1 - \frac{\tilde{U}_i}{\tilde{U}_\mu} \right)_{i=1, i \neq \mu}^{N+M} \right),
 \end{aligned}$$

[0042] 其中,  $\mathbf{U} = (\mathbf{U}, \mathbf{U}) = (\tilde{U}_1, \dots, \tilde{U}_{N+M})$ ,  $\boldsymbol{\tau} = (\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\tau}) = (\tilde{\tau}_1, \dots, \tilde{\tau}_{N+M})$ ,  $\delta_s$ 定义狄利克雷函数,  $F_D^{(N)}(\mathbf{a}; \mathbf{b}; \mathbf{x})$ 定义第四类Lauricella函数,  $B(a, b)$ 定义Beta函数。如果 $N+M=1$ ,则上述近似将变为等式。上述近似的结果不但计算复杂度低,而且在数值分析中展现出非常好的近似性能。

[0043] S6、频谱效率最大化,通过合理选择用户的信息传输速率 $R_1$ 和 $R_2$ 来最大化吞吐量 $\eta$ 同时保证服务的可靠性,优化问题的数学形式表示成

$$[0044] \quad \underset{R_1, R_2}{\text{maximize}} \quad \eta$$

$$[0045] \quad \text{subject to} \quad \mathcal{O}_{K, \alpha_i} \leq \varepsilon_i, i = 1, 2$$

$$[0046] \quad 0 \leq \beta^2 < 2^{-R_2},$$

[0047] 式中各符号的含义如下:

[0048]  $\varepsilon_i$ :表示D2D用户 $i$ 的最大允许中断概率,

[0049]  $\mathcal{O}_{K, \alpha_i}$ :表示用户 $i$ 在第 $K$ 次传输之后发生中断的概率,

[0050]  $\beta^2$ :表示预设的功率分配因子,

[0051] 上述优化问题可以利用内点法进行优化求解。此外,为了进一步优化D2D用户的分布密度,可以通过最大化空间频谱利用率 $\Delta$ 同时保证服务质量,因此优化问题的数学形式如下

$$[0052] \quad \underset{R_1, R_2, \lambda}{\text{maximize}} \quad \Delta$$

$$[0053] \quad \text{subject to} \quad \mathcal{O}_{K, \alpha_i} \leq \varepsilon_i, i = 1, 2$$

$$[0054] \quad 0 \leq \beta^2 < 2^{-R_2},$$

$$[0055] \quad \lambda > 0,$$

[0056] 式中各符号含义如下:

[0057]  $\lambda$ :表示干扰用户的分布密度,

[0058]  $\varepsilon_i$ :表示D2D用户 $i$ 的最大允许中断概率,

[0059]  $\mathcal{O}_{K, \alpha_i}$ :表示用户 $i$ 在第 $K$ 次传输之后发生中断的概率,

[0060]  $\beta^2$ :表示预设的功率分配因子。

[0061] S7、调制方式和编码方案的设置以及无线资源配置

[0062] 利用优化得到的传输速率 $R_1^*$ 和 $R_2^*$ 以及D2D用户分布密度 $\lambda^*$ 值来配置无线资源,具体如下:通过优化的传输速率 $R_1^*$ 和 $R_2^*$ 在发送端设置合理的调制方式和编码方案;通过最优的 $\lambda^*$ 指导无线资源分配,并结果频谱资源进行频谱复用率配置。

[0063] 本发明相对于现有技术具有如下的优点及效果:

[0064] 仿真和数值结果显示,本发明所提供的协作方式应用方案比非协作方式在中断概率上降低了23%,此外,应用非正交多址接入技术比应用正交多址接入技术在频谱效率上提高了17%。在大规模D2D网络应用时,本发明为D2D终端调制方式和编码方案的设置以及整个网络的资源配置提供了非常有意义的应用指导和参考价值。

## 附图说明

[0065] 图1是本发明公开的通信方法的应用模型;

[0066] 图2是本发明公开的基于HARQ辅助NOMA的大规模D2D通信方法的实施步骤流程图。

## 具体实施方式

[0067] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0068] 实施例

[0069] 非正交多址接入技术(NOMA)是下一代移动通信的重要技术,例如,采用NOMA的多用户叠加传输作为LTE-A的下行链路的一项传输技术已经向3GPP组织作了提案。在这些场景下,一些D2D用户可以充当中继协助基站转发消息,以此来扩大无线网络的覆盖范围。此外,为了缓解来至于基站的严重干扰,我们假设D2D网络工作在overlay模式,在这种模式下D2D网络使用专用频谱资源进行通信。在D2D网络中,所有的D2D设备的位置随机分布,这里采用一种被广泛采用的建模方式,即假设所有占用相同时频资源的D2D发送设备服从齐次泊松点过程 $\Phi \in \mathbb{R}^2$  (HPPP),其强度定义为 $\lambda$ 。所有D2D设备都装备了积压缓冲区,并通过专用于D2D通信的共享频率信道进行传输。不失一般性,本实施例专注于一个发送设备与其相邻的两个D2D用户通过结合NOMA和协作式HARQ进行通信,如图1所示。这里假设只有两个D2D接收终端是基于以下考虑:限制多用户之间的干扰水平,降低硬件成本和满足低时延处理,这种假设也在研究和实际应用中广泛采用。

[0070] 设 $z$ 是发送设备的位置,并定义发送设备与用户 $i$ (在位置 $o_i$ 的用户)之间的距离为 $d_i = \|z - o_i\|$ 表示,其中 $i \in \{1, 2\}$ 。假设用户1的位置为 $o_1 = (0, 0)$ 和用户2的位置为 $o_2 = (D, 0)$ ,由于PPP的平稳性,这样假设并不会影响分析的结果。与传统时分多址接入(TDMA)不同的是,NOMA的核心思想是利用了衰落信道之间的差异,因此为了不失一般性,这里规定用户1比用户2更接近发送设备,即 $d_1 < d_2$ 。注意到HARQ可以有效抵抗信道的不确定性和测量误差从而实现可靠传输,因此所提出的结合协作HARQ的NOMA方案不需要知道完美的瞬时信道状态信息。鉴于此,NOMA用户信息解码顺序是依据它们的平均衰落增益(路径损耗)的大小。需要指出的是与小尺度衰落相比,平均信道增益/路径损耗在短时间内一般不会发生快速或

剧烈的变化,因此不需要频繁的信道测量和瞬时信噪比报告。考虑到传输距离决定了平均衰落增益/路径损耗,所以两个NOMA用户解码顺序是依据它们距离发送设备之间的距离决定。为了便于说明,所提出的方案在应用过程中可以分为两个阶段。在第一阶段,发送设备采用叠加编码对将要发送给用户1和2的信号 $s_1$ 和 $s_2$ 进行功率域复用。根据接收到的叠加编码信息,距离发送设备较近的用户1首先解码用户2的信息 $s_2$ (这是因为更多的发送功率分配给了用户2的信息,因此传输 $s_2$ 信息的信噪比往往较大,因此成功解码 $s_2$ 的可能性更大),而用户2的信息 $s_2$ 实际对用户1的信息 $s_1$ 形成一种干扰,因此在后文中称这类干扰为NOMA干扰。一旦 $s_2$ 被成功解码,用户1可以利用干扰消除技术在当前和随后传输中先消除干扰信号 $s_2$ ,进而解码自身信息 $s_1$ 。而与用户1不同的是,较远的用户2则直接将信号 $s_1$ 看成噪声并直接解码 $s_2$ 。重复发送叠加消息直至用户1或2确认成功接收或达到重传最大次数 $K$ 为止。如果只有任意一个用户确认信息接收成功,则第二阶段开始,其中发送设备只发送未成功接收的用户信号。此外需要强调的是,当用户1是确认成功解码信息,则它将协助发送设备作为中继设备将信号 $s_2$ 转发至用户2。而当用户1和2都确认成功接收信息时,发送设备将从发送队列中取出下一组信息通过相同的上述操作进行发送。如果达到最大传输次数 $K$ 并且没有成功解码预期信息,发送端则从发送队列中删除该组信号,并宣告信息传输发生中断。为了简单起见,假设反馈信道是无错误的和无延迟的,这可以通过低传输速率和短的确切消息来证明。

#### [0071] A. 信号传输模型

[0072] 假设信道服从瑞利块衰落(即每轮HARQ传输期间信道冲激响应系数保持不变),且在发送设备上拥有信道状态信息的统计知识。此外,还假设每次传输过程信道增益是相互独立同分布的随机变量,干扰源的位置在较短得时间间隔内不会发生剧烈变化,特别是针对中低速移动性的干扰源这种假设非常合理。因此,这里采用静态干扰源模型,即近似认为干扰源位置在HARQ传输过程中固定的,这种近似是非常合理的,这是因为HARQ在实际应用中最大传输次数是有限的,例如,最大传输次数通常选择5次,每轮HARQ的时间间隔约为8ms。在不同的传输阶段,NOMA用户接收到的信号可以表示如下形式。

[0073] 1) 阶段I: 在第 $k$ 轮HARQ传输中,用户 $i$ 接收的信号可以表示成

$$[0074] \quad \mathbf{y}_{i,k} = \sqrt{\ell(d_i)} P h_{z_0,i,k} (\beta \mathbf{s}_1 + \sqrt{1-\beta^2} \mathbf{s}_2) + \sum_{x \in \Phi \setminus \{z\}} \sqrt{\ell(\|x - o_i\|)} P h_{x_0,i,k} \mathbf{s}_{x,k} + \mathbf{n}_{i,k}, \quad (1)$$

[0075] 其中 $P$ 表示发射功率, $\beta$ 表示功率分配系数, $s_i$ 是发送给用户 $i$ 的信息且服从单位方差的高斯分布。 $s_i$ 在发送设备端首先进行独立编码和调制,然后通过功率域复用,以固定传输速率 $R_i = \frac{b_i}{L}$ 给用户 $i$ 传输信息,其中 $b_i$ 是信号 $s_i$ 中包含的信息比特数量, $L$ 定义信号 $s_i$ 所包含的符号数目, $s_{x,k}$ 表示来至于干扰源第 $k$ 次传输的信号,并且服从单位方差的高斯分布, $\ell(d) = K d^{-\alpha}$ 代表路径损耗, $\alpha$ 表示路径损耗指数,其中 $K$ 表示单位距离参考的路径损耗,其数值大小取决于载波频率和天线特性, $x \in \Phi \setminus \{z\}$ 表示干扰源集合, $\mathbf{n}_{i,k}$ 表示零均值和方差为 $\sigma^2$ 的复加性高斯白噪声(AWGN),即 $\mathbf{n}_{i,k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ , $h_{x_0,i,k}$ 表示在第 $k$ 轮HARQ传输过程中从干扰设备 $x$ 到用户 $i$ 的信道系数; $h_{z_0,i,k}$ 和 $h_{x_0,i,k}$ 均服从复高斯分布,且均值为零和方差为1,即 $h_{z_0,i,k}, h_{x_0,i,k} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 。

[0076] 根据NOMA传输协议,当接收叠加编码信号之后,无论用户1还是用户2都首先解码用户2的信息,其信干噪比为

$$[0077] \quad \gamma_{o_i,k,2}^{(i)} = \frac{(1-\beta^2)P|h_{zo_i,k}|^2 \ell(d_i)}{\beta^2 P|h_{zo_i,k}|^2 \ell(d_i) + I_{i,k} + \sigma^2}, i \in \{1,2\}, \quad (2)$$

[0078] 其中 $I_{i,k}$ 表示用户 $i$ 所接收到来至于干扰源集合 $\Phi \setminus \{z\}$ 的总干扰,其数学形式可以表达成

$$[0079] \quad I_{i,k} = P \sum_{x \in \Phi \setminus \{z\}} \ell(\|x - o_i\|) |h_{xo_i,k}|^2. \quad (3)$$

[0080] 当用户1成功解码用户2消息 $s_2$ ,用户1将采用干扰消除技术来恢复自身信号 $s_1$ ,消除了用户2的NOMA干扰信号后,所得到针对 $s_1$ 的信干噪比为

$$[0081] \quad \gamma_{o_1,k,1}^{(i)} = \frac{\beta^2 P|h_{zo_1,k}|^2 \ell(d_1)}{I_{1,k} + \sigma^2}. \quad (4)$$

[0082] 2) 阶段II:根据所提出的方案,如果 $s_2$ 在第 $k$ 轮HARQ传输之前被成功解码,则用户1在第 $k$ 次HARQ中接收信号可以表示成

$$[0083] \quad \mathbf{y}_{1,k} = \sqrt{\ell(d_1)} P h_{zo_1,k} \mathbf{s}_1 + \sum_{x \in \Phi \setminus \{z\}} \sqrt{\ell(\|x - o_i\|)} P h_{xo_1,k} \mathbf{s}_{x,k} + \mathbf{n}_{1,k}. \quad (5)$$

[0084]  $s_1$ 所对应的信干噪比为

$$[0085] \quad \gamma_{o_1,k,1}^{(ii)} = \frac{P|h_{zo_1,k}|^2 \ell(d_1)}{I_{1,k} + \sigma^2}. \quad (6)$$

[0086] 相反,如果 $s_1$ 在第 $k$ 轮HARQ传输之前被成功解码,那么在进行第 $k$ 轮HARQ传输中,用户1将协助发送设备作为中继转发用户2的信息,用户2接收到的信号则表达成

$$[0087] \quad \mathbf{y}_{2,k} = \sqrt{\ell(D)} P h_{o_1o_2,k} \mathbf{s}_2 + \sqrt{\ell(d_2)} P h_{zo_2,k} \mathbf{s}_2 + \sum_{x \in \Phi \setminus \{z\}} \sqrt{\ell(\|x - o_2\|)} P h_{xo_2,k} \mathbf{s}_{x,k} + \mathbf{n}_{2,k}. \quad (7)$$

[0088] 其中, $h_{o_1o_2,k}$ 表示第 $k$ 传输中两个用户之间的信道系数。与(6)类似,用户2的接收信干噪比为

$$[0089] \quad \gamma_{o_2,k,2}^{(ii)} = \frac{P|\sqrt{\ell(D)}h_{o_1o_2,k} + \sqrt{\ell(d_2)}h_{zo_2,k}|^2}{I_{2,k} + \sigma^2} = \frac{P|h_{eq,k}|^2 (\ell(D) + \ell(d_2))}{I_{2,k} + \sigma^2}, \quad (8)$$

[0090] 其中, $h_{eq,k} \triangleq \sqrt{\frac{\ell(D)}{\ell(D) + \ell(d_2)}} h_{o_1o_2,k} + \sqrt{\frac{\ell(d_2)}{\ell(D) + \ell(d_2)}} h_{zo_2,k}$ 表示第 $k$ 次传输的等效信道系数,并服从零均值和单位方差的复高斯分布,即 $h_{eq,k} \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 和 $\ell(D) + \ell(d_2)$ 代表等效路径损耗。

[0091] 基于这些信号传输模型,接下来进行具体的频谱效率(吞吐量和空间频谱效率)分析和中断概率分析。

[0092] B. 平均吞吐量和中断概率分析

[0093] 长期平均吞吐量(LTAT)是一种常用的评估HARQ系统吞吐量的性能指标。为了方便

起见,这里定义 $t$ 为所用的时隙数目, $b_{o_i}(t)$ 为发送给用户 $i$ 并累计到时间 $t$ 的总信息比特数,因此LTAT可以表示成

$$[0094] \quad \eta = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{b_{o_1}(t) + b_{o_2}(t)}{tL} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{R_{o_1}(t) + R_{o_2}(t)}{t}, \quad (9)$$

[0095] 其中 $R_{o_i}(t) \triangleq b_{o_i}(t)/L$ 表示由用户 $i$ 在单位带宽单位时间内成功解码的信息比特。用户 $i$ 停止当前消息传输的事件被视为复发事件。这个复发事件的发生伴随针对两个用户所获得的随机报酬 $\mathcal{R}_{o_1}$ 和 $\mathcal{R}_{o_2}$ 。因此,利用更新报酬定理,所提出方案的LTAT可以进一步写成

$$[0096] \quad \eta = \frac{\mathbb{E}(\mathcal{R}_{o_1}) + \mathbb{E}(\mathcal{R}_{o_2})}{\mathbb{E}(\mathcal{T})}, \quad (10)$$

[0097] 其中 $\mathcal{T}$ 表示两个连续重发事件之间的随机传输数(更新间隔时间)。因此,如果用户 $i$ 成功恢复其自身消息,则 $\mathcal{R}_{o_i} = R_i \text{ bps/HZ}$ ,否则 $\mathcal{R}_{o_i} = 0 \text{ bps/Hz}$ ,于是有

$$[0098] \quad \mathbb{E}(\mathcal{R}_{o_i}) = 0 \times \mathcal{O}_{K,o_i} + R_i(1 - \mathcal{O}_{K,o_i}) = R_i(1 - \mathcal{O}_{K,o_i}), \quad (11)$$

[0099]  $\mathcal{O}_{K,o_i}$ 表示用户 $i$ 经过 $k$ 轮HARQ传输后的中断概率。此外, $\mathcal{T}$ 是一个离散随机变量,其样本空间为 $\{1, 2, \dots, K\}$ 并服从概率分布为

$$[0100] \quad \mathbb{P}[\mathcal{T} = \kappa] = \begin{cases} \mathcal{O}_{\kappa-1,o_1|o_2} - \mathcal{O}_{\kappa,o_1|o_2}, & \kappa < K \\ \mathcal{O}_{K-1,o_1|o_2}, & \kappa = K \end{cases}, \quad (12)$$

[0101] 其中, $\mathcal{O}_{\kappa,o_1|o_2}$ 表示用户1或用户2在 $\kappa$ 次传输之后依然发生中断的概率,利用容斥原理,可以得到

$$[0102] \quad \mathcal{O}_{\kappa,o_1|o_2} = \mathcal{O}_{\kappa,o_1} + \mathcal{O}_{\kappa,o_2} - \mathcal{O}_{\kappa,o_1,o_2}, \quad (13)$$

[0103] 其中 $\mathcal{O}_{\kappa,o_1,o_2}$ 表示两个用户在 $\kappa$ 轮HARQ传输后无法解码自身信息的概率。因此,通过使用(12)和(13)来可以推导出 $\mathbb{E}(\mathcal{T})$ 为

$$[0104] \quad \mathbb{E}(\mathcal{T}) = \sum_{\kappa=1}^K \kappa \mathbb{P}[\mathcal{T} = \kappa] = 1 + \sum_{\kappa=1}^{K-1} (\mathcal{O}_{\kappa,o_1} + \mathcal{O}_{\kappa,o_2} - \mathcal{O}_{\kappa,o_1,o_2}), \quad (14)$$

[0105] 因此,将(11)和(14)代入到(10)中得到

$$[0106] \quad \eta = \frac{R_1(1 - \mathcal{O}_{K,o_1}) + R_2(1 - \mathcal{O}_{K,o_2})}{1 + \sum_{\kappa=1}^{K-1} (\mathcal{O}_{\kappa,o_1} + \mathcal{O}_{\kappa,o_2} - \mathcal{O}_{\kappa,o_1,o_2})}, \quad (15)$$

[0107] 因此LTAT被表示成了中断概率的函数,由此可见,中断概率是最基本的性能指标。然而,应当指出的是,中断概率的表达式取决于具体所提出的应用方案。因此,协作HARQ结合NOMA方案确定了中断概率 $\mathcal{O}_{K,o_1}$ 、 $\mathcal{O}_{K,o_2}$ 和 $\mathcal{O}_{K,o_1,o_2}$ 的显式表达式。为了继续分析,它们的表达式分别推导如下:

[0108] B.1 中断概率 $\mathcal{O}_{K,o_1}$

[0109] 根据前述系统模型, $s_1$ 的解码性能取决于用户1成功解码和消除NOMA干扰 $s_2$ 所消耗的传输次数以及由于协作通信,其性能也取决于用户2成功解码所经历的传输次数。为了便

于后续分析,定义以下事件:

[0110]  $\Theta_{\sigma_1,j,l}$ :用户1在经过1次传输后成功解码信号 $s_i$ 的事件;

[0111]  $\bar{\Theta}_{\sigma_1,l}$ :并集 $\bigcup_{l=1}^K \Theta_{\sigma_1,l}$ 的补集,即用户1在K次传输后依然无法解码信息 $s_i$ ;

[0112]  $\Theta_{\sigma_2,k}$ :经过k次传输后,用户2成功解码自身消息的事件;

[0113]  $\bar{\Theta}_{\sigma_2}$ :并集 $\bigcup_{k=1}^K \Theta_{\sigma_2,k}$ 的补集,也即用户2在经过K次传输后,无法恢复自身信息。

[0114] 基于上述定义,用户1的中断概率 $\Theta_{K,\sigma_1}$ 可以利用全概率公式得到

$$\begin{aligned} \Theta_{K,\sigma_1} &= \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}] = \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \Omega, \Omega] \\ [0115] \quad &= \mathbb{P}\left[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \left(\bigcup_{l=1}^K \Theta_{\sigma_1,2,l}\right) \cup \bar{\Theta}_{\sigma_1,2}, \left(\bigcup_{k=1}^K \Theta_{\sigma_2,k}\right) \cup \bar{\Theta}_{\sigma_2}\right]. \end{aligned} \quad (16)$$

[0116] 考虑到 $\Theta_{\sigma_1,2,1}, \dots, \Theta_{\sigma_1,2,K}$ 和 $\bar{\Theta}_{\sigma_1,2}$ 是互斥事件,类似地, $\Theta_{\sigma_2,1}, \dots, \Theta_{\sigma_2,K}$ 与 $\bar{\Theta}_{\sigma_2}$ 也是互斥事件。另外,如果 $l > k$ , $\Theta_{\sigma_1,2,l}$ 与 $\Theta_{\sigma_2,k}$ 也是互斥事件,因为发送设备在收到用户2反馈的ACK信号之后只发送 $s_1$ ,此后传输过程中用户1不再需要使用干扰消除技术。因此, $\Theta_{K,\sigma_1}$ 可以表示成

$$\begin{aligned} \Theta_{K,\sigma_1} &= \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^k \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \Theta_{\sigma_2,k}] + \sum_{k=1}^K \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \bar{\Theta}_{\sigma_1,2}, \Theta_{\sigma_2,k}] \\ [0117] \quad &+ \sum_{l=1}^K \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}] + \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \bar{\Theta}_{\sigma_1,2}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}]. \end{aligned} \quad (17)$$

[0118] 下面将逐个推导(17)式等号右侧的所有项,如下:

[0119] 1)  $\mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \Theta_{\sigma_2,k}]$ :从信息论的角度分析,当互信息量小于传输速率时,就会发生中断事件。这里 $\mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \Theta_{\sigma_2,k}]$ 表示用户1在给定用户1通过1次传输之后成功解码 $s_2$ 并利用SIC消除NOMA干扰,且用户2解码 $s_2$ 消耗了k个HARQ回合的中断概率。考虑到这种情况下必须满足条件 $1 \leq k$ ,根据前面的信号模型, $\mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \Theta_{\sigma_2,k}]$ 可以表示成

[0120]

$$\mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \Theta_{\sigma_2,k}] = \mathbb{P}\left[\begin{array}{l} \bigcap_{j=1}^l \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_1,j,1}) < R_1, \bigcap_{j=k+1}^K \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_1,j,1}) < R_1, \bigcap_{j=1}^{k-1} \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_1,j,2}) < R_2, \\ \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_1,l,2}) \geq R_2, \bigcap_{j=1}^{k-1} \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_2,j,2}) < R_2, \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_2,k,2}) \geq R_2 \end{array}\right], \quad (18)$$

[0121] 其中, $\mathcal{I}(\gamma) = \log_2(1+\gamma)$ 表示给定信干噪比 $\gamma$ 条件下的信息量。利用随机几何,(18)可以写成如下闭合形式

[0122]

$$\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2,k} \right] = \left[ \sum_{\tau_1=0}^{I-1} \sum_{\tau_2=0}^{k-l} \sum_{\tau_3=0}^{K-k} \sum_{\tau_4=0}^{k-1} (-1)^{\sum_{j=1}^4 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_{k-l}^{\tau_2} C_{K-k}^{\tau_3} C_{k-1}^{\tau_4} \times \left[ \Psi \left( \mathbf{U}_a, \boldsymbol{\tau}_a; \frac{2^{R_1}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)\ell(d_1)}, \tau_4+1 \right) - \Psi \left( \mathbf{U}_a, \boldsymbol{\tau}_b; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)\ell(d_2)}, \tau_4+1 \right) \right] \right] \quad (19)$$

[0123] 其中,  $\mathbf{U}_a = \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)\ell(d_1)}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^2\ell(d_1)}, \frac{2^{R_1}-1}{\ell(d_1)} \right)$ ,  $\boldsymbol{\tau}_a = (\tau_1+1, \tau_2, \tau_3)$  和  $\boldsymbol{\tau}_b = (\tau_1, \tau_2+1, \tau_3)$ , 这里必须指出用户1为了能够消除NOMA干扰 $s_2$ 必须要满足条件 $1-2^{R_2}\beta^2 > 0$ 。此外,  $\Psi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}, \hat{\mathbf{U}}, \hat{\boldsymbol{\tau}})$  函数定义如下

$$[0124] \quad \Psi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}) = e^{-\frac{\sigma^2}{P}(\mathbf{U}\boldsymbol{\tau}^T + \mathbf{U}\boldsymbol{\tau}^T) - 2\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})} \quad (20)$$

[0125] 其中  $\mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_N)$ ,  $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_N)$ ,  $\hat{\mathbf{U}} = (\hat{U}_1, \dots, \hat{U}_M)$ ,  $\hat{\boldsymbol{\tau}} = (\hat{\tau}_1, \dots, \hat{\tau}_M)$  和

$$[0126] \quad \varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}) = \int_{\mathbb{R}^2} \left[ 1 - \prod_{n=1}^N \frac{1}{(1+U_n \ell(\|u\|))^{\tau_n}} \prod_{n=1}^M \frac{1}{(1+\hat{U}_n \ell(\|u+o_1-o_2\|))^{\hat{\tau}_n}} \right] du. \quad (21)$$

[0127] 2)  $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2,k} \right]$ : 一旦用户2在 $k$ 个HARQ回合后成功解码 $s_2$ , 发送设备将在随后的重传中只传送 $s_1$ , 用户2在解码时并不需要借助干扰消除技术而进行直接解码。因此,  $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2,k} \right]$  可以表示成

$$[0128] \quad \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2,k} \right] = \mathbb{P} \left[ \begin{array}{l} \bigcap_{j=k+1}^K \mathcal{I}(\gamma_{o_1,j,1}^{(j)}) < R_1, \bigcap_{j=1}^k \mathcal{I}(\gamma_{o_1,j,2}^{(j)}) < R_2, \\ \bigcap_{j=1}^{k-1} \mathcal{I}(\gamma_{o_2,j,2}^{(j)}) < R_2, \mathcal{I}(\gamma_{o_2,k,2}^{(k)}) \geq R_2. \end{array} \right] \quad (22)$$

[0129] 同样地, (22) 可以推导成

$$[0130] \quad \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2,k} \right] = \sum_{\tau_1=0}^{K-k} \sum_{\tau_2=0}^k \sum_{\tau_3=0}^{k-1} (-1)^{\sum_{j=1}^3 \tau_j} C_{K-k}^{\tau_1} C_k^{\tau_2} C_{k-1}^{\tau_3} \times \left[ \Psi \left( \left( \frac{2^{R_1}-1}{\ell(d_1)}, \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)\ell(d_1)} \right), (\tau_1, \tau_2); \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)\ell(d_2)}, \tau_3+1 \right) \right] \quad (23)$$

[0131] 3)  $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2,l}, \bar{\Theta}_{o_2} \right]$ : 经过1轮HARQ传输后, 用户1成功解码 $s_2$ , 这意味着用户1在当前和随后的HARQ回合中可以完全消除NOMA干扰来解码 $s_1$ , 这种方式可以有效改善中断概率。因此,  $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2,l}, \bar{\Theta}_{o_2} \right]$  可以写成



$$[0132] \quad \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \Theta_{o_1,2,l}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] = \mathbb{P} \left[ \begin{array}{l} \bigcap_{j=l}^K \mathcal{I}(\gamma_{o_1,j,1}) < R_1, \bigcap_{j=1}^l \mathcal{I}(\gamma_{o_1,j,2}) < R_2, \\ \mathcal{I}(\gamma_{o_1,l,2}) \geq R_2, \bigcap_{j=1}^l \mathcal{I}(\gamma_{o_1,j,2}) < R_2 \end{array} \right] \quad (24)$$

[0133] 同样,由(24)也可以得到

$$[0134] \quad \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \Theta_{o_1,2,l}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] = \left[ \begin{array}{l} \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^{K-l} \sum_{\tau_3=0}^K (-1)^{\sum_{j=1}^3 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_{K-l}^{\tau_2} C_K^{\tau_3} \times \\ \left( \Psi \left( \mathbf{U}_b, \boldsymbol{\tau}_c; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^\ell(d_2)}, \tau_3 \right) - \Psi \left( \mathbf{U}_b, \boldsymbol{\tau}_d; \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^\ell(d_2)}, \tau_3 \right) \right) \end{array} \right]^* \quad (25)$$

[0135] 其中 $\tau_c = (\tau_1+1, \tau_2)$ ,  $\tau_d = (\tau_1, \tau_2+1)$  和 $\mathbf{U}_b = \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^\ell(d_1)}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^{2\ell}(d_1)} \right)$ 。

[0136] 4)  $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2} \right]$ :经过K次传输后,如果用户1不能够消除NOMA干扰且用户2亦无法解码自身信息,则用户1必然发生中断,中断概率可以写成

$$[0137] \quad \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] = \mathbb{P} \left[ \bigcap_{j=1}^K \mathcal{I}(\gamma_{o_1,j,2}) < R_2, \bigcap_{j=1}^K \mathcal{I}(\gamma_{o_2,j,2}) < R_2 \right] \quad (26)$$

[0138] 因此, $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2} \right]$ 可以最终推导为

$$[0139] \quad \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] = \sum_{\tau_1=0}^K \sum_{\tau_2=0}^K (-1)^{\sum_{j=1}^2 \tau_j} C_K^{\tau_1} C_K^{\tau_2} \Psi \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^\ell(d_1)}, \tau_1; \frac{2^{R_1}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^\ell(d_2)}, \tau_2 \right) \quad (27)$$

[0140] B.2中断概率 $O_{K,o2}$

[0141] 类似于(17),根据全概率公式,用户2接收信息发生中断的概率为

$$[0142] \quad O_{K,o2} = \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_2} \right] = \mathbb{P} \left[ \left( \bigcup_{k=1}^K \Theta_{o_1,1,k} \right) \bar{\Theta}_{o_1,1}, \left( \bigcup_{l=1}^K \Theta_{o_1,2,l} \right) \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] \\ = \sum_{l=1}^K \sum_{k=l}^K \mathbb{P} \left[ \Theta_{o_1,1,k}, \Theta_{o_1,2,l}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] + \sum_{l=1}^K \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \Theta_{o_1,2,l}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] + \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2} \right] \quad (28)$$

[0143] 其中,上式成立来源于当 $k < l$ 时 $\Theta_{o_1,1,k} \cap \Theta_{o_1,2,l} = \emptyset$ ,并且 $\Theta_{o_1,1,k} \cap \bar{\Theta}_{o_1,2} \cap \bar{\Theta}_{o_2} = \emptyset$ 。由于 $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \Theta_{o_1,2,l}, \bar{\Theta}_{o_2} \right]$ 和 $\mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{o_1,1}, \bar{\Theta}_{o_1,2}, \bar{\Theta}_{o_2} \right]$ 已经在前面推导出。因此,接下来将推导剩下一项 $\mathbb{P} \left[ \Theta_{o_1,1,k}, \Theta_{o_1,2,l}, \bar{\Theta}_{o_2} \right]$ 的具体表达式。

[0144] 假设用户1在第1轮HARQ成功解码 $s_2$ 并在第k轮HARQ成功解码 $s_1$ ,其中 $k \geq 1$ 。在随后的传输中由于用户1已经成功解码 $s_2$ ,用户1显然可以协助发送设备作为中继将消息传递给

用户2。在这种情况下,用户2在K轮HARQ传输后的中断概率 $\mathbb{P}[\Theta_{\sigma_1,1,k}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}]$ 需要分成两种情况进行推导。第一种情况,当 $k=1$ 时,用户1消除NOMA干扰和解码自身信息发生在同一轮HARQ传输中,并在同一轮HARQ上解码 $s_1$ 。因此, $\mathbb{P}[\Theta_{\sigma_1,1,k}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}]$ 可以推导为

$$[0145] \quad \mathbb{P}[\Theta_{\sigma_1,1,l}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}] = \mathbb{P} \left[ \begin{array}{l} \bigcap_{j=1}^l I(\gamma_{\sigma_2,j,2}^{(I)}) < R_2, \bigcap_{j=l+1}^K I(\gamma_{\sigma_2,j,2}^{(II)}) < R_2, \\ \bigcap_{j=1}^{l-1} I(\gamma_{\sigma_1,j,2}^{(I)}) < R_2, I(\gamma_{\sigma_1,l,2}^{(I)}) \geq R_2, I(\gamma_{\sigma_1,l,1}^{(I)}) \geq R_1 \end{array} \right]. \quad (29)$$

[0146] 随后应用随机几何可以得到

$$[0147] \quad \mathbb{P}[\Theta_{\sigma_1,1,l}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}] = \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^l \sum_{\tau_3=0}^{K-l} (-1)^{\sum_{j=1}^3 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_l^{\tau_2} C_{K-l}^{\tau_3} \times \Psi \left\{ \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^\ell(d_1)}, \max \left\{ \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^\ell(d_1)}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^{2\ell}(d_1)} \right\} \right), (\tau_1, 1); \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^\ell(d_2)}, \frac{2^{R_2}-1}{\ell(D)+\ell(d_2)} \right), (\tau_2, \tau_3) \right\}, \quad (30)$$

[0148] 另一方面,如果 $k>1$ ,即用户1成功消除NOMA干扰事件和解码自身信息发生在两个不同HARQ回合中,则 $\mathbb{P}[\Theta_{\sigma_1,1,k}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}]$ 可以表示为

[0149]

$$\mathbb{P}[\Theta_{\sigma_1,1,k}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}] = \mathbb{P} \left[ \begin{array}{l} \bigcap_{j=1}^k \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_2,j,2}^{(I)}) < R_2, \bigcap_{j=k+1}^K \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_2,j,2}^{(II)}) < R_2, \bigcap_{j=1}^{l-1} \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_1,j,2}^{(I)}) < R_2, \\ \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_1,l,2}^{(I)}) \geq R_2, \bigcap_{j=l}^{k-1} \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_1,j,1}^{(I)}) < R_1, \mathcal{I}(\gamma_{\sigma_1,k,1}^{(I)}) \geq R_1 \end{array} \right]. \quad (31)$$

[0150] 因此, $\mathbb{P}[\Theta_{\sigma_1,1,k}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}]$ 可以表示成

$$[0151] \quad \mathbb{P}[\Theta_{\sigma_1,1,k}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}] = \left[ \sum_{\tau_1=0}^{l-1} \sum_{\tau_2=0}^{k-l-1} \sum_{\tau_3=0}^k \sum_{\tau_4=0}^{K-k} (-1)^{\sum_{j=1}^4 \tau_j} C_{l-1}^{\tau_1} C_{k-l-1}^{\tau_2} C_k^{\tau_3} C_{K-k}^{\tau_4} \right] \times (\Psi(\mathbf{U}_d, \boldsymbol{\tau}_f; \mathbf{U}_e, \boldsymbol{\tau}_e) - \Psi(\mathbf{U}_d, \boldsymbol{\tau}_g; \mathbf{U}_e, \boldsymbol{\tau}_e)), \quad k > l, \quad (32)$$

[0152] 其中 $\tau_e = (\tau_3, \tau_4)$ ,  $\tau_f = (\tau_1+1, \tau_2+1)$ ,  $\tau_e = (\tau_3, \tau_4)$ ,  $\tau_f = (\tau_1+1, \tau_2+1)$ ,  $\tau_g = (\tau_1, \tau_2+2)$ ,

$$[0153] \quad \mathbf{U}_e = \left( \frac{2^{R_2}-1}{1-2^{R_2}\beta^{2\ell}(d_2)}, \frac{2^{R_2}-1}{\ell(D)+\ell(d_2)} \right), \quad \mathbf{U}_d = \left( \frac{2^{R_2}-1}{(1-2^{R_2}\beta^2)^\ell(d_1)}, \frac{2^{R_1}-1}{\beta^{2\ell}(d_1)} \right).$$

[0154] B.3中断概率 $\mathcal{O}_{K,\sigma_1,\sigma_2}$

[0155] 类似于(17)和(28),根据全概率公式, $\mathcal{O}_{K,\sigma_1,\sigma_2}$ 可以推导成

$$[0156] \quad \begin{aligned} \mathcal{O}_{K,\sigma_1,\sigma_2} &= \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}] = \mathbb{P} \left[ \bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \left( \bigcup_{l=1}^K \Theta_{\sigma_1,2,l} \right) \bar{\Theta}_{\sigma_1,2}, \bar{\Theta}_{\sigma_2} \right] \\ &= \sum_{l=1}^K \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \Theta_{\sigma_1,2,l}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}] + \mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\sigma_1,1}, \bar{\Theta}_{\sigma_1,2}, \bar{\Theta}_{\sigma_2}], \end{aligned} \quad (33)$$

[0157] 其中  $\mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\alpha_1,1}, \bar{\Theta}_{\alpha_1,2}, \bar{\Theta}_{\alpha_2}]$  和  $\mathbb{P}[\bar{\Theta}_{\alpha_1,1}, \bar{\Theta}_{\alpha_1,2}, \bar{\Theta}_{\alpha_2}]$  这两个表达式已经在 (25) 和 (27) 中分别给出。因此,中断概率  $\mathcal{O}_{K,\alpha_1}$ ,  $\mathcal{O}_{K,\alpha_2}$  和  $\mathcal{O}_{K,\alpha_1,\alpha_2}$  可以分别通过 (17)、(28) 和 (33) 计算得到。代入 (15) 式可以得到所提出方案的LTAT。为了计算中断概率,必须要通过计算 (21) 式中的双重积分  $\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})$  来得到。然而 (21) 式中的双重积分计算复杂度非常高,因此非常有必要提供一种计算复杂度更低的算法。由于协作通信的需求,NOMA用户彼此相距通常很短,可以下面的定理来简化  $\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})$  的计算。

[0158] 定理1:在短距离  $D \rightarrow 0$  条件下,  $\varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{U}, \boldsymbol{\tau})$  可以近似为

$$\begin{aligned}
 & \varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \hat{\mathbf{U}}, \hat{\boldsymbol{\tau}}) \approx \varphi(\mathbf{U}, \boldsymbol{\tau}; \mathbf{0}, \mathbf{0}) \\
 & = \pi B \left( 1 - \frac{2}{\alpha}, \sum_{i=1}^{N+M} \tilde{\tau}_i + 1 \right) \mathcal{K}_{\frac{2}{\alpha}} \left( \frac{2}{\alpha} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \sum_{k=1}^{N+M} \tilde{\tau}_k U_k \\
 & \times F_D^{(N+M-1)} \left\{ 1 - \frac{2}{\alpha}, (\tilde{\tau}_i + \delta_{i \rightarrow k})_{i=1, i \neq \mu}^{N+M}; \sum_{i=1}^{N+M} \tilde{\tau}_i + 1; \left( 1 - \frac{U_i}{U_\mu} \right)_{i=1, i \neq \mu}^{N+M} \right\},
 \end{aligned} \tag{34}$$

[0160]  $\mathbf{U} = (\mathbf{U}, \mathbf{U}) = (\tilde{U}_1, \dots, \tilde{U}_{N+M})$ ,  $\boldsymbol{\tau} = (\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\tau}) = (\tilde{\tau}_1, \dots, \tilde{\tau}_{N+M})$ ,  $\delta_s$  定义狄利克雷函数,  $F_D^{(N)}(\mathbf{a}; \mathbf{b}; \mathbf{x})$  定义第四类Lauricella函数,  $B(a, b)$  定义Beta函数。如果  $N+M=1$ , 则上述近似将变为等式。上述近似的结果不但计算复杂度低,而且在数值分析中展现出非常好的近似性能。

[0161] 根据吞吐量和中断概率的理论分析,接下来具体分析如何应用这些结果进行应用方案的优化设计来有效提高系统的吞吐量或者空间频谱利用率。

[0162] C. 频谱效率优化

[0163] 衡量频谱效率有两个关键性能指标,分别为吞吐量  $\eta$  和空间频谱效率  $\Delta$ ,前者衡量传输一条信息的频谱效率,而后者则是衡量整个网络的频谱效率,并且这两者的关系为  $\Delta = \lambda \eta$ ,其中  $\lambda$  为占用相同时频资源的D2D用户分布密度。

[0164] C.1 吞吐量最大化

[0165] HARQ允许最大的传输次数的增加可能会降低系统吞吐量LTAT。为了克服同信道干扰的负面影响,充分利用协作HARQ的优势,这里提出了一种干扰感知的优化设计方案。特别是通过适当选择系统参数,同时保持服务质量,使LTAT最大化。以最优传输速率选择为例,为了限制中断概率同时实现NOMA传输,并在给定功率分配系数  $\beta^2$  的情况下通过优化选择传输速率来最大化LTAT。优化问题的数学形式可以表示成

$$\begin{aligned}
 & \underset{R_1, R_2}{\text{maximize}} && \eta \\
 & \text{subject to} && \mathcal{O}_{K,\alpha_i} \leq \varepsilon_i, i=1, 2 \\
 & && 0 \leq \beta^2 < 2^{-R_2},
 \end{aligned} \tag{35}$$

[0167] 其中  $\varepsilon_i$  表示用户  $i$  的最大允许中断概率。值得一提的是, (35) 由于中断概率表达式极为复杂和问题的非凸性,很难求解出闭合形式的优化解。但是,可以借助内点法进行数值求解得出次优解。

[0168] C.2 空间频谱效率最大化

[0169] 除了LTAT,空间频谱利用率 (ASE) 是另外一个重要的性能指标来衡量整个D2D网络

的频谱效率,其具体表达式为

$$[0170] \quad \Delta = \lambda \eta. \quad (36)$$

[0171] 受(35)式启发,为了进一步优化D2D用户的分布密度,可以通过最大化空间频谱利用率 $\Delta$ 同时保证服务质量,因此优化问题的数学形式如下

$$[0172] \quad \begin{aligned} & \underset{R_1, R_2, \lambda}{\text{maximize}} && \Delta \\ & \text{subject to} && \mathcal{O}_{K, \sigma_i} \leq \varepsilon_i, i = 1, 2 \\ & && 0 \leq \beta^2 \leq 2^{-R_2} \end{aligned} \quad (37)$$

[0173] 类似于(35), (37)也可以有效地通过内点法求解。

[0174] 综上所述,由于频谱资源有限,在进行大规模D2D应用时导致过度的频率复用,从而对占用相同时频资源的移动终端造成了严重的叠加干扰。严重的干扰势必会造成通信系统的性能急剧恶化,如频谱效率下降和中断概率上升。为提高频谱效率同时保证可靠性传输,本实施例提供了一种联合频谱效率高的非正交多址接入技术(NOMA)和保障传输可靠性的协作混合自动重发请求(HARQ)在大规模D2D网络中的应用方案。

[0175] 上述实施例为本发明较佳的实施方式,但本发明的实施方式并不受上述实施例的限制,其他的任何未背离本发明的精神实质与原理下所作的改变、修饰、替代、组合、简化,均应为等效的置换方式,都包含在本发明的保护范围之内。

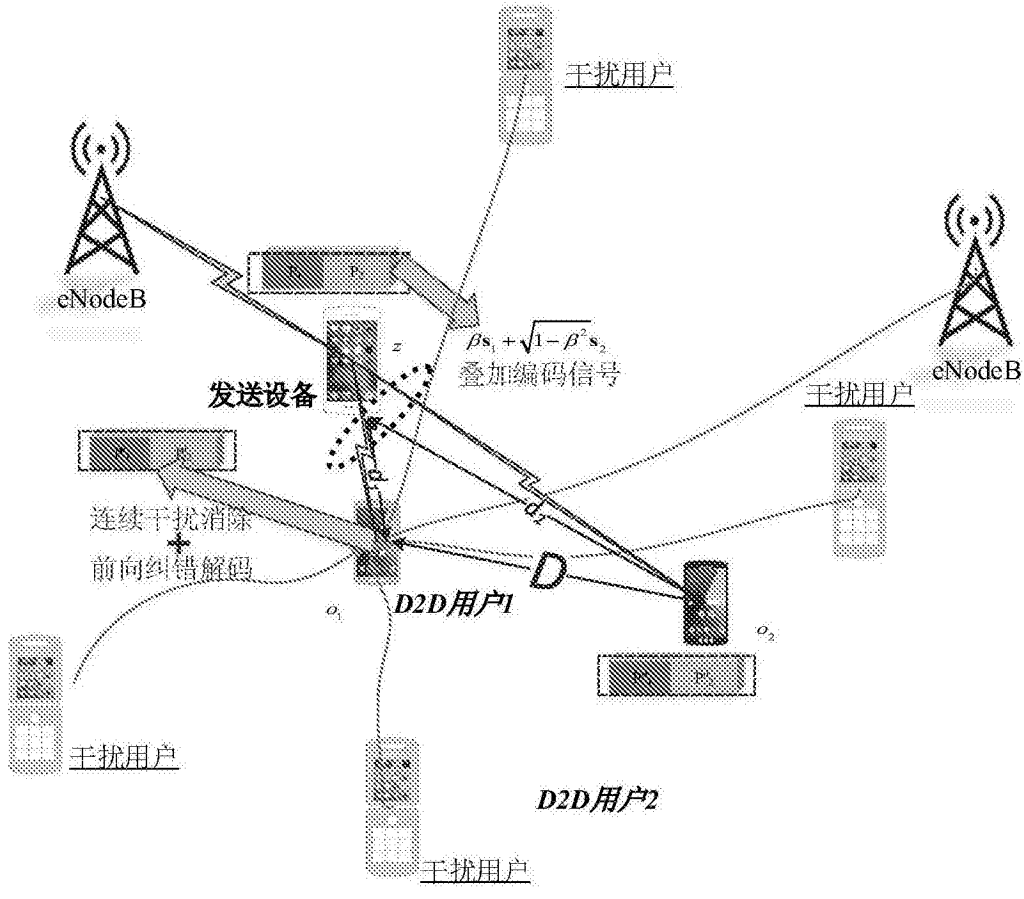


图1

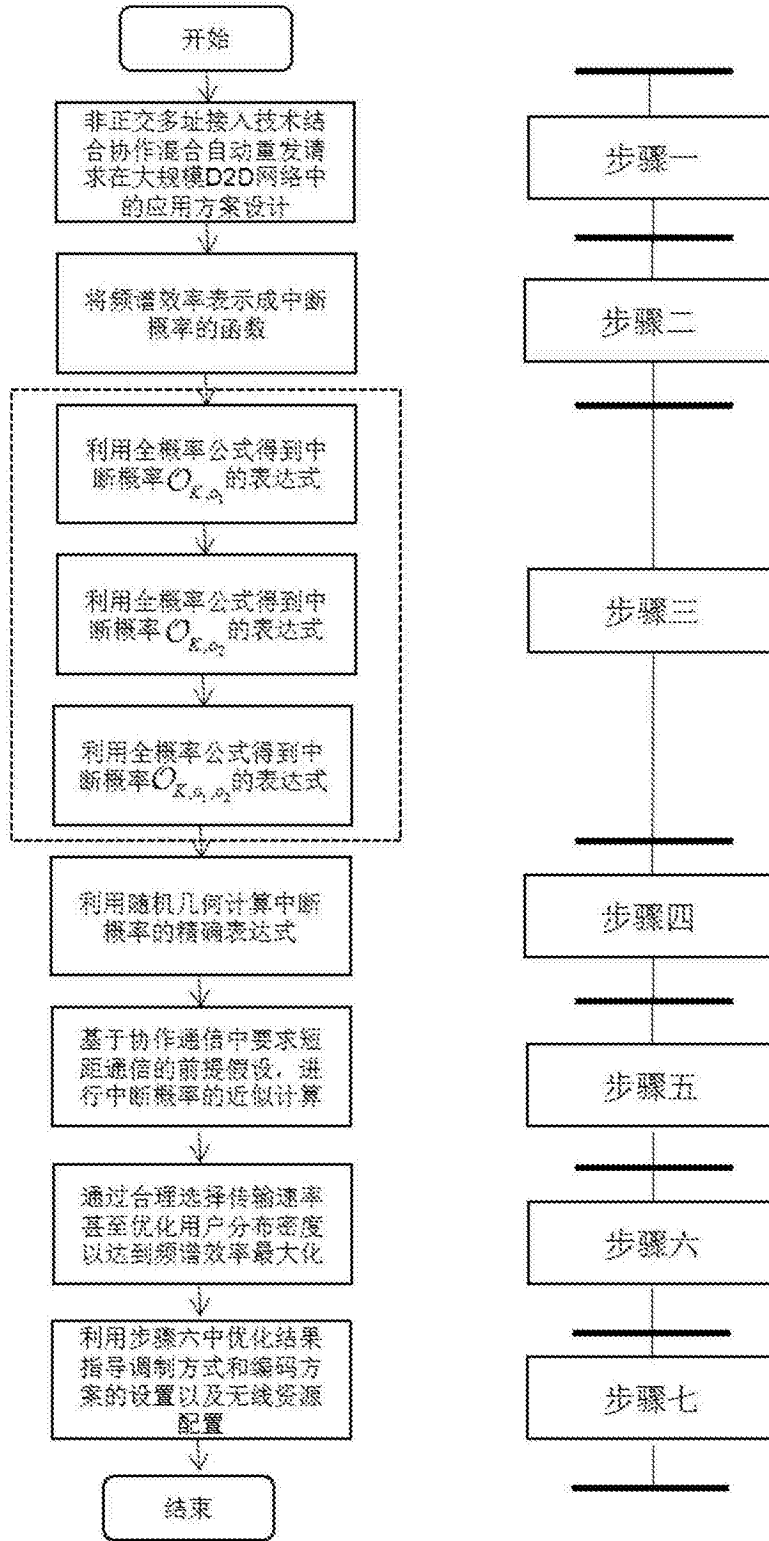


图2