



面向 5G 的 D2D 簇内信息共享机制

汪少敏¹, 周斌^{2,3}

(1. 中国电信股份有限公司上海研究院, 上海 200122;

2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

3. 上海无线通信研究中心, 上海 201210)

摘要: D2D(device-to-device)通信是 5G 网络中的重要技术,有利于提升数据分发业务传输效率;然而,由于 D2D 通信引入了大量额外信令开销,当前的增强多播方案无法解决高效数据传输与低效信令流程之间的矛盾,降低了整体性能增益。为此,提出了一种基于多维矢量分析的最小化信令开销的 D2D 簇内信息共享算法,包含集中式与分布式两种实现方式,能通过自适应地选择 D2D 多播重传发射者和多播重传数据分组,大幅减少簇内重传次数,达到显著降低信令开销和传输时延的目的。

关键词: D2D 通信;信令开销;数据分发;多播传输;5G

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016019

5G-oriented information sharing mechanism within D2D clusters

WANG Shaomin¹, ZHOU Bin^{2,3}

1. Shanghai Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Shanghai 200122, China

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

3. Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 201210, China

Abstract: Device-to-Device (D2D) communication is an important technology in 5G network. It helps to improve the transmission efficiency of data dissemination services. However, due to the extra signaling overhead caused by D2D communications, currently most of enhanced-multicast solutions cannot solve the contradiction between high-efficient data transmission and low-efficient signaling procedure, so as to reduce the overall performance gain. An intra-cluster D2D information sharing algorithm based on matrix analysis which includes centralized and distributed modes was proposed. The proposed algorithm could significantly reduce D2D retransmission times in clusters by adaptively selecting the optimal transmitters and data packets for D2D multicast retransmission, achieving the aim of reducing signaling overhead and transmission delay.

Key words: D2D communication, signaling overhead, data dissemination, multicast transmission, 5G

收稿日期: 2015-06-03; 修回日期: 2015-11-16

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(No.13ZR1440700)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Shanghai (No.13ZR1440700)



1 引言

5G 是 4G 移动通信技术的延伸,4G 是 5G 网络的基础,资源利用率将提高 10 倍以上,系统吞吐率提高 25 倍,频率资源扩展 4 倍左右。为了达到这个目标,5G 采用了多项关键技术,包括高频段传输、新型多天线传输、同时同频全双工、密集组网技术和超密集组网、D2D (device to device) 和新型网络架构^[1]。其中,D2D 是 5G 网络的一项重要技术,增加了蜂窝通信系统频谱效率,降低了终端发射功率,在一定程度上解决了无线通信系统频谱资源匮乏的问题。

在当前基于基础设施的移动通信网络中,基站(BS)作为小区内的中心控制节点,是移动设备(终端)获得网络服务的唯一接入点。移动设备只能通过蜂窝上行或下行链路与网络中某个特定基站进行无线通信。然而研究表明^[2-5],当多个移动设备彼此接近时,如果能实现设备间直接通信(即 D2D 通信),会给传统的蜂窝系统带来许多显著性能增益,如更高的无线资源利用率、更长的电池使用时间、更大的信号覆盖范围以及更低的网络干扰水平。近年来,采用 D2D 技术增强传统蜂窝网络已经成为一个颇具前景的新概念并受到广泛重视。上述 D2D 增强型蜂窝网中,一方面,设备间的直接通信可以受益于蜂窝网的集中式控制架构;另一方面,高质量短距离的 D2D 无线链路有助于大幅提高蜂窝通信网的传输效率。

D2D 通信在蜂窝网的一种典型应用为簇内信息共享。传统的数据分发(data dissemination)业务^[6](如数据下载和实时视频),可以通过 D2D 通信而显著提高效率^[6,7]。D2D 还能实现对蜂窝网中多段无线链路的高效聚合,满足特定场景下的传输带宽需求^[8]。鉴于 D2D 簇内信息共享的诸多性能优势^[2-4],本文以通过 D2D 通信增强的蜂窝下行数据分发(简称为 D2D 增强多播)为研究对象。

D2D 通信受基站直接控制且工作在蜂窝系统授权频段^[4],簇内信息共享过程中的每次多播传输都需要蜂窝系统的下行信令支持,如 D2D 多播传输调度资源、终端的收发状态通知。因此,为了节省系统的信令开销,有必要尽可能减少 D2D 传输与重传的次数,实现信令开销和传输效率联合优化。这是当前 D2D 增强多播的主要缺陷,也是提升数据分发整体效率的关键所在。

现有移动网络中的重传由数据分组的初始发射者发起,该机制如果直接应用在 D2D 簇内信息共享的场景中,

会导致重传次数过多,信令开销和分发时延也同比例急剧上升^[9]。为此,本文在具体分析了现有算法的缺陷后,提出了一种适用于该场景的信令开销建模与分析方法。以此为理论基础,设计了一种基于多维矢量分析的 D2D 簇内信息共享算法,包含集中与分布两种实现方式。该算法通过对簇内共享状态的实时收集与分析,自适应地选择最佳重传发射者和待重传数据分组,有效减少簇内重传次数,达到最小化信令开销的目的。

2 系统模型

以 D2D 通信(或簇内信息共享)增强的下行数据分发方案由图 1 所示。首先,多个已接入蜂窝网且地理位置彼此接近的移动设备,通过协商建立起 D2D 簇。同簇的移动设备除了可以进行正常蜂窝上下行通信外,还能在 D2D 链路上进行设备间直接通信。在传统数据分发方案中,当 D2D 簇中的所有设备都希望从云端下载同一个数据文件,每个设备都需要通过各自的蜂窝下行链路从所属基站接收完整的该文件(设为 C byte),如图 1(a)所示。而通过使用 D2D 簇内信息共享增强的蜂窝下行数据分发方案,基站侧的完整数据文件被切分为若干个数据块(假设为 3 块,大小为 C_1 、 C_2 和 C_3 且 $C_1+C_2+C_3=C$),簇内每个设备分别通过各自的蜂窝下行链路接收其中的一个数据块;然后,为了在各个设备处重新产生完整的数据文件,簇内每个设备需要将自己成功收到的数据块转发给簇内其他所有的设备,该过程称为“D2D 簇内信息共享”。经过多次 D2D 簇内信息共享和交换后,完整的数据文件可成功地从蜂窝基站侧被传送到 D2D 簇内的每个移动设备侧。上述方案同时使用了蜂窝下行链路和 D2D 直接链路,通过 D2D 通信实现了提高下行数据分发效率与吞吐量的目的,如图 1(b)所示。

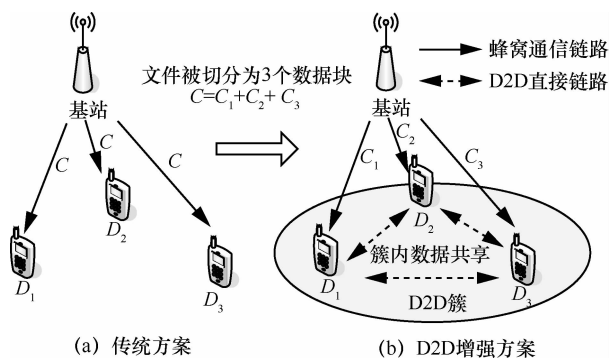


图 1 传统多播和 D2D 增强多播的系统模型

本文关于 D2D 通信的研究假设如下。

首先, D2D 通信作为移动蜂窝通信网的补充和增强, 必须能够与蜂窝通信网络共存。D2D 通信和蜂窝通信采用相同的空口技术并工作在时分双工模式下。D2D 通信占用蜂窝网授权频段。为了降低干扰, D2D 和蜂窝通信尽可能使用正交时频资源。

其次, D2D 通信在蜂窝基站控制下进行, 基站采用集中式调度的无线资源管理策略。蜂窝下行单播和 D2D 簇内信息共享可通过时分复用而共存于每个物理子帧。通常假设 D2D 簇内信息共享部分原上行时隙。此外, 蜂窝系统需要设计额外的 D2D 控制信令, 实时指示设备进行发射状态与接收状态的切换。

再次, 由于簇内各设备的间距较短, D2D 链路的可达速率通常较高。因此, 簇内信息共享传输一般在基站发射了多个下行单播帧后才会进行一次。多个在下行链路上成功接收到的数据分组可以级联成一个更大的 D2D 数据分组, 用于簇内信息共享传输。基站根据无线链路质量、QoS、设备缓存大小等因素调度簇内信息共享的通信行为。

最后, 为提高效率, D2D 簇内信息共享可以采用点到点的多播传输协议。

3 当前 D2D 增强多播的主要缺陷

以 D2D 通信增强的蜂窝下行数据分发方案可抽象为 3 个连续的阶段。

阶段一 D2D 簇的建立。该阶段包括邻居伙伴发现、直接链路探测、簇头选举等一系列建簇所需的信令交互。根据部署场景和业务模式, D2D 簇的建立既可采用设备自主的分布式建簇方式, 也可采用基站辅助的集中式建簇方式。

阶段二 D2D 链路测量和汇报。在该阶段, 簇内的各移动设备需要分别广播导频信号, 估计 D2D 链路的大尺度衰落和信道质量, 并在蜂窝系统的控制下向基站汇报测量结果。

阶段三 下行数据传输与簇内信息共享。该阶段为 D2D 增强多播的核心。首先各设备在下行链路上分别接收不同的切分后的数据块(C_1, C_2 和 C_3), 然后, 各设备在基站下行信令的控制下进行数据块簇内的共享转发。

当某个设备有 D2D 数据分组需要在簇内共享时, 基站需要为其在簇内的多播传输调度资源。相关信令包括 D2D 调度信令许可和 D2D 调度信息。前者用于向簇内发射者指示资源调度结果和多播传输的编码调制格式, 后者

用于向簇内多个接收者通知调度信息。只有当簇内所有设备都收到了上述信令, 一次有效可控的 D2D 簇内多播及相应 ACK/NACK 反馈过程才能被执行。经过一轮(多次)完整的 D2D 簇内多播后, 部分 D2D 数据分组在设备间交换成功, 而另一些 D2D 数据分组在簇内交换失败。此时, D2D 簇内重传的请求需要上报给基站, 然后在基站的调度下, 新一轮的 D2D 簇内多播被执行, 直到所有的簇内设备都拥有了完整的数据文件。

值得注意的是, 每次 D2D 簇内多播和重传都需要基站调度和蜂窝下行信令。因此, 多次的 D2D 簇内多播或重传会产生大量信令开销和较长时延。传统 D2D 增强多播方案无法有效克服上述问题, 形成了高效率数据传输与低效率信令流程之间的矛盾, 严重抵销了引入 D2D 通信带来的性能增益。

综上, 簇内信息共享所需的信令开销与簇内多播或重传的次数成正比。为有效降低信令开销, 必须采取适当措施来减少簇内多播和重传的次数。本文解决的问题为: (1) 如何选择最合适的设备作为 D2D 簇内重传的发射者; (2) 在 D2D 簇内多播和重传中, 如何确定需要传输的数据分组; (3) 如何实现 D2D 簇内多播和重传效率的最大化。

4 信令开销的建模与分析方法

考虑一个包含 N 个设备的 D2D 簇, 记作 $V_N = \{1, 2, \dots, N\}$, 其中 V_N 表示簇内设备序号的集合, 序号是标识设备的自然数。簇内设备均属于同一小区且位置彼此接近, 各获得了一个来自基站的同一文件切分后的数据块, 记作 $C_1, C_2, \dots, C_N$ 。为了达到簇内信息共享的目的, 各个设备需要依次将其所拥有的数据块以多播方式发送给其余所有设备。由于无线信道衰落的影响, 假设在每次 D2D 多播中, 只有部分设备能正确接收并反馈 ACK 信号, 其余未能正确接收的设备反馈 NACK 信号。

定义 1 对于 D2D 簇 V_N 内任意给定的多播发射者 k , 当其以多播方式在簇内共享一个 D2D 数据分组后, 会收到来自簇内其余 $N-1$ 个多播接收者反馈的 ACK/NACK 信号, 该信号序列与多播发射者可共同构成一个 $N \times 1$ 维的矢量, 记作多播误差矢量 (packet error vector, PEV), PEV 中的 1 表示接收到 ACK 信号、0 表示接收到 NACK 信号, 如式(1)所示。

$$PEV_k(i) = \begin{cases} 1 & \text{设备 } i \text{ 反馈 ACK 或 } i=k \\ 0 & \text{设备 } i \text{ 反馈 NACK} \end{cases}, i \in V_N \quad (1)$$



定义 2 为了实现 D2D 簇内信息的完全共享,每个簇内设备要依次成为多播传输的发射者,因此,所有的 PEV 共同构成了一个 $N \times N$ 维的矩阵,记作多播误差矩阵 (packet error matrix, PEM),如式(2)所示。

$$PEM = \{PEV_1, \dots, PEV_k, \dots, PEV_N\}, k \in V_N \quad (2)$$

PEM 包含了标志当前 D2D 簇内信息共享传输成功与否的接收状态信息,可用于对信令开销进行定量分析和最优重传策略设计。若 PEM 中不存在 0,则在当前这轮 D2D 簇内信息共享中,所有 D2D 数据分组都被所有的移动设备成功接收了,簇内信息共享成功,无需进行再一次的多播重传。否则,仍然需要启动 D2D 簇内的多播重传,直至 PEM 中的所有 0 都被 1 更新。

如图 2 所示,假设 D2D 簇中包含 4 个设备, $V_A = \{1, 2, 3, 4\}$ 。在每个移动设备分别完成一次 D2D 多播后, $PEV_1 = [1, 1, 0, 1]^T$, $PEV_2 = [0, 1, 1, 0]^T$, $PEV_3 = [0, 0, 1, 0]^T$, $PEV_4 = [1, 1, 0, 1]^T$ 。重传之前, PEM 初始值为 $\{PEV_1, PEV_2, PEV_3, PEV_4\}$ 。

根据现有的 D2D 簇内重传算法,对于每一次簇内多播,只要对应的 PEV 中包含 0,则原多播发射者就必须将相同的数据分组在簇内重新多播一次。如图 2 和图 3 所示,当设备 1 向设备 2、3、4 多播了 D2D 数据分组 C_1 后,假设只有设备 3 没能正确接收并反馈 NACK。由于此次多播

数据 \ 设备	C_1	C_2	C_3	C_4
#1	1	0	0	1
#2	1	1	0	1
#3	0→1	1	1	0
#4	1	0	0	1

(a)第1次重传(设备1多播 C_1)

数据 \ 设备	C_1	C_2	C_3	C_4
#1	1	0→1	0	1
#2	1	1	0	1
#3	1	1	1	0
#4	1	0→1	0	1

(b)第2次重传(设备2多播 C_2)

数据 \ 设备	C_1	C_2	C_3	C_4
#1	1	1	0→1	1
#2	1	1	0→1	1
#3	1	1	1	0
#4	1	1	0→1	1

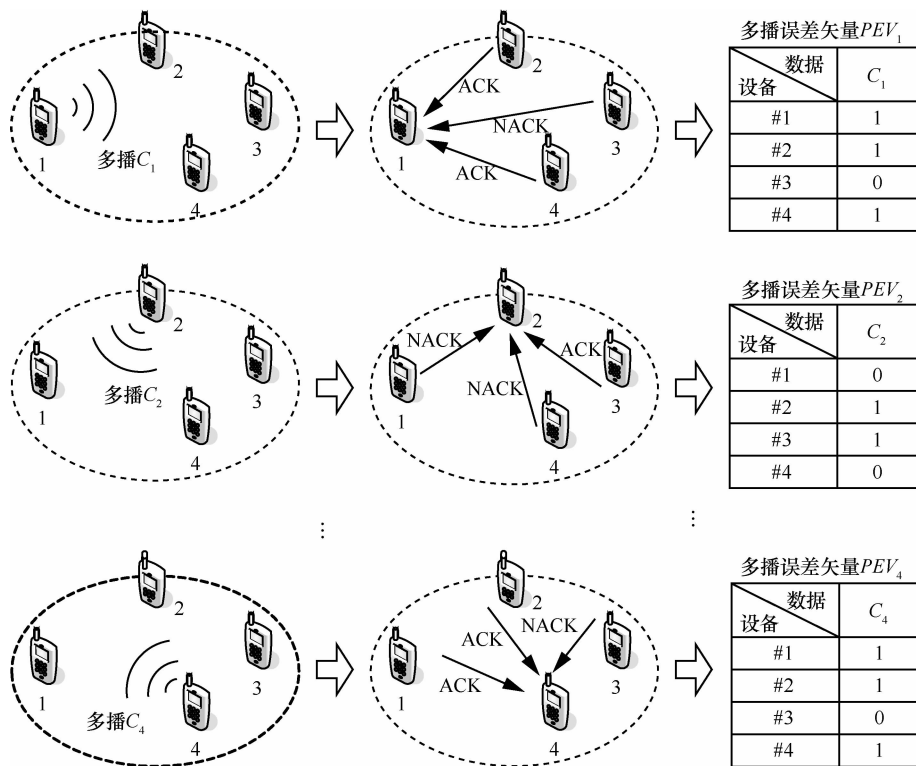
(c)第3次重传(设备3多播 C_3)

数据 \ 设备	C_1	C_2	C_3	C_4
#1	1	1	1	1
#2	1	1	1	1
#3	1	1	1	0→1
#4	1	1	1	1

(d)第4次重传(设备4多播 C_4)图 3 现有 D2D 簇内重传算法与 PEM 更新示例

没有使所有的接收者都成功接收,因此设备 1 需要向基站发出 D2D 簇内重传请求。经过基站的资源调度和信令通知,设备 1 再次向设备 2、3、4 重传 C_1 , PEM 第一列随即得到更新。相同的过程依次发生在设备 2、3、4 的簇内多播中,从而确保了 PEM 中所有含 0 列向量都依次更新,直至矩阵中不含 0。

在上述传统方案中,由于每次重传只能更新 PEM 的一列,所以图 2 的 PEM 至少需要 4 次簇内重传才能保证 PEM 中不含 0。传统方案的重传次数直接取决于 D2D 簇的大小。随着簇内设备增多,该方案的信令开销和系统时延将线性增长,导致数据分发性能的急剧恶化。

图 2 D2D 多播传输与多播误差矢量 PEV 示例

假设在簇内信息共享过程中,多播接收者的平均译码错误概率为 P_e (即 D2D 数据分组的传输误块率)。在不考虑重传错误的情况下, D2D 簇 V_N 至少需要进行 N 次重传的概率为:

$$p_{\text{retrans}} = \Pr[N_{\text{retrans}} \geq N] = [1 - (1 - P_e)^N]^N \quad (3)$$

其中, N_{retrans} 表示在 D2D 簇内实现完全信息共享所需的最小重传次数。根据式(3)进行计算可知,随着 P_e 和 N 的增加,平均最小重传次数会快速增长,意味着信令开销和数据分发时延也将相应地急剧上升。

5 最小化信令开销的信息共享算法

本节提出了一种最小化信令开销的 D2D 簇内信息共享算法,设计动机归纳如下:如果能够在簇内找出一个最合适的候选重传发射者,由它一次性尽可能多地重传所有需要在簇内重传的 D2D 数据分组,则簇内信息共享所需要的平均重传次数就会明显降低。

以图 2 和图 3 为例,如果设备 2 被选为簇内首次重传的发射者,在重传时多播数据分组 C_1 、 C_2 和 C_4 ,则 PEM 可在一次重传中被更新 3 个含 0 列;如果设备 3 被选为簇内第二次重传的发射者,在重传时多播数据分组 C_3 ,则 PEM 最后一个含 0 列也可被更新,如图 4 所示。上述重传方案仅仅通过两次簇内多播重传就实现了完全的簇内信息共享,而第 3 节中的传统方案至少需要 4 次簇内多播重传才能达到相同效果。

数据 设备	C_1	C_2	C_3	C_4
#1	1	0→1	0	1
#2	1	1	0	1
#3	0→1	1	1	0→1
#4	1	0→1	0	1

(a)第1次重传(设备2多播 C_1 、 C_2 和 C_4)

数据 设备	C_1	C_2	C_3	C_4
#1	1	1	0→1	1
#2	1	1	0→1	1
#3	1	1	1	1
#4	1	1	0→1	1

(b)第2次重传(设备3多播 C_3)

图 4 最小化信令开销的重传算法与 PEM 矩阵更新示例

最小化信令开销的 D2D 簇内信息共享算法包含 4 个连续的步骤,具体描述如下。

第 1 步 接收状态信息获取与 PEM 生成。

在 D2D 簇内重传开始之前,首先需要获取簇内各个设备的接收状态信息,并在网络中生成 PEM 。具体方法有集中式与分布式两种。对于集中式,完整的 PEM 在基站侧生成;而对于分布式,完整的 PEM 则分别在 D2D 簇内的每个设备侧生成。D2D ACK/NACK 特指簇内多播接收者反馈的确认信息。

(1)集中式流程

①每一次 D2D 簇内多播之后,基立即监听由多播接收者反馈的 D2D ACK/NACK;或者由 D2D 簇内多播发射者监听 D2D ACK/NACK,然后转发给基站。

②当簇内每个设备都完成一次多播发送后,基站即可获得完整的 PEM 。基站根据 PEM ,完成簇内最优重传发射者的选择后,通过蜂窝下行信令通知该设备。

(2)分布式流程

①每一次 D2D 簇内多播之后,各多播接收者依次在簇内广播自己的 D2D ACK/NACK;在不发送 D2D ACK/NACK 的时隙,上述多播接收者切换至接收状态,监听其他多播接收者发送的 D2D ACK/NACK。

②当簇内每个设备都完成一次多播发送后,每个簇内设备均可获得完整的 PEM ,并可根据 PEM 完成簇内最优重传发射者的选择。

第 2 步 D2D 簇内重传增益因子计算。

为了找出最优簇内重传发射者,需要计算簇内每个设备的“重传增益因子”。本算法中,某个移动设备的重传增益因子定义为“该设备已经成功获得并且至少有一个簇内其他设备没有成功获得的 D2D 数据分组的个数”,如式(4)所示。

$$G_k = \sum_{j=1}^N PEM(k, j) - \sum_{j=1}^N \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N PEM(i, j) \right] \quad (4)$$

第 3 步 最优 D2D 重传发射者选择。

拥有最高的重传增益因子的设备被选为簇内重传发射者。如果多个设备同时拥有最大重传增益因子,则根据预设优先级或随机在多个候选设备中进行选择。上述优先级可以是建簇时为每个设备分配的临时编号。若 PEM 为集中式生成,最优重传发射者的选择由基站执行;若 PEM 为分布式生成,最优重传发射者的选择则由簇内各设备分别执行。由于 PEM 和重传增益因子的计算方法是相同的,所以各设备分别运行的重传发射者选择流程将得到完全相同的结果。

D2D 簇内待重传数据分组为同时满足下列条件的所有数据分组:发射者已经成功获得的数据分组;至少有一个簇内其他设备没有成功获得的数据分组。为提高重传效率,簇内重传的发射者可以将所有满足条件的数据分组级联在一起,生成一个更大的 D2D 数据分组一次性在簇内多播。

第 4 步 簇内重传和 PEM 更新。

D2D 簇内重传后,如果更新后的 PEM 仍然包含 0,返



回第 1 步,直至 PEM 矩阵被更新为全 1 矩阵。

6 性能仿真

本节采用 MATLAB 语言进行仿真实验,比较了 3 种 D2D 簇内信息共享方案的平均重传次数。方案一为现有簇内重传方案,由各个多播发射者分别负责每次多播的重传,直至信息完全共享。方案二为本文所提的最小化信令开销的重传方案。方案三为理论上最优重传方案(性能上界),最小重传次数通过穷尽式搜索获得,方法如下:如果 PEM 中存在任意一个不含 0 行向量,则重传次数设为 1;如果在 PEM 中能够找到任意两个行向量,它们逐元素相加后得到的“和向量”中不含 0,则重传次数设为 2;如果在 PEM 中能够找到任意 3 个行向量,它们逐元素相加后得到的“和向量”中不含 0,则重传次数设为 3;以此类推,穷举出理论上的最小重传次数。该最优重传方案虽可得到最少的簇内重传次数,但是计算复杂,很难在实际系统中实现。

表 3 与图 5 比较了上述 3 种不同的重传方案在 D2D 簇大小和 D2D 链路目标误块率不同的情况下的平均簇内重传次数。其中,误块率表示 D2D 簇内多播接收者的平均译码错误概率(即 P_e),簇大小表示 D2D 簇内所含设备的个数(即 N)。

观察性能仿真结果,可以得出结论:本文所提的簇内重传算法,能显著地降低 D2D 簇内信息共享所需的多播重传次数,从而能够大幅减少系统的信令开销和传输时延;比较本文所提算法(方案二)和通过穷举搜索获得的理

表 3 D2D 簇内信息共享方案的重传次数性能对比

误块率		簇大小			
		3	6	9	12
30%	方案 1	1.531 0	4.996 1	8.480 1	11.763 1
	方案 2	1.018 2	1.333 4	1.583 4	1.786 1
	方案 3	1.018 2	1.332 3	1.582 7	1.786 1
20%	方案 1	1.080 5	4.029 1	7.488 9	10.962 6
	方案 2	0.784 7	1.091 8	1.191 0	1.341 4
	方案 3	0.783 5	1.089 4	1.189 3	1.339 6
10%	方案 1	0.572 8	2.459 0	5.130 4	8.237 4
	方案 2	0.476 8	0.962 5	1.006 2	1.011 2
	方案 3	0.474 8	0.961 4	1.005 3	1.010 4
5%	方案 1	0.293 2	1.356 2	3.035 6	5.190 7
	方案 2	0.266 8	0.783 7	0.975 3	0.999 1
	方案 3	0.264 9	0.782 0	0.975 0	0.998 9

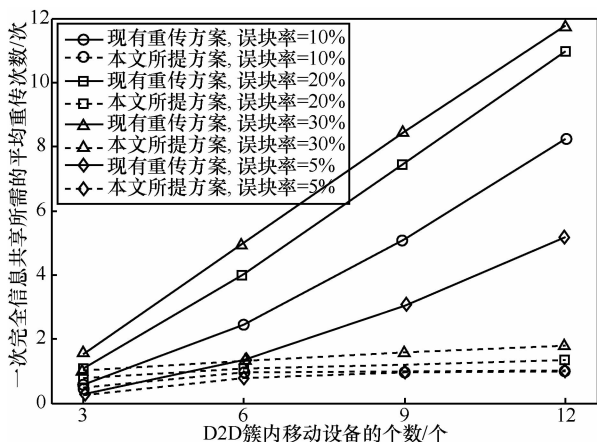


图 5 最小化信令开销的重传算法的性能仿真

论上限(方案三)可知,本文所提算法可以使簇内重传次数降低到与理论最小值非常接近的水平;随着簇内设备个数不断增加,现有重传方案的性能不断恶化,重传次数与簇内设备个数基本为线性关系,而本文所提算法的性能非常稳定,重传次数随着簇内设备个数的增加增长缓慢;相比现有重传方案,本文所提算法能够更好地支持较大规模的 D2D 簇,而包含较多设备的大 D2D 簇通常能够提供更多的协作增益和更高的传输效率。

7 结束语

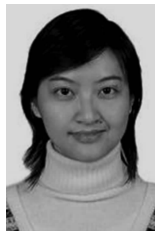
提升 D2D 增强多播性能的关键在于设计高效的簇内重传方案以实现信令开销和传输效率联合优化。传统的簇内重传必须由多播发射者完成,重传次数多,信令开销大,影响了 D2D 增强多播的效率。本文提出了一种适用于该场景的信令开销建模与分析方法,以此为理论基础,设计了一种最小化信令开销的 D2D 簇内信息共享算法,含集中与分布两种实现方式。通过自适应选择多播重传发射者和多播重传数据分组,有效减少簇内重传次数,显著降低了信令开销和传输时延。仿真结果表明,本文所提算法充分逼近理论上限,且随着簇的增大,优势更明显。

参考文献:

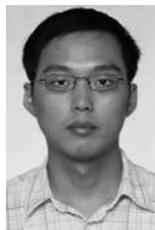
- [1] IMT-2020 (5G) 推进组. 5G 无线技术架构白皮书[R/OL]. (2015-05-29) [2015-10-16]. <http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/listByQuery currentPage=1&content=>.
IMT-2020 (5G) Promoting Group. 5G wireless technology architecture white paper [R/OL]. (2015-05-29) [2015-10-16]. <http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/listByQuery currentPage=1&content=>.

- [2] JANIS P, YU C H, DOPPLER K, et al. Device-to-device communication underlying cellular communications systems[J]. International Journal Communications, Network and System Sciences, 2009, 2(3): 169-178.
- [3] DOPPLER K, RINNE M P, JANIS P, et al. Device-to-device communications; functional prospects for LTE-advanced networks [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications, June 14-18, 2009, Dresden, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2009:1-6.
- [4] DOPPLER K, RINNE M, WIJTING C, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(12): 42-49.
- [5] 王彬, 陈力, 张欣, 等. 在 LTE-Advanced 网络下的 Device-to-Device 通信[J]. 现代电信科技, 2010(7): 24-27.
WANG B, CHEN L, ZHANG X, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks [J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2010(7): 24-27.
- [6] POPAVA L, HERPEL T, GERSTACHER W, et al. Cooperative mobile-to-mobile file dissemination in cellular networks within a unified radio interface [J]. Computer Networks, 2008, 52 (6): 1153-1165.
- [7] FITZEK F H P, KATZ M. Cognitive Wireless Networks: Concepts, Methodologies and Visions Inspiring the Age of Enlightenment of Wireless Communications [M]. New York: Springer, 2007: 50-53.
- [8] ZHU D, MUTKA M W, CEN Z W. QoS-aware wireless bandwidth aggregation (QAWBA) by integrating cellular and Ad-Hoc networks [C]//Proceedings of 1st International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks (QSHINE'04), October 18-20, 2004, East Lansing, MI, USA. New Jersey: IEEE Press, 2004: 156-163.
- [9] STEFANIA S, ISSAM T, MATTHEW B. LTE-the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice [M]. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2011: 108-120.

[作者简介]



汪少敏(1983-),女,中国电信股份有限公司上海研究院平台技术部工程师,主要研究方向为平台技术和移动通信网络技术。



周斌(1978-),男,博士,中国科学院上海微系统与信息技术研究所副研究员,主要研究方向为 D2D 通信、全双工通信和大规模自组网。