



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112752266 B

(45) 授权公告日 2022.05.24

(21) 申请号 202011587066.7

H04W 74/08 (2009.01)

(22) 申请日 2020.12.28

H04W 76/14 (2018.01)

H04L 41/14 (2022.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112752266 A

(43) 申请公布日 2021.05.04

(73) 专利权人 中国人民解放军陆军工程大学
地址 210000 江苏省南京市秦淮区后标营
路88号

(72) 发明人 吴丹 吴岩 刘杰 乐超 管新荣

(74) 专利代理机构 北京力量专利代理事务所
(特殊普通合伙) 11504

专利代理师 毛雨田

(51) Int. Cl.

H04W 16/14 (2009.01)

H04W 28/02 (2009.01)

(56) 对比文件

CN 109729528 A, 2019.05.07

CN 103220724 A, 2013.07.24

CN 107094060 A, 2017.08.25

刘晓玲等. 基于博弈论的D2D通信功率控制
算法.《信息通信》.2018, (第03期),

Y. Wu等. Contention-Based Radio

Resource Management for URLLC-Oriented
D2D Communications.《in IEEE Transactions
on Vehicular Technology, vol. 69, no. 9,
pp. 9960-9971, Sept. 2020, doi: 10.1109/
TVT.2020.3003944》.2020,

审查员 徐莹莹

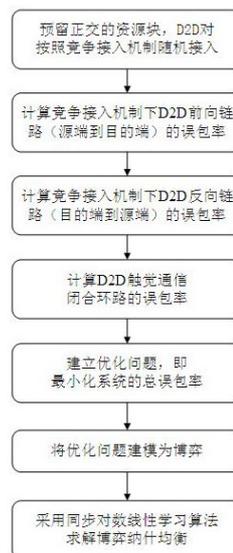
权利要求书4页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制
方法

(57) 摘要

一种D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制
方法, 涉及无线通信技术领域。本发明对每个
D2D对按照基于竞争的频谱接入机制随机接入一
个资源块; 计算竞争接入机制下D2D前向链路
的误包率, 即源端到目的端; 计算竞争接入机制下
D2D反向链路的误包率, 即目的端到源端; 计算
D2D触觉通信闭合环路的误包率; 建立优化问题,
即最小化系统总误包率; 将优化问题建模为博
弈; 采用同步对数线性学习算法求解博弈纳什均
衡。通过合理的功率控制可以协调用户间的干
扰, 可以有效卸载资源调度时延以及降低数据包
传输出错概率, 从而满足D2D触觉通信的时延和
可靠性要求。



1. 一种D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤一:对于本地触觉通信场景,控制端与操作端直接通过D2D方式进行通信,控制端与操作端就构成了一个D2D对,其中,控制端为源端,操作端为目的端;假设蜂窝小区中共存在N个D2D对和K个正交的资源块,其中 $N > K$,分别用 $\mathcal{N} = \{1, \dots, n, \dots, N\}$ 和 $\mathcal{K} = \{1, \dots, k, \dots, K\}$ 表示;其中,D2D对n的源端和目的端分别用 e_n 和 r_n 表示,所有源端和目的端分别构成 $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_n, \dots, e_N\}$ 和 $\mathcal{R} = \{r_1, \dots, r_n, \dots, r_N\}$;每个D2D对按照基于竞争的频谱接入机制随机接入一个资源块;

步骤二:计算竞争接入机制下D2D前向链路的误包率,即目的端 r_n 处的误包率 ε_{r_n} ;所述前向链路为源端到目的端;根据有限块长度下短数据包公式,误包率 ε_{r_n} 取决于目的端 r_n 处的接收信噪比 γ_{r_n} ;计算竞争接入机制下目的端 r_n 处的接收信噪比 γ_{r_n} ;

步骤三:计算竞争接入机制下D2D反向链路的误包率,即源端 e_n 处的误包率 ε_{e_n} ;所述反向链路为目的端到源端;根据有限块长度下短数据包公式,误包率 ε_{e_n} 取决于源端 e_n 处的接收信噪比 γ_{e_n} ;计算竞争接入机制下源端 e_n 处的接收信噪比 γ_{e_n} ;

步骤四:计算D2D触觉通信闭合环路的误包率,根据步骤二和步骤三,D2D触觉通信闭合环路的成功传输概率为

$$\xi_n = (1 - \varepsilon_{r_n})(1 - \varepsilon_{e_n}) = 1 - \varepsilon_{r_n} - \varepsilon_{e_n} + \varepsilon_{r_n} \cdot \varepsilon_{e_n} \approx 1 - (\varepsilon_{r_n} + \varepsilon_{e_n});$$

因此,闭合环路的误包率近似为

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{r_n} + \varepsilon_{e_n};$$

步骤五:建立优化问题,网络中N个D2D对的总的误包率为

$$\Phi = \sum_{n \in \mathcal{N}} \varepsilon_n;$$

基于此,在竞争接入机制下,功率控制的优化目标为最小化系统的总误包率,即

$$Q: \min_{\mathbf{P}} \Phi$$

s. t.

$$1 \leq p_{r_n} \leq S, \forall n \in \mathcal{N}$$

$$1 \leq p_{e_n} \leq S, \forall n \in \mathcal{N}$$

$$\varepsilon_n \leq \varepsilon_{th}, \forall n \in \mathcal{N}$$

其中, $\mathbf{P} = (p_1, \dots, p_n, \dots, p_N)$ 为N个D2D对发射功率向量, $\mathbf{p}_n = (p_{e_n}, p_{r_n})$ 由源端和目的端发射功率组成,S为源端和目的端可采取的最大发射功率等级, ε_{th} 为每个D2D对的闭合环路误包率阈值;

步骤六:将优化问题建模为博弈,建立博弈模型为 $\mathcal{G} = [\mathcal{N}, \mathcal{S}, \{u_n\}_{n \in \mathcal{N}}]$,其中 $\mathcal{N} = \{1, \dots, n, \dots, N\}$ 为博弈参与者的集合, $\mathcal{S} = \mathcal{S}_1 \times \dots \times \mathcal{S}_N$ 为策略空间, \mathcal{S}_n 为博弈参与者n的策略集, $u_n(p_n, \mathbf{p}_{-n})$ 表示博弈参与者n的效用函数,其中, p_n 为博弈参与者n的发射功率, \mathbf{p}_{-n} 为除博弈参与者n以外,其他博弈参与者的发射功率,所提出的功率控制博弈建模为

$$\mathcal{G}: \max u_n(p_n, p_{-n}), \forall n \in \mathcal{N};$$

步骤七: 求解博弈纳什均衡, 采用同步对数线性学习算法, 在没有信息交互和协调机制的前提下, 收敛到最优纳什均衡解, 即最小化竞争接入机制下所有D2D对的误包率之和。

2. 根据权利要求1所述的D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法, 其特征在于, D2D的源端和目的端的传输在时间上是同步的。

3. 根据权利要求1所述的D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法, 其特征在于, 上述步骤二中目的端误包率 ε_{r_n} 与目的端 r_n 处的接收信噪比 γ_{r_n} 的关系为:

$$\varepsilon_{r_n} = Q\left(f\left(\gamma_{r_n}\right)\right),$$

其中, $Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 为高斯Q函数, t 为积分变量, dt 为 t 的一阶求导, $f(\gamma) = \sqrt{\frac{L}{V(\gamma)}} \left(\log_2(1+\gamma) - \frac{\eta}{L} \right)$; L 为数据包长度, η 为传输的信息比特数, 且 $V(\gamma) = \frac{\gamma(2+\gamma)}{(1+\gamma)^2} (\log_2 e)^2$ 。

4. 根据权利要求3所述的D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法, 其特征在于, 目的端 r_n 处的接收信噪比 γ_{r_n} 的计算方法如下: 假设此时D2D对 n 接入资源块 k , 则目的端 r_n 处的接收信噪比SNR为

$$\gamma_{r_n}^k = \frac{p_{e_n} H(e_n, r_n)}{\sum_{e_i \in \mathcal{C}_{r_n}^{\mathbf{P}_e} \setminus \{e_n\}} \frac{1}{K} p_{e_i} H(e_i, r_n) + \sigma^2},$$

其中, P_{e_n} 为源端 e_n 的发射功率, $H(e_n, r_n)$ 为源端 e_n 到目的端 r_n 的信道增益, σ^2 为噪声功率, $1/K$ 为D2D对 i 接入资源块 k 的概率; $\mathbf{P}_e = (p_{e_1}, \dots, p_{e_n}, \dots, p_{e_N})$ 为源端发射功率组成的向量, $\mathcal{C}_{r_n}^{\mathbf{P}_e} = \{e_m \mid p_{e_m} H(e_m, r_n) / \sigma^2 \geq \gamma_{\text{th1}}, m \in \mathcal{N}\}$ 为在向量 \mathbf{P}_e 下, 所有到目的端 r_n 的信噪比超过 γ_{th1} 的源端集合; 其中, γ_{th1} 为对目的端 r_n 的接收造成干扰的信噪比阈值, 即若其他源端到 r_n 的SNR大于 γ_{th1} , 则会对目的端 r_n 的接收产生干扰, 否则, 将不会对 r_n 的接收造成影响; e_m 为D2D对 m 的源端, P_{e_m} 为源端 e_m 的发射功率, $H(e_m, r_n)$ 为源端 e_m 到目的端 r_n 的信道增益; e_i 为D2D对 i 的源端, P_{e_i} 为源端 e_i 的发射功率, $H(e_i, r_n)$ 为源端 e_i 到目的端 r_n 的信道增益;

由于在竞争机制下, D2D对 n 随机接入资源块, 所以相对于 K 个资源块的接收信噪比为

$$\gamma_{r_n} = \frac{1}{K} \sum_{k \in \mathcal{K}} \gamma_{r_n}^k = \frac{p_{e_n} H(e_n, r_n)}{\sum_{e_i \in \mathcal{C}_{r_n}^{\mathbf{P}_e} \setminus \{e_n\}} \frac{1}{K} p_{e_i} H(e_i, r_n) + \sigma^2}.$$

5. 根据权利要求1所述的D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法, 其特征在于, 步骤三中的源端误包率 ε_{e_n} 与源端 e_n 处的接收信噪比 γ_{e_n} 的关系为:

$$\varepsilon_{e_n} = Q\left(f\left(\gamma_{e_n}\right)\right),$$

其中, $Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 为高斯Q函数, t 为积分变量, dt 为 t 的一阶求导,

$f(\gamma) = \sqrt{\frac{L}{V(\gamma)}} \left(\log_2(1+\gamma) - \frac{\eta}{L} \right)$; L 为数据包长度, η 为传输的信息比特数, 且

$$V(\gamma) = \frac{\gamma(2+\gamma)}{(1+\gamma)^2} (\log_2 e)^2.$$

6. 根据权利要求5所述的D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法, 其特征在于, 源端 e_n 处的接收信噪比 γ_{e_n} 的计算方法如下: 在竞争机制下, D2D对 n 在 K 个资源块上的接收信噪比为

$$\gamma_{e_n} = \frac{p_{r_n} H(e_n, r_n)}{\sum_{r_i \in \mathcal{C}_{e_n}^{\mathbf{P}_r} \setminus \{r_n\}} \frac{1}{K} p_{r_i} H(e_n, r_i) + \sigma^2},$$

其中, p_{r_n} 为目的端 r_n 的发射功率, $H(e_n, r_n)$ 为源端 e_n 到目的端 r_n 的信道增益, σ^2 为噪声功率, $1/K$ 为D2D对 i 接入资源块 k 的概率; $\mathbf{P}_r = (p_{r_1}, \dots, p_{r_n}, \dots, p_{r_N})$ 为目的端发射功率组成的向量, $\mathcal{C}_{e_n}^{\mathbf{P}_r} = \{r_m \mid p_{r_m} H(e_n, r_m) / \sigma^2 \geq \gamma_{\text{th}2}, m \in \mathcal{N}\}$ 为在向量 \mathbf{P}_r 下, 所有到源端 e_n 的信噪比超过 $\gamma_{\text{th}2}$ 的目的端集合, 其中, $\gamma_{\text{th}2}$ 为对源端 e_n 的接收造成干扰的信噪比阈值; r_m 为D2D对 m 的目的端, p_{r_m} 为目的端 r_m 的发射功率, $H(e_n, r_m)$ 为源端 e_n 到目的端 r_m 的信道增益; r_i 为D2D对 i 的目的端, p_{r_i} 为目的端 r_i 的发射功率, $H(e_n, r_i)$ 为源端 e_n 到目的端 r_i 的信道增益。

7. 根据权利要求1所述的D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法, 其特征在于, 步骤六中博弈参与者 n 的策略集 \mathcal{S}_n 可以表示为

$$\mathcal{S}_n = \left\{ \begin{array}{ccc} (1,1) & \cdots & (1,S) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (S,1) & \cdots & (S,S) \end{array} \right\},$$

其中, S 为源端和目的端可采取的最大发射功率等级。

8. 根据权利要求1所述的D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法, 其特征在于, 步骤六中博弈参与者 n 的效用函数 $u_n(p_n, p_{-n})$ 被定义为

$$u_n(p_n, p_{-n}) = - \left\{ \sum_{r_i \in \mathcal{D}_{e_n}^S} \varepsilon_{r_i} + \sum_{e_j \in \mathcal{D}_{e_n}^S} \varepsilon_{e_j} \right\},$$

其中, r_i 为D2D对 i 的目的端, ε_{r_i} 为目的端 r_i 处的误包率; e_j 为D2D对 j 的源端, ε_{e_j} 为源端 e_j 处的误包率; $\mathcal{D}_{e_n}^S$ 为当源端 e_n 以发射功率 S 发送时, 所影响的目的端的集合, 即

$\mathcal{D}_{e_n}^S = \{r_m | p_{e_n} H(e_n, r_m) / \sigma^2 \geq \gamma_{th}, m \in \mathcal{N}\}$, 其中 $p_{e_n} = S$; 同理, $\mathcal{D}_{r_n}^S$ 为当目的端 r_n 以发射功率 S 发送时, 所影响的源端的集合, 即 $\mathcal{D}_{r_n}^S = \{e_m | p_{r_n} H(e_m, r_n) / \sigma^2 \geq \gamma_{th}, m \in \mathcal{N}\}$, 其中 $p_{r_n} = S$; 因此, u_n 物理含义为所有被博弈参与者 n 影响的源端和目的端的误包率之和。

9. 根据权利要求1所述的D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法, 其特征在于, 步骤七中基于同步对数线性学习的功率控制算法如下:

初始化: 令初始迭代时刻 $t=0$, 初始化所有博弈参与者的功率向量 $p(0) = \{p_1(0), \dots, p_N(0)\}$, 其中 $p_n(0) \in \mathcal{S}_n, \forall n \in \mathcal{N}$ 且 $\varepsilon_n \leq \varepsilon_{th}, \forall n \in \mathcal{N}$; 此外, 设置二进制指示变量 $b_n(0)=0, \forall n \in \mathcal{N}$;

所有博弈参与者同时执行以下步骤:

$t=t+1$

若 $b_n(t-1)=0$, 博弈参与者 n 按照以下规则更新其策略

$$\Pr[p_n(t) = p'] = \begin{cases} \frac{\delta_n}{|\mathcal{S}_n| - 1}, & p' \in \{\mathcal{S}_n \setminus p_n(t-1)\} \\ 1 - \delta_n, & p' = p_n(t-1) \end{cases}$$

其中, p' 为博弈参与者 n 在 t 时刻所采取的策略; $|\mathcal{S}_n|$ 表示集合 \mathcal{S}_n 中元素的数量, δ_n 为博弈参与者 n 的探索速率; 若 $p_n(t) \neq p_n(t-1)$, 设置 $b_n(t) = 1$; 否则, 设置 $b_n(t) = 0$;

若 $b_n(t-1) = 1$, 博弈参与者 n 按照以下规则更新其策略 $\Pr[p_n(t)=p_n(t-1)] = \frac{\exp\{\hat{u}_n(t-1) \cdot \beta\}}{Y}$

$$\Pr[p_n(t)=p_n(t-2)] = \frac{\exp\{\hat{u}_n(t-2) \cdot \beta\}}{Y}$$

其中, β 为学习参数, $\hat{u}_n(t-1)$ 和 $\hat{u}_n(t-2)$ 分别是博弈参与者 n 在时刻 $t-1$ 和 $t-2$ 的效用, $Y = \exp\{\hat{u}_n(t-1) \cdot \beta\} + \exp\{\hat{u}_n(t-2) \cdot \beta\}$, 接着, 设置 $b_n(t) = 0$;

若满足约束条件 $\varepsilon_n \leq \varepsilon_{th}, \forall n \in \mathcal{N}$, p_n 保持不变; 若不能满足约束条件, 则设置 $p(t) = p(t-1)$ 。

一种D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及无线通信技术领域,尤其涉及一种面向D2D触觉通信的联合频谱接入和功率控制方法。

背景技术

[0002] 随着无线通信技术的发展,人们不再满足于传统的音视频通信,而希望获得更加沉浸式的用户体验。基于此,触觉通信技术应运而生。触觉通信主要传输人的触觉信号(如力度、扭矩、速度等),可以给用户提供多维度的感知信息。因此,触觉通信有着广泛的应用前景,如虚拟现实、自动驾驶、智慧医疗等。

[0003] 触觉通信根据控制端和操作端距离的远近可以分为远程触觉通信和本地触觉通信。对于远程触觉通信,需要借助网络设施(网络域)传输信号;对于本地触觉通信,控制端与操作端可以直接通过设备到设备(D2D)方式进行通信,以有效提高频谱利用效率,降低传输时延。

[0004] 然而,相较于传统的D2D音视频通信,实现D2D触觉通信更具挑战性。具体而言,音视频流对吞吐量的需求较高,因此只要分配丰富的带宽资源即可,且音视频流通常是单向的。不同的是,触觉流的传输为双向传输,既包括控制端在前向链路上向操作端发送控制信号,也包括操作端在反向链路上向控制端反馈触觉信号,从而形成闭合控制环路。此外,为了保证用户的沉浸体验,整个控制环路对时延和可靠性有着非常严格的要求,因此触觉通信属于超可靠低延迟通信(URLLC)场景。

[0005] 无线资源分配,包括频谱接入和功率控制,是实现D2D触觉通信的关键步骤,因为它直接影响到通信的时延和可靠性性能。目前,已有少量文献研究了触觉通信资源管理的问题。文献[Toward Human-in-the-Loop Mobile Networks:A Radio Resource Allocation Perspective on Haptic Communications,IEEE Trans.Wirel.Commun., vol.17,no.7,pp.4493-4508,2018]针对感知编码和对称设计两种资源分配情形,分别提出了低复杂度的贪婪算法和接近最优解的资源分配方案。文献[Fog Computing for 5G Tactile Industrial Internet of Things:QoE-Aware Resource Allocation Model,IEEE Trans.Ind.Informat.,vol.15,no.5,pp.3085-3092,2019]提出了一个基于用户体验的动态资源分配模型以应对物联网中的触觉通信应用,并使用Java实现了该模型。

[0006] 然而,以上文献都是基于请求-授权机制,即用户需要向基站进行资源调度请求并等待基站授权,然后才可以使用频谱资源。显然,该过程将会造成端到端时延的恶化,以至于无法满足触觉通信的时延要求。

发明内容

[0007] 本发明主要针对现有资源分配方案会导致D2D触觉通信时延增加以及可靠性降低的问题,而提供一种联合频谱接入和功率控制方法。该方法可以有效消除资源调度时延以及降低数据包传输出错概率,进而满足D2D触觉通信的时延和可靠性要求。

[0008] 本发明提供一种D2D触觉通信中联合频谱接入和功率控制方法,所述方法包括以下步骤:

[0009] 步骤一:对于本地触觉通信场景,控制端与操作端可以直接通过D2D方式进行通信。因此,控制端与操作端就构成了一个D2D对,其中,控制端为源端,操作端为目的端。假设蜂窝小区中共存在N个D2D对和K个正交的资源块($N > K$),分别用 $\mathcal{N} = \{1, \dots, n, \dots, N\}$ 和 $\mathcal{K} = \{1, \dots, k, \dots, K\}$ 表示。其中,D2D对n的源端和目的端分别用 e_n 和 r_n 表示,所有源端和目的端分别构成 $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_n, \dots, e_N\}$ 和 $\mathcal{R} = \{r_1, \dots, r_n, \dots, r_N\}$ 。每个D2D对按照基于竞争的频谱接入机制随机接入一个资源块。

[0010] 步骤二:计算竞争接入机制下D2D前向链路的误包率,即目的端 r_n 处的误包率 ε_{r_n} ;所述前向链路为源端到目的端;根据有限块长度下短数据包公式,误包率 ε_{r_n} 取决于目的端 r_n 处的接收信噪比 γ_{r_n} ;计算竞争接入机制下目的端 r_n 处的接收信噪比 γ_{r_n} ;

[0011] 步骤三:计算竞争接入机制下D2D反向链路的误包率,即源端 e_n 处的误包率 ε_{e_n} ;所述反向链路为目的端到源端;根据有限块长度下短数据包公式,误包率 ε_{e_n} 取决于源端 e_n 处的接收信噪比 γ_{e_n} ;计算竞争接入机制下源端 e_n 处的接收信噪比 γ_{e_n} ;

[0012] 步骤四:计算D2D触觉通信闭合环路的误包率。根据步骤二和步骤三,D2D触觉通信闭合环路的成功传输概率为

$$[0013] \quad \xi_n = (1 - \varepsilon_{r_n})(1 - \varepsilon_{e_n}) = 1 - \varepsilon_{r_n} - \varepsilon_{e_n} + \varepsilon_{r_n} \cdot \varepsilon_{e_n} \approx 1 - (\varepsilon_{r_n} + \varepsilon_{e_n})。$$

[0014] 因此,闭合环路的误包率可近似为

$$[0015] \quad \varepsilon_n = \varepsilon_{r_n} + \varepsilon_{e_n}。$$

[0016] 步骤五:建立优化问题。网络中N个D2D对的总的误包率为

$$[0017] \quad \Phi = \sum_{n \in \mathcal{N}} \varepsilon_n。$$

[0018] 基于此,在竞争接入机制下,功率控制的优化目标为最小化系统的总误包率,即

$$[0019] \quad Q: \min_{\mathbf{P}} \Phi$$

[0020] s. t.

$$[0021] \quad 1 \leq p_{r_n} \leq S, \forall n \in \mathcal{N}$$

$$[0022] \quad 1 \leq p_{e_n} \leq S, \forall n \in \mathcal{N}$$

$$[0023] \quad \varepsilon_n \leq \varepsilon_{th}, \forall n \in \mathcal{N}$$

[0024] 其中, $\mathbf{P} = (p_1, \dots, p_n, \dots, p_N)$ 为N个D2D对发射功率向量, $p_n = (p_{e_n}, p_{r_n})$ 由源端和目的端发射功率组成,S为源端和目的端可采取的最大发射功率等级, ε_{th} 为每个D2D对的闭合环路误包率阈值。

[0025] 步骤六:将优化问题建模为博弈。此优化问题为混合整数非线性规划问题,拟采用博弈论进行求解。建立博弈模型为 $\mathcal{G} = [\mathcal{N}, \mathcal{S}, \{u_n\}_{n \in \mathcal{N}}]$,其中 $\mathcal{N} = \{1, \dots, n, \dots, N\}$ 为博弈参与者的集合, $\mathcal{S} = \mathcal{S}_1 \times \dots \times \mathcal{S}_N$ 为策略空间, \mathcal{S}_n 为博弈参与者n的策略集。 $u_n(p_n, p_{-n})$ 表示博弈参与者n的效用函数,其中, p_n 为博弈参与者n的发射功率, p_{-n} 为除博弈参与者n以外,其他博弈参与

者的发射功率。因此,所提出的功率控制博弈可建模为

$$[0026] \quad \mathcal{G}: \max u_n(p_n, p_{-n}), \forall n \in \mathcal{N}$$

[0027] 步骤七:求解博弈纳什均衡。采用同步对数线性学习(SLL)算法,可以在没有信息交互和协调机制的前提下,收敛到最优纳什均衡解,即最小化竞争接入机制下所有D2D对的误包率之和。SLL算法是基于玻尔兹曼探索策略,即参与者选择具有更高效用策略的概率大于具有较低效用策略的概率。因此,玻尔兹曼探索策略被认为是摆脱局部最优并最终达到全局最优的有效方法。

[0028] 本发明提供一种基于竞争的资源接入机制。具体而言,首先预留一定数目正交的资源块用于D2D触觉通信。当有数据包需要传输时,源端或目的端可以在前向链路或反向链路上随机接入一个资源块,而无需发送资源调度请求和等待基站的授权。尽管该接入机制可以有效卸载调度时延,但由于接入的随机性,当两个或更多用户接入同一个资源块时,用户间将产生相互干扰,影响传输的可靠性。而后,通过合理的功率控制可以协调用户间的干扰,从而同时满足D2D触觉通信的时延和可靠性要求。

[0029] 本发明提供一种面向D2D触觉通信的联合频谱接入和功率控制方法,可以有效卸载资源调度时延以及降低数据包传输出错概率,从而满足D2D触觉通信的时延和可靠性要求。该方法先是采用基于竞争机制的频谱接入方式来卸载资源调度时延,然后在该机制下,通过合理的功率控制降低传输的误包率。具体而言,将功率控制问题转化为非合作博弈模型,并采取分布式学习算法求解纳什均衡。

附图说明

[0030] 图1为本发明的D2D触觉通信的模型图。

[0031] 图2为本发明竞争机制下D2D对之间干扰分析图。

[0032] 图3为本发明的联合频谱接入和功率控制流程图。

[0033] 图4a为不同迭代次数的情况下本发明的算法与最优解之间关于总误包率的对比示意图。

[0034] 图4b为不同迭代次数的情况下不同D2D对的功率选择对比示意图。

[0035] 图5a为不同算法环境下误包率与数据包长度的关系示意图。

[0036] 图5b为不同算法环境下误包率与资源块数目的关系示意图。

具体实施方式

[0037] 下面结合附图对本发明作进一步的描述。

[0038] 参照附图1,对D2D触觉通信模型做进一步的描述。一个D2D对由一个源端和一个目的端组成。在触觉通信中,源端通常为触觉装置,即可以通过各种编码技术将人的动作、感觉转换为触觉信号输入。目的端通常为遥控操纵装置,即可以与环境进行交互,并向源端反馈触觉信号。

[0039] D2D触觉通信的通信过程描述如下。首先,源端通过前向链路向目的端发送控制信号。然后,目的端根据接收到的控制信号,与环境进行交互,并通过反向链路向源端发送触觉反馈信号,从而形成一个闭环的D2D触觉通信模型。在本发明中,多个D2D的源端和目的端在传输时,时间上是严格同步的。

[0040] 参照附图2,对竞争机制下D2D对之间所产生的干扰做进一步的分析。以前向链路为例,分析目的端 r_1 所受到的干扰。考虑到发射功率的有限性和无线信道衰落特性,每个源端只能影响一定覆盖范围内的目的端。例如,粉色阴影区域可以视为源端 e_3 的覆盖区域,即源端 e_3 可以影响覆盖范围内的目的端,但不能影响覆盖范围外的目的端。假设图中的3个D2D对同时接入同一个资源块。那么,目的端 r_1 的接收将会受到源端 e_2 的影响,而不受源端 e_3 的影响,因为目的端 r_1 在源端 e_2 的覆盖范围内,而不在源端 e_3 的覆盖范围内。类似地,在反向链路上,源端 e_1 会受到目的端 r_3 的影响,因为源端 e_1 在目的端 r_3 的覆盖范围内。

[0041] 参照附图3,对本发明的实现步骤做进一步的说明:

[0042] 步骤一:假设蜂窝小区中共存在 N 个D2D对和 K 个正交的资源块,分别用 $\mathcal{N} = \{1, \dots, n, \dots, N\}$ 和 $\mathcal{K} = \{1, \dots, k, \dots, K\}$ 表示。其中,D2D对 n 的源端和目的端分别用 e_n 和 r_n 表示,所有源端和目的端分别构成 $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_n, \dots, e_N\}$ 和 $\mathcal{R} = \{r_1, \dots, r_n, \dots, r_N\}$ 。每个D2D对按照基于竞争的频谱接入机制随机接入一个资源块。

[0043] 步骤二:计算竞争接入机制下D2D前向链路(源端到目的端)的误包率,即目的端 r_n 处的误包率。竞争接入机制下,用户以等概率的方式随机接入一个资源块。若此时D2D对 n 接入资源块 k ,则目的端 r_n 处的接收信噪比SNR为

$$[0044] \quad \gamma_{r_n}^k = \frac{p_{e_n} H(e_n, r_n)}{\sum_{e_i \in \mathcal{C}_{r_n}^{\mathbf{P}_e} \setminus \{e_n\}} \frac{1}{K} p_{e_i} H(e_i, r_n) + \sigma^2},$$

[0045] 其中, P_{e_n} 为源端 e_n 的发射功率, $H(e_n, r_n)$ 为源端 e_n 到目的端 r_n 的信道增益, σ^2 为噪声功率, $1/K$ 为D2D对 i 接入资源块 k 的概率; $\mathbf{P}_e = (p_{e_1}, \dots, p_{e_n}, \dots, p_{e_N})$ 为源端发射功率组成的向量, $\mathcal{C}_{r_n}^{\mathbf{P}_e} = \{e_m \mid p_{e_m} H(e_m, r_n) / \sigma^2 \geq \gamma_{\text{th1}}, m \in \mathcal{N}\}$ 为在向量 \mathbf{P}_e 下,所有到目的端 r_n 的信噪比超过 γ_{th1} 的源端集合;其中, γ_{th1} 为对目的端 r_n 的接收造成干扰的信噪比阈值,即若其他源端到 r_n 的SNR大于 γ_{th1} ,则会对目的端 r_n 的接收产生干扰,否则,将不会对 r_n 的接收造成影响; e_m 为D2D对 m 的源端, P_{e_m} 为源端 e_m 的发射功率, $H(e_m, r_n)$ 为源端 e_m 到目的端 r_n 的信道增益; e_i 为D2D对 i 的源端, P_{e_i} 为源端 e_i 的发射功率, $H(e_i, r_n)$ 为源端 e_i 到目的端 r_n 的信道增益。

[0046] 由于在竞争机制下,D2D对 n 随机接入资源块,所以相对于 K 个资源块的接收信噪比为

$$[0047] \quad \gamma_{r_n} = \frac{1}{K} \sum_{k \in \mathcal{K}} \gamma_{r_n}^k = \frac{p_{e_n} H(e_n, r_n)}{\sum_{e_i \in \mathcal{C}_{r_n}^{\mathbf{P}_e} \setminus \{e_n\}} \frac{1}{K} p_{e_i} H(e_i, r_n) + \sigma^2}.$$

[0048] 根据有限块长度下短数据包公式,D2D前向链路(源端到目的端)的误包率为

$$[0049] \quad \varepsilon_{r_n} = Q(f(\gamma_{r_n})),$$

[0050] 其中, $Q(x)=\int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 为高斯Q函数, t 为积分变量, dt 为 t 的一阶求导,

$f(\gamma)=\sqrt{\frac{L}{V(\gamma)}}\left(\log_2(1+\gamma)-\frac{\eta}{L}\right)$; L 为数据包长度, η 为传输的信息比特数, 且

$$V(\gamma)=\frac{\gamma(2+\gamma)}{(1+\gamma)^2}(\log_2 e)^2。$$

[0051] 步骤三: 计算竞争接入机制下D2D反向链路(目的端到源端)的误包率, 即源端 e_n 处的误包率。在竞争机制下, D2D对 n 在 K 个资源块上的接收信噪比为

$$[0052] \quad \gamma_{e_n} = \frac{p_{r_n} H(e_n, r_n)}{\sum_{r_i \in \mathcal{C}_{e_n}^{P_r} \setminus \{r_n\}} \frac{1}{K} p_{r_i} H(e_n, r_i) + \sigma^2},$$

[0053] 其中, p_{r_n} 为目的端 r_n 的发射功率, $H(e_n, r_n)$ 为源端 e_n 到目的端 r_n 的信道增益, σ^2 为噪声功率, $1/K$ 为D2D对 i 接入资源块 k 的概率; $\mathbf{P}_r = (p_{r_1}, \dots, p_{r_n}, \dots, p_{r_N})$ 为目的端发射功率组成的向量, $\mathcal{C}_{e_n}^{P_r} = \{r_m | p_{r_m} H(e_n, r_m) / \sigma^2 \geq \gamma_{th2}, m \in \mathcal{N}\}$ 为在向量 \mathbf{P}_r 下, 所有到源端 e_n 的信噪比超过 γ_{th2} 的目的端集合, 其中, γ_{th2} 为对源端 e_n 的接收造成干扰的信噪比阈值; r_m 为D2D对 m 的目的端, p_{r_m} 为目的端 r_m 的发射功率, $H(e_n, r_m)$ 为源端 e_n 到目的端 r_m 的信道增益; r_i 为D2D对 i 的目的端, p_{r_i} 为目的端 r_i 的发射功率, $H(e_n, r_i)$ 为源端 e_n 到目的端 r_i 的信道增益。

[0054] 根据有限块长度下短数据包公式, D2D反向链路(目的端到源端)的误包率为

$$[0055] \quad \varepsilon_{e_n} = Q(f(\gamma_{e_n})),$$

[0056] 其中, $Q(x)=\int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 为高斯Q函数, t 为积分变量, dt 为 t 的一阶求导,

$f(\gamma)=\sqrt{\frac{L}{V(\gamma)}}\left(\log_2(1+\gamma)-\frac{\eta}{L}\right)$; L 为数据包长度, η 为传输的信息比特数, 且

$$V(\gamma)=\frac{\gamma(2+\gamma)}{(1+\gamma)^2}(\log_2 e)^2。$$

[0057] 步骤四: 计算D2D触觉通信闭环环路的误包率。根据步骤二和步骤三, D2D触觉通信闭环环路的成功传输概率为

$$[0058] \quad \xi_n = (1 - \varepsilon_{r_n})(1 - \varepsilon_{e_n}) = 1 - \varepsilon_{r_n} - \varepsilon_{e_n} + \varepsilon_{r_n} \cdot \varepsilon_{e_n} \approx 1 - (\varepsilon_{r_n} + \varepsilon_{e_n})。$$

[0059] 由于 ε_{r_n} 和 ε_{e_n} 大致为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 数量级, 因此, 闭环环路的误包率可近似为

$$[0060] \quad \varepsilon_n = \varepsilon_{r_n} + \varepsilon_{e_n}。$$

[0061] 步骤五: 建立优化问题。网络中 N 个D2D对的总的误包率为

$$[0062] \quad \Phi = \sum_{n \in \mathcal{N}} \varepsilon_n。$$

[0063] 基于此, 在竞争接入机制下, 功率控制的优化目标为最小化系统的总误包率, 即

$$[0064] \quad Q: \min_{\mathbf{p}} \Phi$$

[0065] s. t.

$$[0066] \quad 1 \leq p_{r_n} \leq S, \forall n \in \mathcal{N}$$

$$[0067] \quad 1 \leq p_{e_n} \leq S, \forall n \in \mathcal{N}$$

$$[0068] \quad \varepsilon_n \leq \varepsilon_{th}, \forall n \in \mathcal{N}$$

[0069] 其中, $\mathbf{P} = (p_1, \dots, p_n, \dots, p_N)$ 为 N 个 D2D 对发射功率向量, $p_n = (p_{e_n}, p_{r_n})$ 由源端和目的端发射功率组成, S 为源端和目的端可采取的最大发射功率等级, ε_{th} 为每个 D2D 对的闭环环路误包率阈值。

[0070] 步骤六: 将优化问题建模为博弈。此优化问题为混合整数非线性规划问题, 拟采用博弈论进行求解。博弈模型为 $\mathcal{G} = [\mathcal{N}, \mathcal{S}, \{u_n\}_{n \in \mathcal{N}}]$, 其中 $\mathcal{N} = \{1, \dots, n, \dots, N\}$ 为博弈参与者的集合, $\mathcal{S} = \mathcal{S}_1 \times \dots \times \mathcal{S}_N$ 为策略空间, \mathcal{S}_n 为博弈参与者 n 的策略集。由于 $1 \leq p_{r_n}, p_{e_n} \leq S, \forall n \in \mathcal{N}$, 所以 \mathcal{S}_n 可以表示为

$$[0071] \quad \mathcal{S}_n = \left\{ \begin{array}{ccc} (1, 1) & \dots & (1, S) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (S, 1) & \dots & (S, S) \end{array} \right\}。$$

[0072] $u_n(p_n, p_{-n})$ 表示博弈参与者 n 的效用函数, 其中, p_n 为博弈参与者 n 的发射功率, p_{-n} 为除博弈参与者 n 以外, 其他博弈参与者的发射功率。在此模型中, $u_n(p_n, p_{-n})$ 被定义为

$$[0073] \quad u_n(p_n, p_{-n}) = - \left\{ \sum_{r_i \in \mathcal{D}_{e_n}^S} \varepsilon_{r_i} + \sum_{e_j \in \mathcal{D}_{r_n}^S} \varepsilon_{e_j} \right\},$$

[0074] 其中, r_i 为 D2D 对 i 的目的端, ε_{r_i} 为目的端 r_i 处的误包率; e_j 为 D2D 对 j 的源端, ε_{e_j} 为源端 e_j 处的误包率; $\mathcal{D}_{e_n}^S$ 为当源端 e_n 以发射功率 S 发送时, 所影响的目的端的集合, 即 $\mathcal{D}_{e_n}^S = \{r_m \mid p_{e_n} H(e_n, r_m) / \sigma^2 \geq \gamma_{th}, m \in \mathcal{N}\}$, 其中 $p_{e_n} = S$ 。同理, $\mathcal{D}_{r_n}^S$ 为当目的端 r_n 以发射功率 S 发送时, 所影响的源端的集合, 即 $\mathcal{D}_{r_n}^S = \{e_m \mid p_{r_n} H(e_m, r_n) / \sigma^2 \geq \gamma_{th}, m \in \mathcal{N}\}$, 其中 $p_{r_n} = S$ 。因此, u_n 物理含义为所有被博弈参与者 n 影响的源端和目的端的误包率之和。

[0075] 由此, 所提出的功率控制博弈可建模为

$$[0076] \quad \mathcal{G}: \max_{\mathbf{p}} u_n(p_n, p_{-n}), \forall n \in \mathcal{N}。$$

[0077] 步骤七: 求解博弈纳什均衡。采用同步对数线性学习 (SLL) 算法, 可以在没有信息交互和协调机制的前提下, 收敛到最优纳什均衡解, 即最小化竞争接入机制下所有 D2D 对的误包率之和。该算法是基于玻尔兹曼探索策略, 即参与者选择具有更高效用策略的概率大于具有较低效用策略的概率。因此, 玻尔兹曼探索策略被认为是摆脱局部最优并最终达到全局最优的有效方法。所提算法如下所示:

[0078] 算法 1 基于 SLL 的功率控制算法

[0079] 初始化: 令初始迭代时刻 $t = 0$, 初始化所有博弈参与者的功率向量 $\mathbf{p}(0) = \{p_1$

$(0), \dots, p_n(0)\}$, 其中 $p_n(0) \in \mathcal{S}_n, \forall n \in \mathcal{N}$ 且 $\varepsilon_n \leq \varepsilon_{th}, \forall n \in \mathcal{N}$ 。此外, 设置二进制指示变量 $b_n(0)=0, \forall n \in \mathcal{N}$ 。

[0080] 所有博弈参与者同时执行以下步骤:

[0081] Repeat

[0082] $t=t+1$

[0083] If $b_n(t-1) = 0$, 博弈参与者 n 按照以下规则更新其策略

$$\Pr[p_n(t) = p'] = \begin{cases} \frac{\delta_n}{|\mathcal{S}_n| - 1}, & p' \in \{\mathcal{S}_n \setminus p_n(t-1)\} \\ 1 - \delta_n, & p' = p_n(t-1) \end{cases}$$

[0084] 其中, p' 为博弈参与者 n 在 t 时刻所采取的策略; $|\mathcal{S}_n|$ 表示集合 \mathcal{S}_n 中元素的数量, δ_n 为博弈参与者 n 的探索速率。此外, 若 $p_n(t) \neq p_n(t-1)$, 设置 $b_n(t) = 1$; 否则, 设置 $b_n(t) = 0$ 。

[0085] End if

[0086] If $b_n(t-1) = 1$, 博弈参与者 n 按照以下规则更新其策略

$$\Pr[p_n(t) = p_n(t-1)] = \frac{\exp\{\hat{u}_n(t-1) \cdot \beta\}}{Y}$$

[0087] 其中, β 为学习参数, $\hat{u}_n(t-1)$ 和 $\hat{u}_n(t-2)$ 分别是博弈参与者 n 在时刻 $t-1$ 和 $t-2$ 的效用, $Y = \exp\{\hat{u}_n(t-1) \cdot \beta\} + \exp\{\hat{u}_n(t-2) \cdot \beta\}$ 。接着, 设置 $b_n(t) = 0$ 。

[0087] End if

[0088] If 约束条件 $\varepsilon_n \leq \varepsilon_{th}, \forall n \in \mathcal{N}$ 不能满足

[0089] 设置 $p(t) = p(t-1)$

[0090] End if

[0091] Until $\forall n \in \mathcal{N}, p_n$ 保持不变。

[0092] 参照附图4和附图5, 对本发明的效果做进一步的描述:

[0093] 本发明中仿真是基于软件MatlabR2016a。仿真参数参数设置如下: D2D对数目为10, 资源块数目为3, 实际量化功率集合为 $\{0.1, 0.2, 0.3\}$, 噪声功率-100dBm, D2D源端到目的端之间的距离为15m, 信噪比阈值 r_{th} 为20dB, 信息比特数目为400bits, 数据包长度为50channel use。因此, 每个博弈参与者的策略集合为

$$[0094] \quad \mathcal{S}_n = \left\{ \begin{array}{ccc} (0.1, 0.1) & (0.1, 0.2) & (0.1, 0.3) \\ (0.2, 0.1) & (0.2, 0.2) & (0.2, 0.3) \\ (0.3, 0.1) & (0.3, 0.2) & (0.3, 0.3) \end{array} \right\}.$$

[0095] 图4分析了所提博弈学习算法的收敛性。在图4a中, 经过多次迭代, 所提算法逐渐收敛到最优功率选择策略。需要注意的是, 即使算法达到了最优的功率选择, 仍然有可能跳出当前方案以探索未知领域, 如红色圆圈所示。最后, 当迭代次数足够大时, 所提算法将会收敛。图4b进一步展示了算法的收敛性。我们从10个D2D对中随机选取4个D2D对, 分别表示为D2D对1、D2D对2、D2D对3和D2D对4。当算法迭代次数足够大时, 每个D2D对的功率选择将会

收敛于一个特定的策略。

[0096] 图5分别展示了误包率与数据包长度和资源块数目的关系。其中“BR”为最优响应算法,即在每次算法迭代中,用户选择使自身效益最大的策略。如图5a所示,所有算法的误包率都随着数据包长度的增加而不断降低,直至趋近于0。在图5b中,随着资源块数目的增加,所有算法的误包率都在不断降低。这是因为,当资源块数目增加时,用户接入同一个资源块的概率将会降低。此外,当 $K \geq 10$ 时,每个用户都可以被分配一个专用的资源块,因此相互之间不会产生干扰。

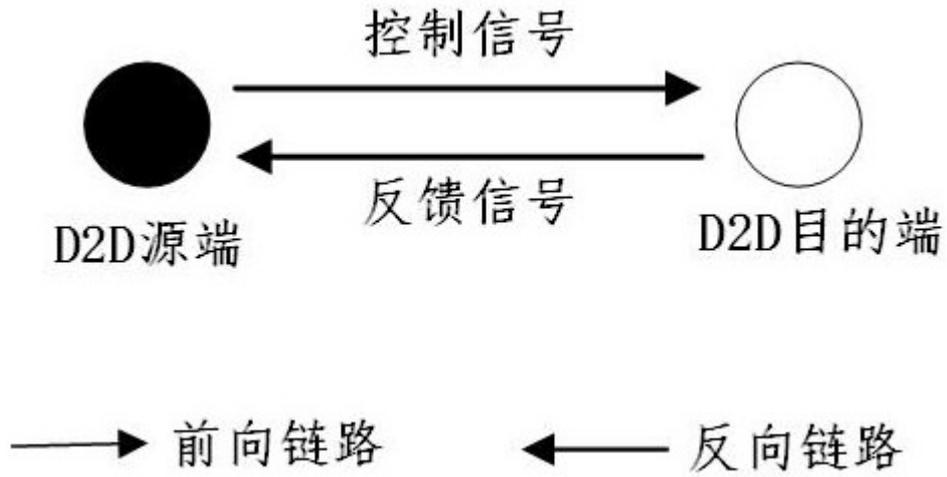


图1

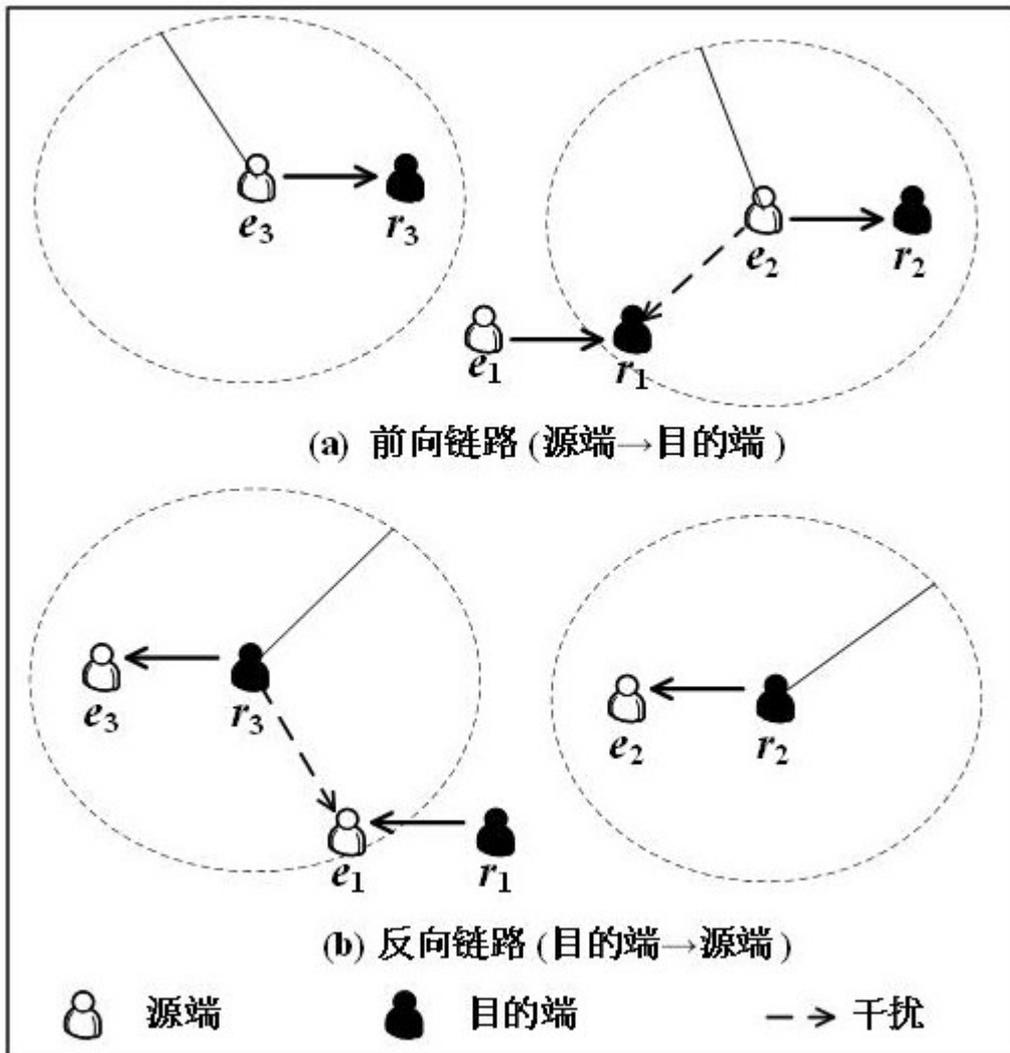


图2



图3

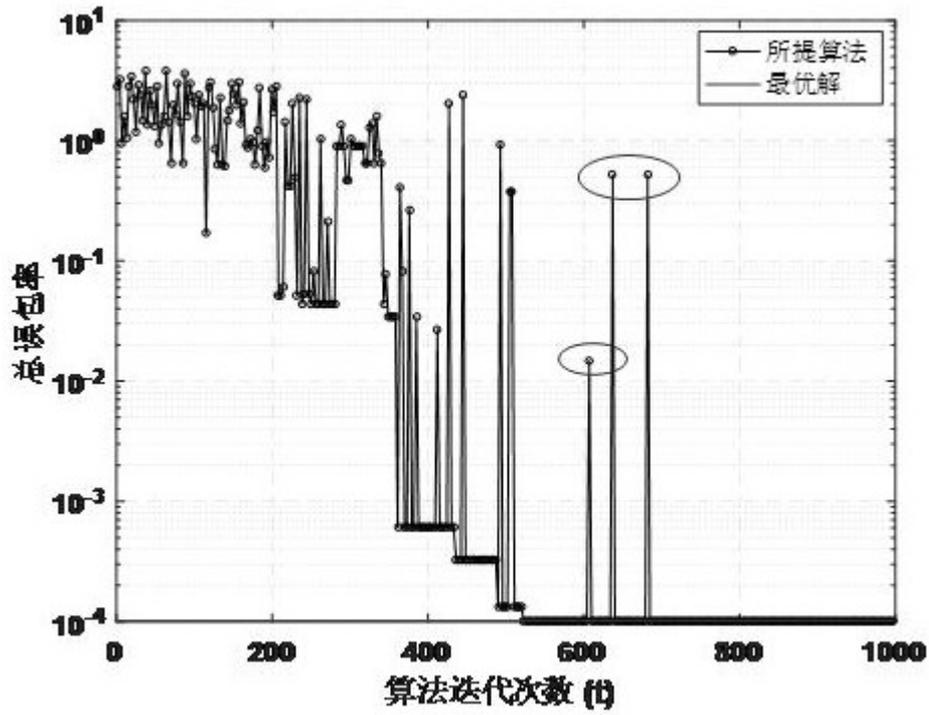


图4a

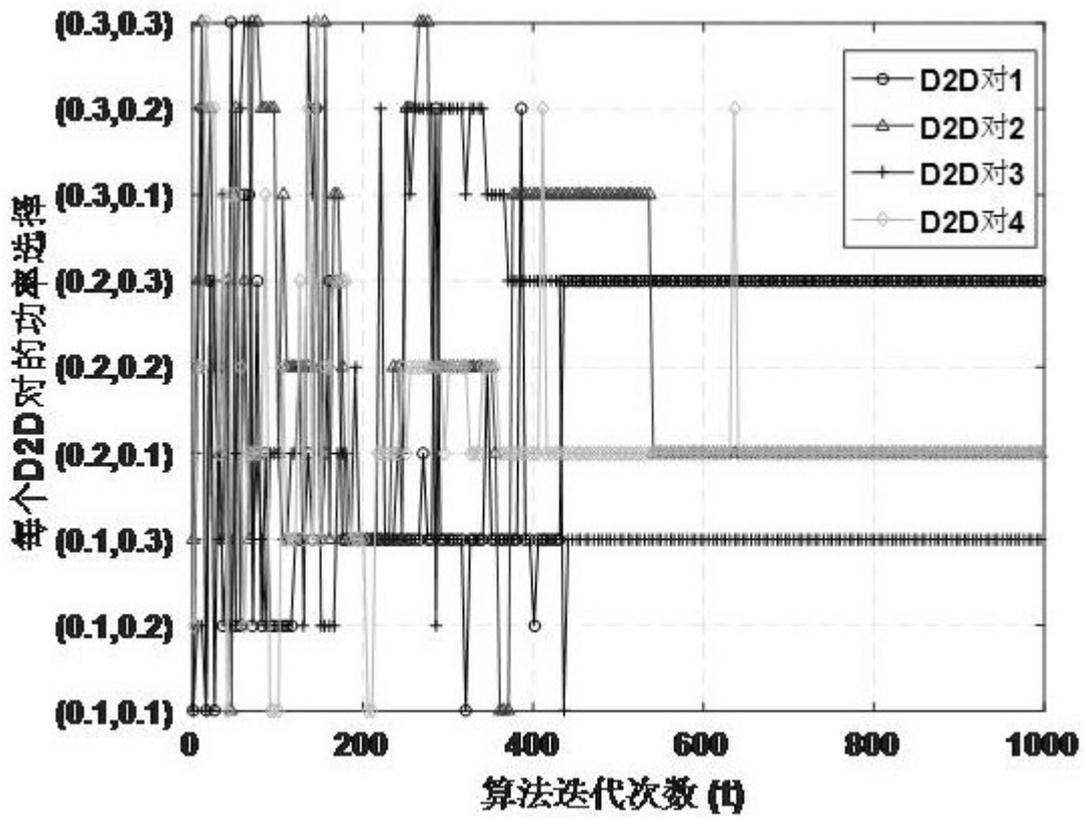


图4b

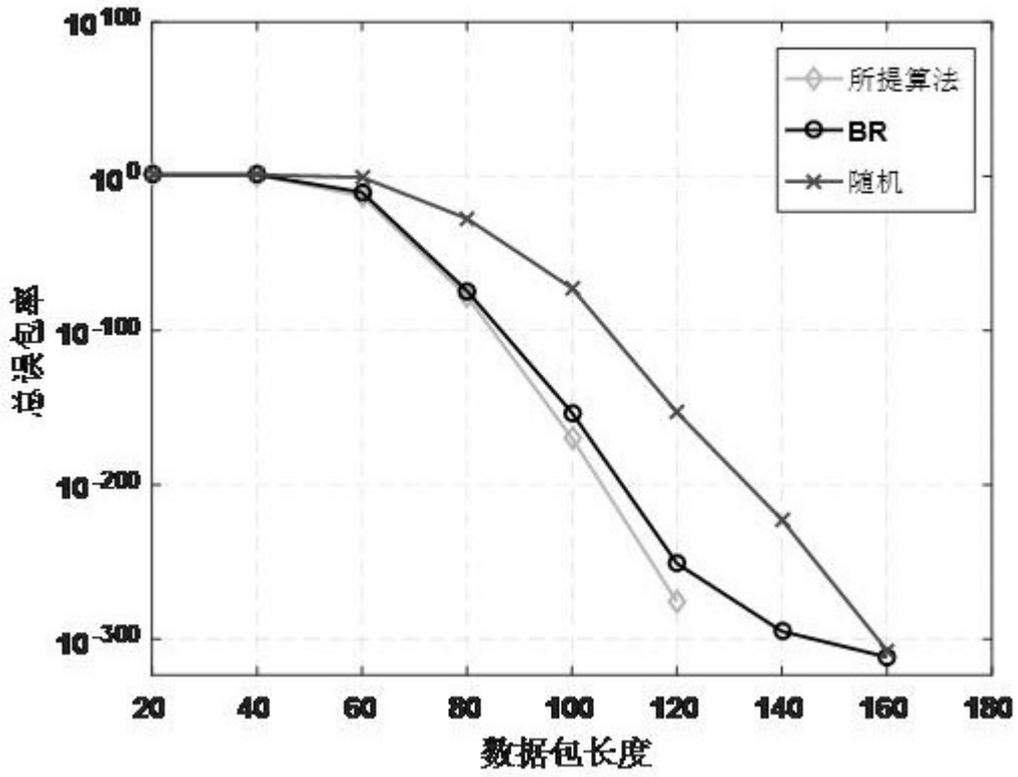


图5a

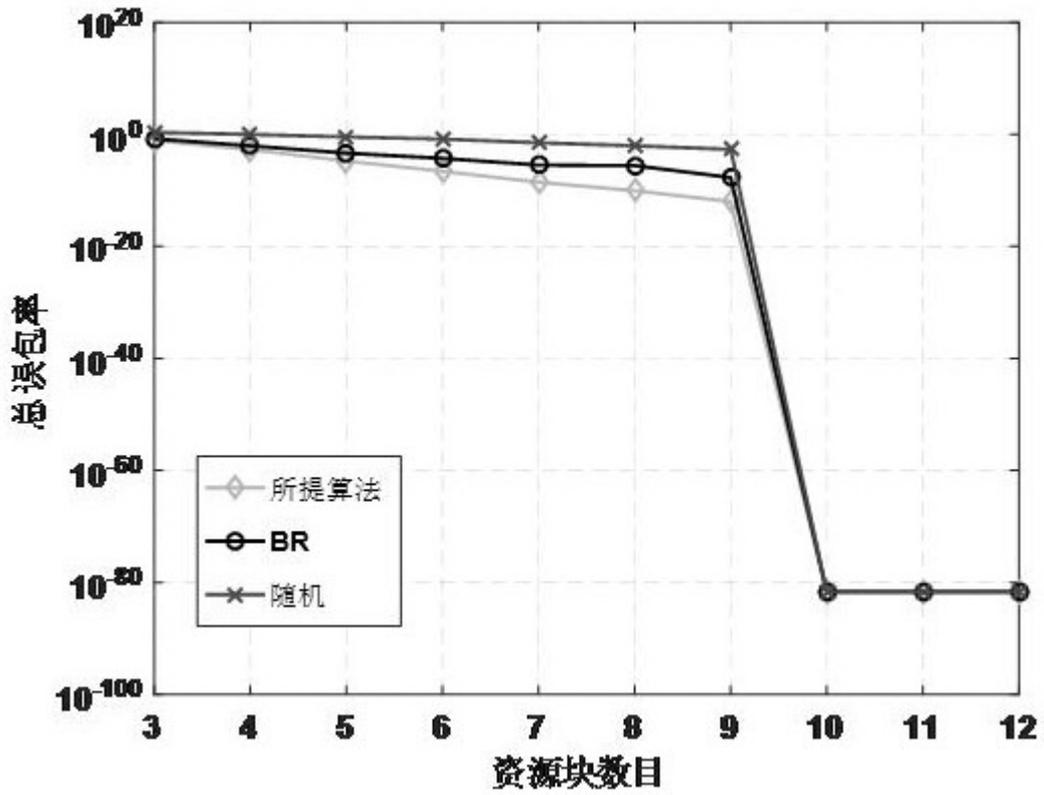


图5b