

D2D 通信网络中一种基于时间反演的无线资源优化机制

李方伟 张琳琳 朱江

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘要 针对 D2D(Device-to-Device)异构无线通信网络中 D2D 用户和蜂窝用户之间的干扰问题,提出一种基于时间反演的无线资源优化机制。该机制包括两个步骤:1)在上行传输系统中结合时间反演镜技术实现干扰消除,即对每个用户执行信道签名,提取有用信号,剔除干扰,获取系统用户信干噪比;2)根据用户信干噪比,采用功率控制算法并结合凸优化理论来调整用户的发射功率,以最大系统吞吐量为优化目标。仿真结果表明,该机制有效地抑制了 D2D 异构无线通信网络中蜂窝用户和 D2D 用户的相互干扰,提升了系统容量,同时满足了用户对通信可靠性的需求,保证了用户能够获得更高的 QoS(Quality of Service)。

关键词 D2D,时间反演,功率控制,QoS

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.10.015

Radio Resource Optimization Mechanism Based on Time-reversal in Device-to-Device Communication Network

LI Fang-wei ZHANG Lin-lin ZHU Jiang

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract Aiming at the interference between D2D users and cellular users in D2D heterogeneous wireless communication network, this paper proposed a radio resource optimization mechanism based on time-reversal. The mechanism includes two procedures: 1) the time-reversal mirror is combined to realize interference cancellation in the uplink transmission system, namely, the channel signature is performed for each user, so as to extract useful signals and remove interference while getting the SINR(Signal and Interference to Noise Ratio) of system users; 2) according to SINR, a power control algorithm is adopted to adjust user transmission power in combination with the convex optimization theory to maximize the throughput of system. Simulation results show that the proposed mechanism effectively suppresses mutual interference between cellular users and D2D users in the heterogeneous network, improves the system capacity, satisfies the requirement of reliability of communication, and ensures that users can obtain higher QoS(Quality of Service).

Keywords Device-to-Device, Time-reversal, Power control, Quality of service

随着 5G 时代的到来,各种移动通信系统不断演进,为了满足用户高质量、高速率的通信需求,高效率、低能耗的终端通信技术(D2D)应运而生^[1]。D2D 作为一代蜂窝通信的关键技术,其工作原理是终端复用传统蜂窝网络的链路资源,而非通过基站直接进行数据传输,提高了频谱利用率、系统吞吐量及能量有效性^[2-4]。但引入 D2D 给原本的网络带来了一系列新的干扰问题。由于 D2D 用户与蜂窝用户共享频谱资源, D2D 用户必然受到蜂窝用户的干扰,蜂窝通信同样受到 D2D 的干扰。如何有效抑制乃至消除这些干扰,已然引起了人们越来越多的关注,而如何利用现有的通信技术来提高系统的抗干扰能力是业内一直关注的重点之一。

对于上述问题,功率控制是解决 D2D 异构通信系统干扰问题的有效手段。文献[5]首次提出在 D2D 系统中采用功率

控制来提高系统吞吐量。文献[6]基于目前蜂窝网络用户对服务质量(QoS)的需求,同时为了提升 D2D 通信质量,介绍了一种通过功率测量反馈进行干扰认知资源分配的算法。文献[7]针对 D2D 通信系统下行链路,提出了一种有效分配频谱资源的序贯第二价格拍卖算法。文献[8]针对不同的资源共享模式,分析了共享相同资源的蜂窝用户和 D2D 用户之间的资源分配和功率优化问题,在功率限制和频谱效率限制的约束条件下为资源共享模式下的通信用户实现最优功率控制,从而提高了系统吞吐量,但其最大频谱效率受到调制与编码策略(Modulation and Coding Scheme, MCS)的限制。文献[9]在 D2D 异构上行通信系统中引入大规模多输入多输出(Massive Multiple-Input Multiple-Output, Massive MIMO)技术,研究了多小区场景下蜂窝用户和 D2D 用户传输的干扰问

收稿日期:2017-09-18 返修日期:2017-11-08 本文受国家自然科学基金(61771084,61271260,61102062),重庆市科委自然科学基金项目(cstc2015jcyjA40050),长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT16R72)资助。

李方伟(1960—),男,教授,主要研究方向为认知无线电、移动通信安全;张琳琳(1992—),女,硕士生,主要研究方向为移动通信安全,E-mail:2605990382@qq.com(通信作者);朱江(1977—),男,教授,主要研究方向为通信理论与技术、信息安全技术等。

题,并分别讨论了在理想信道状态信息(Channel State Information, CSI)和非理想 CSI 条件下的频谱效率及系统容量,然而依赖完美的 CSI 条件实现的频谱效率在实际场景中是不适用的。文献[10]为正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统提出了一种分布式资源分配算法来提升 D2D 吞吐量。但是,鉴于实际场景的应用情况,上述文献没有考虑用户传输的可靠性、设备的成本及计算复杂度等问题。

为此,本文引进时间反演(Time Reversal, TR)技术,该技术能在均匀或非均匀媒质中实现时间和空间的自适应同步聚焦^[11-14]。在丰富多径散射环境中,时间反演视多径信道为分布式天线,在时间域和空间域中实现优良的聚焦效应与 Massive MIMO 系统实现的效应类似,显著减小了发送功率,降低了干扰,提高了多径分集增益,并且具有更低的复杂度。为此,将时间反演技术应用在 D2D 异构无线通信系统中,借助时间反演本身固有的抗多径干扰能力及空-时聚焦特性收集多径信号的能量,从而实现较高的信干噪比,降低误码率,提升系统性能。

本文综合考虑了异构网络中 D2D 用户和蜂窝用户之间的干扰问题,根据文献[15-16]提出了基于时间反演技术的无线资源优化机制。本文所提机制包括两部分:1)干扰消除,即基站根据用户信道信息,利用时间反演镜对用户执行信道签名,提取有用信号,剔除干扰;2)功率控制,即根据第一部分获取的系统用户信干噪比确定蜂窝用户和 D2D 用户发送功率的调控因子,用以调控系统用户发送功率,降低蜂窝用户和 D2D 用户的相互干扰,提升系统容量。

1 系统模型

本文的系统模型如图 1 所示。考虑蜂窝网络 D2D 密集部署的异构网络上行传输系统,整个异构网络传输系统工作在单输入多输出(Single-Input Multiple-Output, SIMO)模式下,包括在一个单小区环境内中心只有一个基站(Base Station, BS),蜂窝用户均匀分布在整个小区,D2D 在小区内服从均匀分布,这里蜂窝用户采用单载波频分多址技术(Single-carrier Frequency-Division Multiple Access, SC-FDMA)。假定信道条件服从瑞利分布,为了尽可能模拟现实环境,信号会受到不同的信道选择性衰落(频率选择性衰落)。

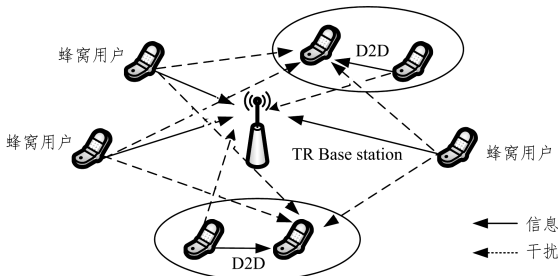


图 1 系统模型

Fig. 1 System mode

本文研究了 D2D 在蜂窝网络中采用复用模式进行通信,即 D2D 在上行链路中复用蜂窝用户的频谱资源,这样蜂窝用

户和 D2D 用户之间就会产生干扰,如图 1 所示,直线表示信息传输,虚线表示用户之间产生的干扰。

1.1 信道模型

根据时间反演上行链路传输模型^[15],结合 SIMO 工作方式,发送端(蜂窝用户或者 D2D)使用一根天线进行信息传输,而 M_r 和 N_r 分别表示基站和 D2D 接收端接收天线的数量。而本文的分析和研究结果可以扩展到多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)模式中。

在基站接收端收到的 $M_r \times 1$ 维信号,包括蜂窝用户和 D2D 用户发送的信号,可以写成如下形式:

$$y_{bs} = \sum_{i \in N} \alpha_{bsi} \sqrt{P_{ct}^{(i)}} H_{bs-ct}^{(i)} x_{ct}^{(i)} + \sum_{j \in M} \alpha_{bsj} \sqrt{P_{dt}^{(j)}} H_{bs-dt}^{(j)} x_{dt}^{(j)} + n_c \quad (1)$$

其中, N 表示蜂窝用户的数目;相应地, M 表示 D2D 用户的数目; $\alpha_{bsi} = \sqrt{d_{bs-i}^{-\alpha_c} \chi_{bs-i}}$ 为第 i 个蜂窝用户到基站的路径增益标量系数, d_{bs-i} 表示蜂窝用户 i 到基站的距离, α_c 表示用户到基站的路径损耗因子, χ_{bs-i} 表示蜂窝用户 i 到基站产生的阴影衰落,其服从对数正态分布; α_{bsj} 为第 j 个 D2D 用户到基站的路径增益标量系数; $P_{ct}^{(i)}$ 表示第 i 个蜂窝用户的发送功率; $P_{dt}^{(j)}$ 表示第 j 个 D2D 用户的发送功率,同时 $x_{ct}^{(i)}$ 为第 i 个蜂窝用户发送的符号信息; $x_{dt}^{(j)}$ 为第 j 个 D2D 用户发送的符号信息; $H_{bs-ct}^{(i)}$ 表示第 i 个蜂窝用户到基站所形成的信道拓普利兹矩阵; $H_{bs-dt}^{(j)}$ 表示第 j 个 D2D 用户到基站所形成的信道拓普利兹矩阵; n_c 表示在基站接收到的加性高斯白噪声,均值为 0、方差为 $\sigma^2 I_{M_r}$, I_{M_r} 表示 M_r 维单位矩阵。

同理,第 j 对 D2D 接收端接收到的 $N_r \times 1$ 维信号可表示为:

$$y_{dr} = \sum_{i \in N} \alpha_{di} \sqrt{P_{ct}^{(i)}} H_{dr-ct}^{(i)} x_{ct}^{(i)} + \sum_{j \in M} \alpha_{dj} \sqrt{P_{dt}^{(j)}} H_{dr-dt}^{(j)} x_{dt}^{(j)} + n_d \quad (2)$$

其中, $\alpha_{di} = \sqrt{d_{dr-i}^{-\alpha_d} \chi_{dr-i}}$ 为第 i 个蜂窝用户到第 j 对 D2D 用户接收端的路径增益标量系数,取决于蜂窝用户 i 到 D2D 接收用户 j 之间的距离 d_{dr-ct} ; α_d 表示蜂窝用户和 D2D 用户之间的路径损耗因子; χ_{dr-i} 表示蜂窝用户 i 到 D2D 接收用户之间的阴影损耗,其服从对数正态分布; α_{dj} 为第 j 对 D2D 发送用户到接收用户的路径增益标量系数; $H_{dr-ct}^{(i)}$ 表示第 i 个蜂窝第 j 对 D2D 接收用户 r 所形成的信道拓普利兹矩阵; $H_{dr-dt}^{(j)}$ 表示第 j 对 D2D 用户发送端和接收端之间形成的信道拓普利兹矩阵; n_d 为加性高斯白噪声,均值为 0、方差为 $\sigma^2 I_{N_r}$, I_{N_r} 表示 N_r 维单位矩阵。

不同的传播环境会导致不同的传播特性,本文定义了不同的路径损耗因子。假设发送符号信息为高斯信号,独立同分布,服从标准正态分布 $N(0,1)$ 。

结合时间反演,D2D 上行网络传输模型包括两部分:干扰消除和功率调控。在第一阶段,主要由 TR 技术实现干扰消除。TR 技术是一种空间信道匹配技术,可以提取有用信息并剔除干扰。在功率调控阶段,用户和基站之间反馈功率和信道质量等参数信息,从而形成影响系统的功率调控因子,

并与 TR 干扰消除技术共同对 D2D 上行网络实现干扰消除。

图 2 为本文所提无线资源优化方案的简略框图。

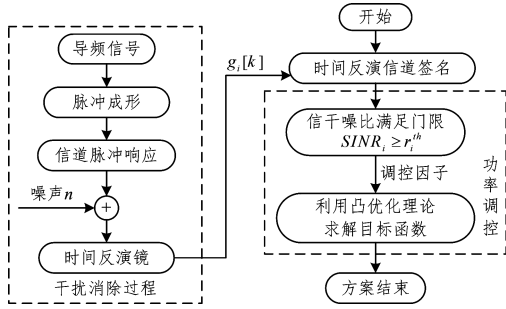


图 2 基于时间反演的 D2D 上行网络传输模型

Fig. 2 Uplink network transmission model of D2D communication based on time-reversal

2 干扰消除

在 D2D 密集部署的场景中,上行通信过程中出现了两对干扰,即 D2D 发送端对基站的干扰和蜂窝用户对 D2D 接收端的干扰。综合考虑码间干扰、用户间干扰、路径损耗、信道质量等参数对接收信号的影响,本文在传输系统中引入了干扰消除时间反演镜技术,利用其在多径散射环境中独特的空时聚焦特性来抵制系统中的多用户干扰和共道干扰等。相比目前无线通信系统主流的干扰消除技术(如自干扰消除技术),本文通过引入系统干扰消除因子,择优选择发送天线,抑制了系统自干扰。本文引入的时间反演技术在选择发送链路之后实现了信息的自适应聚焦,相当于空间信道匹配,以单天线的配置实现多天线的效果,因此降低了复杂度和设备成本。本文的干扰消除过程是基于空间信道匹配技术,并在调控因子的作用下提取信息,剔除干扰,因而干扰消除效果优于现有的主流自干扰消除技术。

$$SINR_{ct_i} = \frac{\alpha_{bs_i}^2 P_{ct}^{(i)} g_{ct_i}^H R_{bs_{-ct_i}}^{(0)} g_{ct_i}}{\alpha_{bs_i}^2 P_{ct}^{(i)} g_{ct_i}^H \hat{R}_{bs_{-ct_i}} g_{ct_i} + \sum_{k \neq i} \alpha_{bs_k}^2 P_{ct}^{(k)} g_{ct_k}^H R_{bs_{-ct_k}} g_{ct_k} + \sum_{j \in M} \alpha_{dj}^2 P_{dt}^{(j)} g_{dt_j}^H R_{bs_{-dt_j}} g_{dt_j} + \sigma^2} \quad (5)$$

$$SINR_{dr_j} = \frac{\alpha_{dj}^2 P_{dt}^{(j)} g_{dt_j}^H R_{dr_{-dt_j}}^{(0)} g_{dt_j}}{\alpha_{dj}^2 P_{dt}^{(j)} g_{dt_j}^H \hat{R}_{dr_{-dt_j}} g_{dt_j} + \sum_{k \neq j} \alpha_{dk}^2 P_{dt}^{(k)} g_{dt_k}^H R_{dr_{-dt_k}} g_{dt_k} + \sum_{i \in N} \alpha_{di}^2 P_{ct}^{(i)} g_{ct_i}^H R_{dr_{-ct_i}} g_{ct_i} + \sigma^2} \quad (6)$$

式(5)中定义信道相关矩阵 $R_{bs_{-ct_i}} = H_{bs_{-ct_i}}^{(i)H} H_{bs_{-ct_i}}^{(i)}$, $\hat{R}_{bs_{-ct_i}} = H_{bs_{-ct_i}}^{(i)H} H_{bs_{-ct_i}}^{(i)} - R_{bs_{-ct_i}}^{(0)}$, 其中,上标 H 表示共轭转置, $H_{bs_{-ct_i}}^{(i)}$ 表示第 i 个蜂窝用户到基站所形成的信道拓扑利兹矩阵; $H_{bs_{-ct_i}}^{(i)}$ 表示 $H_{bs_{-ct_i}}^{(i)}$ 的第 L 行向量。而对于 D2D 到基站信道相关矩阵 $R_{bs_{-dt_j}}$ 的定义方法如上。 $P_{ct}^{(i)} g_{ct_i}^H \hat{R}_{bs_{-ct_i}} g_{ct_i}$, $P_{ct}^{(k)} g_{ct_k}^H R_{bs_{-ct_k}} g_{ct_k}$, $P_{dt}^{(j)} g_{dt_j}^H R_{bs_{-dt_j}} g_{dt_j}$ 分别表示码间干扰 (Inter-Symbol Interference, ISI)、用户间干扰 (Inter-User Interference, IUI) 和同层间干扰 (Inter-Tier Interference, ITI) 等。D2D 通信对收发端之间的信道相关矩阵的定义方法如上。为了简化计算,本文假设不同信道噪声的功率相同。

为了简化表达式,对于系统上行链路的 ISI 和 IUI 部分,定义串扰矩阵为 Φ ,如果蜂窝用户 $k \neq i$, $\Phi_i^T = \Phi_k^T = [g_{ct_k}^H R_{bs_{-ct_k}} g_{ct_k}]^T$ 表示小区内其他蜂窝用户对发送用户 i 的干扰;如果 $k = i$,则 $\Phi_i^T = \Phi_k^T = [g_{ct_k}^H \hat{R}_{bs_{-ct_k}} g_{ct_k}]^T$ 。其中,上标 T 表示转置;

2.1 时间反演镜

基站接收端利用导频信号即直接序列扩频信号,通过脉冲成型器获得脉冲信号,进行信道探测,获取信道脉冲响应,将脉冲信号与多径信道响应的卷积视为等价信道响应;然后在发送端得到等价信道响应的时反演共轭形式,将信道响应的时反演的共轭形式作为时间反演处理器的传输函数。在丰富多径的环境下,有用信号通过时间反演处理器后进行多径传输,信号相当于实现了空间信道匹配,可提取出有用信号,剔除干扰。这里,设定蜂窝用户发送信号到基站接收端的时间反演镜为 $\{g_{ct_i}, \forall i\}$,即信道签名:

$$g_{ct_i}[k] = h_{bs_{-ct_i}}^{(i)*}[L-1-k] / \sqrt{\sum_{l=0}^{L-1} |h_{bs_{-ct_i}}^{(i)}[l]|^2} \quad (3)$$

其中, $*$ 表示共轭, $g_{ct_i}[k]$ 表示第 i 个蜂窝用户到基站的归一化时反演波形,即信道签名; $h_{bs_{-ct_i}}^{(i)}[l]$ 表示第 i 个蜂窝用户到基站具有长度 l 的信道延迟分布响应; $h_{bs_{-ct_i}}^{(i)*}[L-1-k]$ 表示第 i 个蜂窝用户发送的符号序列到基站的信道延迟分布响应(共轭表示此值为复数的情况); L 表示信道长度。

同理,设定第 j 对 D2D 发送端到接收端所获得的时间反演信道签名:

$$g_{dt_j}[k] = h_{bs_{-dt_j}}^{(j)*}[L-1-k] / \sqrt{\sum_{l=0}^{L-1} |h_{bs_{-dt_j}}^{(j)}[l]|^2} \quad (4)$$

其中, $g_{dt_j}[k]$ 表示第 j 对 D2D 发送端到接收端的归一化时反演波形,即信道签名; $h_{bs_{-dt_j}}^{(j)}[l]$ 表示第 j 对 D2D 发送端到接收端具有长度 l 的信道延迟分布响应; $h_{bs_{-dt_j}}^{(j)*}[L-1-k]$ 表示第 j 对 D2D 发送端发送的符号序列到接收端的信道延迟分布响应; L 表示信道长度。

2.2 用户信干噪比分析

基于上述信道签名,接收端通过时间反演镜对信号进行处理,得出信干噪比。该系统上行链路中第 i 个蜂窝用户和第 j 对 D2D 用户的信干噪比分别如式(5)和(6)所示。

P_{ct} 表示蜂窝用户的发送功率矩阵, P_{dt} 表示 D2D 用户的发送功率矩阵; A 表示第 j 个用户对蜂窝用户 i 造成的共道干扰,其取值为 $A_j^T = [g_{dt_j}^H R_{bs_{-dt_j}} g_{dt_j}]^T$; 此外,定义蜂窝用户 i 的对角矩阵为 $D_i = 1/\alpha_{bs_i}^2 g_{ct_i}^H R_{bs_{-ct_i}}^{(0)} g_{ct_i}$ 。可将上行链路第 i 个蜂窝用户在接收端的信干噪比式(5)改写成式(7):

$$\gamma_i^{ct} = SINR_{ct_i} = \frac{P_{ct}^{(i)}}{D_i (\Phi_i^T P_{ct} + A_j^T P_{dt} + \sigma^2)} \quad (7)$$

同理,第 j 对 D2D 用户在接收端的信干噪比式(6)可以改写成式(8):

$$\gamma_j^{dr} = SINR_{dr_j} = \frac{P_{dt}^{(j)}}{\tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \tilde{A}_i^T P_{ct} + \sigma^2)} \quad (8)$$

定义 D2D 用户 j 的非负对角矩阵为 $\tilde{D}_j = 1/\alpha_{dj}^2 g_{dt_j}^H R_{dr_{-dt_j}}^{(0)} g_{dt_j}$, $\tilde{A}_i^T = [g_{ct_i}^H R_{dr_{-ct_i}} g_{ct_i}]^T$ 表示第 i 个蜂窝用户对第 j 对 D2D 接收用户的同层干扰矩阵;相应地,如果 $k = j$, $\tilde{\Phi}_j^T = \tilde{\Phi}_k^T = [g_{dt_j}^H \hat{R}_{dr_{-dt_j}} g_{dt_j}]^T$ 表示 D2D 发送用户之间的码间干扰,如果

D2D 用户对 $k \neq j$, 则串扰矩阵 $\tilde{\Phi}_j^T = \tilde{\Phi}_k^T = [g_{d_j}^H R_{d_r \dots d_k} g_{d_j}]^T$ 表示小区内其他 D2D 发送用户对第 j 对 D2D 接收用户的干扰。

3 功率控制算法

为了满足异构通信系统中用户通信的质量要求,蜂窝用户和 D2D 用户的信干噪比须分别满足一定的门限值,才可保证蜂窝用户和 D2D 用户的 QoS。

3.1 功率调控因子

本文首先为蜂窝用户设置信干噪比门限,以确保蜂窝用户的通信要求,然后再设置 D2D 用户信干噪比门限,在确保 D2D 用户通信质量的情况下,对 D2D 用户的发送功率进行限制,以免对蜂窝用户造成强干扰。在此基础上,本文定义了蜂窝用户和 D2D 用户功率调控因子,利用功率调控因子进行功率调控,使得用户信干噪比值满足门限要求。因此,本文给出一种功率控制算法,如算法 1 所示。

算法 1 功率控制算法

Input: 设定蜂窝用户和 D2D 用户信干噪比门限为 γ_{ct}^{th} 和 γ_{dr}^{th} ; 蜂窝用户和 D2D 用户的功率调控因子分别满足 $0 \leq \lambda \leq \sigma_{ct}$, $0 \leq \mu \leq \sigma_{dr}$; 蜂窝用户和 D2D 用户在每个信道上的信干噪比分别为 SINR_{ct_i} , SINR_{dr_j} , $i \in N, j \in M$ 。

Step 1 计算蜂窝用户的调控信干噪比:

$$\text{SINR}_{ct_i} = \gamma_i^{\text{ct}} = \frac{\lambda P_{ct}^{(i)}}{D_i (\Phi_i^T P_{ct} + \mu A_j^T P_{dt} + \sigma^2)}$$

为保证蜂窝用户的 QoS: $\gamma_i^{\text{ct}} \geq \gamma_{ct}^{\text{th}}, \forall i \in N$ 。

Step 2 计算 D2D 用户的调控信干噪比:

$$\text{SINR}_{dr_j} = \gamma_j^{\text{dr}} = \frac{\mu P_{dt}^{(j)}}{\tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \lambda \tilde{A}_j^T P_{ct} + \sigma^2)}$$

为保证 D2D 用户的 QoS: $\gamma_j^{\text{dr}} \geq \gamma_{dr}^{\text{th}}, \forall j \in M$ 。

Step 3 根据 Step 1 和 Step 2 确定 λ 和 μ , 基站将值反馈给用户,更新用户的发送功率;重复 Step 1 和 Step 2,直至所有用户的发送

$$L(\lambda, \mu, \alpha, \beta, \theta, \epsilon) = \sum_{i=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i P_{ct}^{(i)}}{D_i (\Phi_i^T P_{ct} + \mu_i A_j^T P_{dt} + \sigma^2)} \right) + \sum_{j=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\mu_j P_{dt}^{(j)}}{\tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \lambda_j \tilde{A}_j^T P_{ct} + \sigma^2)} \right) - \alpha \left(\frac{\gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i A_j^T \tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \sigma^2) + \gamma_{ct}^{\text{th}} D_i (\Phi_i^T P_{ct} + \sigma^2)}{P_{ct}^{(i)} (I - \gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i A_j^T \tilde{D}_j \tilde{A}_j^T)} - \lambda_i \right) - \beta (\lambda_i - \sigma_{ct}) - \theta \left(\frac{\gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i \tilde{A}_j^T \tilde{D}_j (\Phi_i^T P_{ct} + \sigma^2) + \gamma_{dr}^{\text{th}} \tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \sigma^2)}{P_{dt}^{(j)} (I - \gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i A_j^T \tilde{D}_j \tilde{A}_j^T)} - \mu_j \right) - \epsilon (\mu_j - \sigma_{dr}) \quad (12)$$

其中, $\alpha, \beta, \theta, \epsilon$ 是拉格朗日乘子,为常数。计算偏导 $\partial L(\lambda, \mu, \alpha, \beta, \theta, \epsilon) / \partial \lambda_i = 0$ 得:

$$\lambda_i = \left[\delta - \frac{1}{H_i} \right]^+ \quad (13)$$

其中, $[\varphi]^+ = \max\{0, \varphi\}$, $H_i = P_{ct}^{(i)} / D_i (\Phi_i^T P_{ct} + \mu_i A_j^T P_{dt} + \sigma^2)$, $\delta = 1 / (\beta - \alpha) \ln 2$ 为注水线。相应地,计算偏导 $\partial L(\lambda, \mu, \alpha, \beta, \theta, \epsilon) / \partial \mu_j = 0$ 得:

$$\mu_j = \left[\eta - \frac{1}{H_j} \right]^+ \quad (14)$$

其中, $H_j = P_{dt}^{(j)} / \tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \lambda_j \tilde{A}_j^T P_{ct} + \sigma^2)$, $\eta = 1 / (\epsilon - \theta) \ln 2$ 为注水线。

4 复杂度分析

为了降低设备及算法的复杂度,并兼顾接收效果和能耗,本文在此目标下进行优化。

功率更新完毕。

根据算法 1 化简的调控因子 λ 和 μ 分别满足上限,如式(9)和式(10)所示。

$$\lambda \geq \frac{\gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i A_j^T \tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \sigma^2) + \gamma_{ct}^{\text{th}} D_i (\Phi_i^T P_{ct} + \sigma^2)}{P_{ct}^{(i)} (I - \gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i A_j^T \tilde{D}_j \tilde{A}_j^T)} \quad (9)$$

$$\mu \geq \frac{\gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i \tilde{A}_j^T \tilde{D}_j (\Phi_i^T P_{ct} + \sigma^2) + \gamma_{dr}^{\text{th}} \tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \sigma^2)}{P_{dt}^{(j)} (I - \gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i A_j^T \tilde{D}_j \tilde{A}_j^T)} \quad (10)$$

接收端会确定合适的功率调控因子 λ 和 μ ,然后将 λ 和 μ 的值发送给蜂窝用户和 D2D 用户,用户根据收到的值进行相应的功率调控。

3.2 功率优化目标

结合功率调控因子约束条件式(9)、式(10),构建以系统用户的信道容量最大化为优化目标的函数如下:

$$\max \left(\sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i P_{ct}^{(i)}}{D_i (\Phi_i^T P_{ct} + \mu_i A_j^T P_{dt} + \sigma^2)} \right) + \sum_{j=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\mu_j P_{dt}^{(j)}}{\tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \lambda_j \tilde{A}_j^T P_{ct} + \sigma^2)} \right) \right)$$

s. t.

$$\begin{aligned} C1 & \frac{\gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i A_j^T \tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \sigma^2) + \gamma_{ct}^{\text{th}} D_i (\Phi_i^T P_{ct} + \sigma^2)}{P_{ct}^{(i)} (I - \gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i A_j^T \tilde{D}_j \tilde{A}_j^T)} \leq \lambda \\ C2 & \frac{\gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i \tilde{A}_j^T \tilde{D}_j (\Phi_i^T P_{ct} + \sigma^2) + \gamma_{dr}^{\text{th}} \tilde{D}_j (\tilde{\Phi}_j^T P_{dt} + \sigma^2)}{P_{dt}^{(j)} (I - \gamma_{ct}^{\text{th}} \gamma_{dr}^{\text{th}} D_i A_j^T \tilde{D}_j \tilde{A}_j^T)} \leq \mu \\ C3 & \lambda \leq \sigma_{ct} \\ C4 & \mu \leq \sigma_{dr} \\ C5 & P_{dt} \geq 0 \\ C6 & P_{ct} \geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

根据功率控制规划目标,由卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件得到:

首先,利用时间反演干扰消除过程对所有用户执行信道签名轮询,时间复杂度为 $O(N)$;其次,对每个通信用户进行功率调控,其复杂度同上;最后,结合 KKT 求解系统用户的最优功率以使信道容量最大时,其复杂度为 $O(QN^2)$ 。因此,算法的复杂度为 $O(NQ^2)$ 。其中, Q 为迭代次数, M 表示 D2D 通信对数, N 表示蜂窝用户数。

5 仿真结果

本节通过系统级的仿真平台对提出的方案进行仿真验证,并与相应的方案进行比较,最后对提出的方案进行性能分析。

以 3GPP 标准规定的城市部署场景来^[17]模拟 D2D 异构通信网络中蜂窝用户及 D2D 用户到基站的传播场景。信道增益主要考虑了路径损耗、阴影衰落、天线增益以及使用瑞利多径信道的频率选择性衰落。在系统仿真中,具体的仿真参

数如表 1 所列。本文分别从系统吞吐量、系统误码率以及用户的信干噪比等方面分析了改进方案对系统性能的影响。因用于对比的比传统方案是闭环功率控制(Closed-Loop Power Control, CLPC)算法及文献[8]提出的贪婪资源分配算法。本文改进方案是基于时间反演技术的功率控制(Power Control and Time Reversal, PC-TR)算法。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	参数值
小区半径/m	500
载波频率/GHz	2.0
TTL/ms	1
蜂窝用户数	50
D2D对数	5~50
RB带宽/kHz	180
蜂窝用户最大发射功率/dBm	23
D2D用户最大发射功率/dBm	10
噪声功率谱密度/(dBm/Hz)	-174
基站接受噪声系数/dB	5
用户接收噪声系数/dB	9
D2D用户之间的路径损耗	自由空间模型 ^[18]
其他用户之间的路径损耗	COST231 Hata模型 ^[18]
阴影衰落模型/dB	标准差为7的正态分布

图 3 为不同方案的小区用户吞吐量 CDF 曲线图。将传统功率控制方案和加入 TR 技术前后的方案进行对比,可以看出 TR 技术可以有效提高系统吞吐量。这是因为利用 TR 技术具有的空-时聚焦特性,可以抑制多径干扰、用户间干扰等,实现较高的干扰减轻比,从而提高系统容量。相比于传统方案 & TR 干扰消除技术,改进方案中提出的功率控制算法在提升系统容量方面的性能更优,且改进方案在获得系统吞吐量的性能方面逼近贪婪资源分配方案。

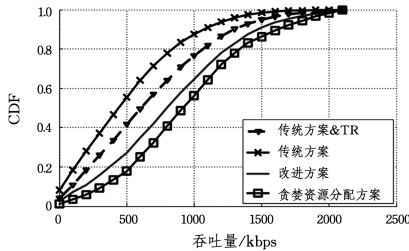


图 3 用户吞吐量

Fig. 3 User throughput

图 4 给出了不同方案的 D2D 通信对数对系统吞吐量的影响趋势。

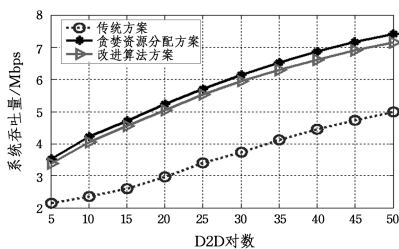


图 4 系统吞吐量

Fig. 4 System throughput

可以看出,随着 D2D 通信对数的增加,3 种资源分配方案下系统总容量都呈现增长趋势。在改进方案中,系统总体的吞吐量要远远大于采用传统方案算法获得的系统吞吐量,

而且逼近贪婪资源分配算法。越是在多径干扰大的环境下,改进方案采用的 TR 技术利用自身的空-时聚焦特性在目标聚焦的性能越好,在有效抑制系统干扰方面具有优势,极大地改善了通信效果。

图 5 为不同方案下蜂窝用户和 D2D 用户误码率的关系图。可以看出,提出的 PC-TR 方案在蜂窝用户和 D2D 用户通信方式上的误码率明显低于 CLPC 下蜂窝用户和 D2D 用户的误码率,且从表 2 中可以看出误码率偏差约低 0.01%。在 D2D 通信过程中,随着 D2D 通信对数的不断增多,蜂窝系统受到的干扰逐渐增大,从图 5 中可看出,3 种方案的误码率都随之变大,而此时改进方案中蜂窝用户和 D2D 用户的误码率接近贪婪资源分配方案。可以得出,改进方案可以有效降低 D2D 异构无线系统中的干扰,且具有一定的稳定性,在提升系统通信质量和系统抗干扰性能方面具有一定的优势。

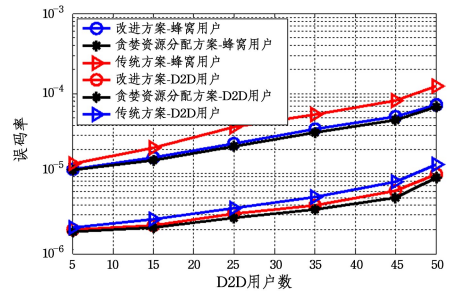


图 5 误码率对比

Fig. 5 Comparison of bit error rate

如表 2 所列,不同方案的 D2D 用户误码率偏差都要低于蜂窝用户,这是因为:1)D2D 用户共享蜂窝用户的链路资源,对蜂窝用户产生了一定的干扰,从而影响蜂窝用户的通信质量;2)D2D 用户之间的通信距离相对较短,发送功率大,路径损耗、阴影衰落等影响相对较小,通信环境较佳,因此 D2D 用户的误码率较低,能获得较好的通信质量。

表 2 误码率偏差的对比

Table 2 Comparison of bit error rate deviation

(单位:%)

方案	D2D 用户	蜂窝用户
改进方案	0.0074	0.0283
贪婪资源分配方案	0.0025	0.0221
传统方案	0.0197	0.0374

表 3 列出了实验次数为 1000 时不同算法中蜂窝用户和 D2D 通信对的平均 SINR。从表 3 中可以看出,D2D 通信对的正 SINR 明显比蜂窝用户的 SINR 高。这是因为,D2D 通信对采用短距离直接通信方式,受到的干扰相对较小,所以损耗较低。改进算法中蜂窝用户和 D2D 用户的平均 SINR 要远大于传统算法,而相比贪婪资源分配算法只稍显不足,且复杂度更低,说明本文提出的算法性能较好,适合应用于实际场景中。

表 3 平均 SINR 的对比

Table 3 Comparison of average SINR

(单位:dB)

方案	D2D 用户	蜂窝用户
改进方案	20.83	13.98
贪婪资源分配方案	23.19	15.08
传统方案	15.55	7.81

压缩数据对误码的敏感性,为文本压缩数据的容错译码提供了新思路。

参考文献

- [1] JOSE S T, KULKARNI A A. Linear programming-based converses for finite blocklength lossy joint source-channel coding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2017, 63(11): 7066-7094.
- [2] KOSTINA V, POLYANSKIY Y, VERDÚ S. Joint source-channel coding with feedback[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2017, 63(6): 3502-3515.
- [3] PERSSON D, KRON J. Joint source-channel coding for the MIMO broadcast channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 60(4): 2085-2090.
- [4] YU L. Hybrid digital-analog joint source-channel coding[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)

于磊. 混合数字模拟的联合信源信道编码研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.

- [5] JACQUET P, SZPANKOWSKI W. On the limiting distribution of lempel ziv'78 redundancy for memoryless sources[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(11): 6917-6930.
- [6] FRENKEL S, KOPEETSKY M, MOLOTKOVSKI R. Lempel-Ziv-Welch compression algorithm with exponential Decay[C]// 2016 Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management, 2016: 616-619.
- [7] LONARDI S, SZPANKOWSKI W, WARD M D. Error resilient LZ'77 data compression: Algorithms, analysis, and experiments [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(5): 1799-1813.
- [8] SALOMON D. Data compression-The complete reference(4th edition)[M]. London: Springer-Verlag, 2007.
- [9] BLELLOCH G E. Introduction to data compression[EB/OL]. <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/psico-guyb/real-world/www/compression.pdf>, 2001.

(上接第 82 页)

结束语 本文讨论了 D2D 异构通信系统中的无线资源优化问题,提出了基于时间反演的无线资源优化机制。该机制包括时间反演信道签名方法和功率控制算法,在保证用户 QoS 需求的前提下,不仅能有效地抑制 D2D 异构网络中的干扰,而且能降低误码率,同时满足用户对可靠性的需求,保证用户的通信质量。

参考文献

- [1] LIN X, ANDREWS J G, GHOSH A, et al. An overview of 3GPP device-to-device proximity services [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2014, 52(4): 40-48.
- [2] CHANG J, MA Y, CHENG W, et al. Relay selection and power allocation for device-to-device communication underlying heterogeneous cellular networks[C]// *IEEE International Conference on Computer and Communications*, IEEE, 2017: 2891-2896.
- [3] YANG T, ZHANG R, CHENG X, et al. Graph Coloring Based Resource Sharing (GCRS) Scheme for D2D Communications Underlying Full-Duplex Cellular Networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, PP(99): 1-1.
- [4] ZHANG H, LIAO Y, SONG L. D2D-U: Device-to-Device Communications in Unlicensed Bands for 5G System[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6): 3507-3519.
- [5] DOPPLER K, RINNE M, WIJTING C, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 47(12): 42-49.
- [6] JANIS P, KOIVUNEN V, RIBEIRO C, et al. Interference-Aware Resource Allocation for Device-to-Device Radio Underlying Cellular Networks[C]// *Vehicular Technology Conference, 2009(Vtc Spring 2009)*. IEEE, 2009: 1-5.
- [7] XU C, SONG L, HAN Z, et al. Interference-aware resource allocation for device-to-device communications as an underlay using sequential second price auction[C]// *IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2012: 445-449.
- [8] YU C H, DOPPLER K, RIBEIRO C B, et al. Resource Sharing

Optimization for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(8): 2752-2763.

- [9] LIN X, HEATH R W, ANDREWS J G. The Interplay Between Massive MIMO and Underlaid D2D Networking [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 14(6): 3337-3351.
- [10] YE Q, AL-SHALASH M, CARAMANIS C, et al. Distributed Resource Allocation in Device-to-Device Enhanced Cellular Networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(2): 441-454.
- [11] FINK M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1992, 39(5): 555-566.
- [12] XU Q, CHEN Y, LIU K J R. Combating Strong-Weak Spatial-Temporal Resonances in Time-Reversal Uplinks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(1): 568-580.
- [13] VITERI-MERA C A, TEIXEIRA F L. Equalized Time Reversal Beamforming for Frequency-Selective Indoor MISO Channels [J]. *IEEE Access*, 2017, PP(99): 1-1.
- [14] CHEN Z, ZHAO Y, ZHAO D. Multipath effects on time reversal OFDM communications between wireless sensors[C]// *International Symposium on Antennas, Propagation and Em Theory*. IEEE, 2017: 376-379.
- [15] CHEN Y, HAN F, YANG Y H, et al. Time-Reversal Wireless Paradigm for Green Internet of Things: An Overview[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, 1(1): 81-98.
- [16] HAN F, YANG Y H, WANG B, et al. Time-Reversal Division Multiple Access over Multi-Path Channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(7): 1953-1965.
- [17] A TR-T. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA): Radio frequency (RF) system scenarios [S]. France: 3GPP, 2010.
- [18] MOHAMAD, RAMLI H A M. Performance Study of Path Loss Models for LTE-A Relay Stations[C]// *International Conference on Computer and Communication Engineering*. IEEE, 2017: 332-336.