

无线蜂窝网中用于 D2D 多播簇的高效多播方案

池凯凯 汤泽锋 祝驿楠 邵奇可

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 在无线蜂窝网中使用设备到设备(Device-to-Device, D2D)通信技术,可以有效卸载基站的流量。文中研究基站到某个小区域(如一幢办公楼)内多个设备的基于 D2D 通信的高效数据多播,提出了一种基于 D2D 通信的包接收率(Packet Reception Ratio, PRR)和包平均转发次数(Average Packet Retransmission times, APRT)可控的多播方案,并分别以 PRR 下限约束下的 APRT 最小化(PRR constrained APRT minimization, APRT-M)和 APRT 上限约束下的 PRR 最大化(APRT constrained PRR maximization, PRR-M)为目标,最优化中继节点最大转发次数。相比于传统方案,所提方案可显著降低 BS 的多播负载。APRT-M 方式以尽可能降低 PRR(但不小于给定值)为代价来最小化 APRT,而 PRR-M 方式以尽可能增大 APRT(但不大于给定值)为代价来最大化 PRR。

关键词 无线蜂窝网,多播,D2D 通信,包平均转发次数,包接收率

中图分类号 TN911.2 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.01.026

Efficient Multicast Schemes for D2D Multicast Cluster in Wireless Cellular Network

CHI Kai-kai TANG Ze-feng ZHU Yi-nan SHAO Qi-ke

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract In wireless cellular network, using device-to-device communication technique can effectively offload the traffic of base station (BS). This paper studied the effective multicast of data from BS to multiple devices in a small area (like a building), and proposed a D2D communication based multicast scheme which is able to adjust packet reception ratio (PRR) and the average packet retransmission times (APRT). Furthermore, this paper optimized the maximal number of packet transmission retries to achieve PRR constrained APRT minimization (APRT-M) and APRT constrained PRR maximization (PRR-M), respectively. Compared to the traditional multicast scheme, the proposed scheme greatly reduces the multicast traffic load of BS. APRT-M minimizes APRT at the cost of reducing PRR as much as possible (but not smaller than the given threshold), whereas PRR-M maximizes PRR at the cost of increasing APRT as much as possible (but not larger than the given threshold).

Keywords Wireless cellular network, Multicast, D2D communication, Average packet retransmission times, Packet reception ratio

1 引言

近年来,随着智能手持设备拥有率的大幅度提升,包括语音、视频等类型的多媒体业务呈爆炸式增长,这导致了无线蜂窝网中数据流量的急剧增加,对蜂窝网中的基站(Base Station, BS)造成了巨大的压力。如何有效地应对不断增长的数据流量是 5G 无线蜂窝网需要面对的重要问题。总的来说,一方面是要提高通信吞吐量,使 BS 在单位时间内能给用户传递更多的数据,另一方面是使用不同的技术来降低 BS 的流量。

作为下一代移动通信中一种能有效减轻 BS 负载的技

术,近几年无线蜂窝网中的设备到设备(Device-to-Device, D2D)通信受到了科研界和产业界的极大重视^[1-2]。D2D 通信是在邻近的设备之间直接进行短距离通信,而不像传统蜂窝网中的数据传送必须经过 BS。当代智能手机和平板设备有足够的力量(如计算、存储等)来进行 D2D 通信,存储从 BS 或其他邻近设备接收到的数据,并将数据转发给邻近设备。D2D 通信除了可以有效卸载 BS 的流量,即减轻 BS 的负载,还在其他方面带来了好处,比如能够提高网络吞吐量、扩大 BS 的覆盖范围、达到 BS 之间的负载均衡等^[3-4]。

目前为止,已有一些文献提出了基于 D2D 通信的高效多播方案。根据多播用户的物理位置分布的角度,所考虑的多

播场景可分为以下两类:1)从BS多播数据到散布在整个蜂窝小区的用户;2)从BS多播数据到某个小区域(如一幢办公楼)内的多个用户。这些用户两两邻近,这些两两邻近,可以相互进行D2D通信的多播用户组成一个D2D多播簇。值得说明的是,第一种场景中分散在一个蜂窝小区中的多播用户往往会形成多个D2D多播簇^[5],因此设计高效的面向D2D多播簇的多播方案,除了可将其单独用于多播数据到D2D多播簇,还可以将其作为子模块嵌入到面向多播用户分布在整个小区的多播方案中。

关于从BS多播数据到散布在整个蜂窝小区的用户,Hou等^[6]提出了一种二阶段多播方案。第一阶段中BS将数据包作为无线广播发送给小区内所有用户,而且只发送一次;第二阶段中所有在第一阶段正确接收到数据包的用户(作为中继节点)同时给邻居广播一次该数据包。实际中,一个用户从周边多个中继节点处收到的信号并不是零相位差的叠加,而是相互干扰的。文献^[5]提出了一种联合使用D2D通信和网络编码的多播方案,该方案不仅有效降低了BS的多播流量而且大大降低了D2D的转发次数。Meshigi等^[7]联合优化小区中单播用户的上行链路和多个D2D多播簇(簇头向簇成员多播)的信道分配和发送功率设置,来最大化网络总吞吐量。Peng等^[8]分析了多播簇的多播吞吐量,并进一步提出了一种对分布在整个蜂窝小区的多播用户进行分簇的算法。Cao等^[9]提出了一种基于社交关系的多播用户分簇算法,该算法利用社会信任和社会互惠两种重要的社交关系,激发用户之间进行D2D多播通信。Wu等^[10]考虑了蜂窝用户和多个多播簇的信道分配和发送功率控制的联合优化,以最大化蜂窝用户和多播簇的总吞吐量,并且一个多播簇最多复用信道。Meshigi等^[11]进一步考虑了更一般的场景:一个多播簇可以复用多个信道以及一个信道可以被多个多播簇复用,通过优化信道分配和发送功率控制来最大化蜂窝用户和多播簇的总吞吐量。Hamdi等^[12]也考虑了蜂窝用户和多个多播簇的信道分配和发送功率控制的联合优化,并增加蜂窝用户和多播簇簇头发送功率约束和蜂窝用户接收信号信噪比约束。Lin等^[13]提出了一种联合考虑多播用户分布于多个蜂窝小区的多播簇分析模型,并基于该模型分析了一些重要的多播指标,如覆盖概率、覆盖的平均节点数、吞吐量等。

关于从BS多播数据到某个小区域内的多个用户,目前已有少量的研究工作。Zhang等^[14]提出了一种方案来随机挑出一定数目的节点作为转发节点,当BS多播完一组数据包后,这些转发节点首先确定D2D多播簇节点们没正确接收哪些包(称为丢失包),然后转发节点们按顺序轮流转发一个丢失包,直到所有节点收到当前这一组包。Zhou等^[15]提出了一种基于子簇划分的转发方案,以最小化时间-频率两个维度的总资源开销。该方案中,每当BS广播一个数据包给D2D多播簇节点后,利用子簇划分算法,将每一个未正确接收到包的节点(称为NACK节点)依附到无线链路质量较好(不一定是最好)的已正确接收到包的节点(称为ACK节点),然后由每个ACK节点以能让它的所有依附的NACK节

点正确接收的最高的速率在子簇内广播数据包。该方案比文献^[14]中的方案更优,原因是每个NACK节点都会有通信质量相对较好的ACK节点来为其高速率转发数据包,因此其数据包总转发通信时间更短,即总转发能耗更低。

需要说明的是,文献^[14-15]提出的都是100%包接收率PRR多播方案,即每个包都会被所有节点正确接收。而对于在多播数据流量中占很大比重的多媒体数据(如体育赛事、实时新闻等不同类型的视频数据)多播,并不需要达到100%可靠性,达到100%可靠性将导致相对较高的包平均转发次数APRT,从而导致转发设备的能耗相对较高。本文研究了BS到某个小区域内多个设备(即D2D多播簇)的基于D2D通信的高效数据多播,提出了一种PRR和APRT可控的多播方案。该方案中,中继节点的包最大转发次数 L (即如果中继节点发送一个包 L 次后还有节点没正确接收到该包,则中继节点不再重发该包)的取值决定了APRT和PRR这两个重要的性能指标。其以PRR下限约束下的APRT最小化(PRR constrained APRT Minimization, APRT-M)和APRT上限约束下的PRR最大化(APRT constrained PRR Maximization, PRR-M)为目标,最优化中继节点的包最大转发次数。

2 系统模型

如图1所示,无线蜂窝网中一个小区的BS向位于一个小范围内的 K 个多播用户节点 n_1, n_2, \dots, n_K 多播数据包。BS到节点 n_i 的下行链路的包正确接收率为 p_i^B ,节点 n_i 到节点 n_j 的无线链路的包正确接收率为 $p_{i,j}$ 。由于这些节点相互离得较近,相互之间的D2D无线链路往往具有较高的包接收率。本文考虑平坦衰落信道,即无线链路包接收率在一段连续时长(几个数据包发送时长的数量级)内保持不变,而在不同的时间段会发生变化。在静态的场景下,比如所有节点在一幢办公楼内,该信道模型能近似反映出无线信道状态。

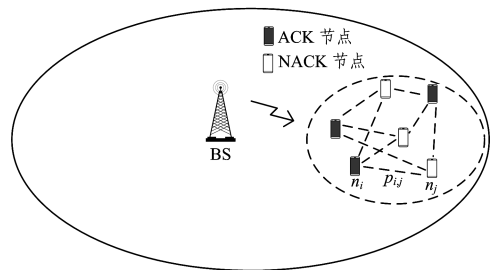


图1 D2D多播簇示意图

Fig. 1 Illustration of D2D multicast cluster

3 基于D2D通信的低通信开销多播方案

本文多播方案的工作方式如下。将待发送的数据以 M 个为一组,以组为单位进行多播。 M 的取值不能过大,应满足 M 个包的多播周期内无线链路的通信质量近似不变。对于每一组数据包的发送,会有一个节点 n_R 来执行这一组数据包多播的D2D中继, $R \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。组内的每一个数据包的多播包含两个阶段:

1)BS先反复向所有多播节点广播该包直到节点 n_R 正确

接收到该数据包。

2) 节点 n_R 反复在 D2D 多播簇内广播该包,直到所有其他节点正确接收到该包,或者发送次数达到最大转发次数 L 。

由于中继节点 n_R 承担数据包转发任务,相对于其他节点来说会消耗较多能量。为了保证公平性,本方案中由节点 n_1, n_2, \dots, n_K 按顺序轮流担任中继节点,即如果当前这一组数据包的多播中由节点 n_i 来担任中继,则下一组数据包的多播中由节点 $n_{(i \% K) + 1}$ 来担任中继,其中符号 $\%$ 为取模运算。

在该方案中,对于一组数据包的多播,在中继节点 n_R 上的包最大转发次数 L 的取值决定了 APRT 和 PRR。我们将多播的 PRR 定义为 K 个节点的 PRR 中的最小值。 L 越大则 APRT(即中继设备上的包平均转发能耗)越大,但 PRR 越高。

下面首先分析给定 L 值时的 PRR 和 APRT。得到 PRR 和 APRT 与 L 之间的关系后,我们就可以选取达到期望的 PRR 或 APRT 的 L 取值,然后进一步分析 PRR 下限约束下的 APRT 最小化和 APRT 上限约束下的 PRR 最大化这两种情况的 L 最优值。

4 包接收率 PRR 和包平均转发次数 APRT 的分析

不失一般性,假设当前一组数据发送由节点 n_R 担任中继节点。定义集合 $I = \{1, 2, \dots, K\}$, 集合 $J = \{1, 2, \dots, L\}$ 。

4.1 包接收率 PRR

用 $E_i^{(1[j])}$ 代表第 1 阶段 BS 发送数据包 j 次时中继节点 n_R 成功接收(之间 $j-1$ 次都未成功接收)且节点 $n_i (i \in I \setminus \{R\})$ 成功接收,则其发生概率为:

$$P(E_i^{(1[j])}) = (1 - p_R^B)^{j-1} p_R^B \cdot [1 - (1 - p_i^B)^j], i \in I \setminus \{R\} \quad (1)$$

用 $E_i^{(1)}$ 表示节点 n_i 在第一阶段从 BS 处成功接收到数据包,则其发生概率为:

$$\begin{aligned} P(E_i^{(1)}) &= \sum_{j=1}^{\infty} P(E_i^{(1[j])}) \\ &= \sum_{j=1}^{\infty} (1 - p_R^B)^{j-1} p_R^B \cdot [1 - (1 - p_i^B)^j] \\ &= \frac{p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B}, i \in I \setminus \{R\} \end{aligned} \quad (2)$$

用 $E_i^{(\bar{1})}$ 表示节点 n_i 在第一阶段未正确接收到数据包,则其发生概率为:

$$\begin{aligned} P(E_i^{(\bar{1})}) &= 1 - P(E_i^{(1)}) \\ &= \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B}, i \in I \setminus \{R\} \end{aligned} \quad (3)$$

用 $E_i^{(\bar{1}, 2[j])}$ 表示中继 n_R 发送第 j 次时节点 n_i 首次接收数据包成功,则其发生概率为:

$$\begin{aligned} P(E_i^{(\bar{1}, 2[j])}) &= P(E_i^{(\bar{1})}) \cdot (1 - p_{R,i})^{j-1} p_{R,i} \\ &= \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} (1 - p_{R,i})^{j-1} p_{R,i}, j \in J \end{aligned} \quad (4)$$

用 $E_i^{(\bar{1}, 2)}$ 表示节点 n_i 在第一阶段从 BS 处接收失败但是在第二阶段接收成功,即有:

$$E_i^{(\bar{1}, 2)} = \bigcup_{j=1}^L E_i^{(\bar{1}, 2[j])} \quad (5)$$

因此,节点 n_i 在第一阶段接收失败但在第二阶段从中继 n_R 接收成功的概率为:

$$\begin{aligned} P(E_i^{(\bar{1}, 2)}) &= \sum_{j=1}^L P(E_i^{(\bar{1}, 2[j])}) \\ &= \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} \cdot p_{R,i} \cdot \sum_{j=1}^L (1 - p_{R,i})^{j-1} \\ &= 1 - (1 - p_{R,i})^L \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} \\ &= \frac{p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} \end{aligned} \quad (6)$$

节点 n_i 在第二阶段结束后成功接收到数据包的总概率为 $p_i^{(s)}$:

$$\begin{aligned} p_i^{(s)} &= P(E_i^{(1)}) + P(E_i^{(\bar{1}, 2)}) \\ &= 1 - (1 - p_{R,i})^L \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} \end{aligned} \quad (7)$$

多播方案的包接收率 $p^{(s)}$ 为最差节点的 $p_i^{(s)}$, 即:

$$p^{(s)} = \min_{i \in I \setminus \{R\}} \{p_i^{(s)}\} \quad (8)$$

4.2 包平均转发次数 APRT

用符号 \bar{N}_R 表示第二阶段中继节点 n_R 的平均发送次数,下面分析推导给定 L 值时的 \bar{N}_R 。

第二阶段 n_R 发送 0 次时所有节点接收成功(即第一阶段所有节点都接收成功)的概率为:

$$\beta_0 = \prod_{i=1, i \neq R}^K P(E_i^{(1)}) = \prod_{i=1, i \neq R}^K \frac{p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} \quad (9)$$

用 $E_i^{(\bar{1}, 2[m])}$ 表示 n_R 在第二阶段进行 $m (m=1, 2, \dots, L)$ 次发送后节点 n_i 仍一次都没有成功接收到数据包,则其发生概率为:

$$\begin{aligned} P(E_i^{(\bar{1}, 2[m])}) &= P(E_i^{(\bar{1})}) \cdot (1 - p_{R,i})^m \\ &= \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} (1 - p_{R,i})^m \end{aligned} \quad (10)$$

n_R 在第二阶段进行 $m (m=1, 2, \dots, L)$ 次发送后,节点 n_i 在第一阶段及第二阶段的 m 次接收中至少一次成功接收到数据包的概率为:

$$\begin{aligned} p_i^{(1, 2[m])} &= 1 - P(E_i^{(\bar{1}, 2[m])}) \\ &= 1 - \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} (1 - p_{R,i})^m \end{aligned} \quad (11)$$

因此,第二阶段中 n_R 发送 $m (m=1, 2, \dots, L)$ 次数据包后所有节点接收成功的概率 $p^{(1, 2[m])}$ 为:

$$\begin{aligned} p^{(1, 2[m])} &= \prod_{i=1, i \neq R}^K p_i^{(1, 2[m])} \\ &= \prod_{i=1, i \neq R}^K \left[1 - \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} (1 - p_{R,i})^m \right] \end{aligned} \quad (12)$$

从而,在第二阶段中恰巧在 n_R 发送第 1 次后所有节点接收成功的概率 β_1 为:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= p^{(1, 2[1])} - \beta_0 \\ &= \prod_{i=1, i \neq R}^K \left[1 - \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} (1 - p_{R,i}) \right] - \prod_{i=1, i \neq R}^K \frac{p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} \end{aligned} \quad (13)$$

在第二阶段中恰巧在 n_R 发送第 m ($m=2,3,\dots,L$) 次后所有节点接收成功的概率 β_m 为:

$$\begin{aligned}\beta_m &= p^{(1,2[m])} - p^{(1,2[m-1])} \\ &= \prod_{i=1, i \neq R}^K \left[1 - \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} (1 - p_{R,i})^m \right] - \\ &\quad \prod_{i=1, i \neq R}^K \left[1 - \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} (1 - p_{R,i})^{m-1} \right] \quad (14)\end{aligned}$$

在 n_R 发送 L 次后不是所有节点都接收成功的概率 $p^{(f)}$ 为:

$$\begin{aligned}p^{(f)} &= 1 - \sum_{i=0}^L \beta_i \\ &= 1 - \prod_{i=1, i \neq R}^K \left[1 - \frac{p_R^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B} (1 - p_{R,i})^L \right] \quad (15)\end{aligned}$$

因此,中继节点 n_R 的包平均转发次数为:

$$\bar{N}_R = L \cdot p^{(f)} + \sum_{i=0}^L i \cdot \beta_i \quad (16)$$

4.3 包接收率下限约束下的包平均转发次数最小化

PRR 下限约束是指当前这组数据包多播的次数 L 的取值要使期望的多播 PRR 不小于给定阈值 P_{th} , 即:

$$p^{(s)} = \min_{i \in I} \{ p_i^{(s)} \} \geq P_{th} \quad (17)$$

即对于任意 $i \in \{1, 2, \dots, K\} \setminus \{R\}$, 必须满足:

$$p_i^{(s)} \geq P_{th} \quad (18)$$

将式(7)中的 $p_i^{(s)}$ 代入式(18)可得到:

$$L^{(i)} \geq \frac{\ln \left[(1 - P_{th}) \frac{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B - p_R^B p_i^B} \right]}{\ln(1 - p_{R,i})} \quad (19)$$

因此,使节点 n_i 的包接收率大于 P_{th} 的 L 的最小取值(即最小化 APRT 的取值)为:

$$L_{opt}^{(i)} = \left\lceil \frac{\ln \left[(1 - P_{th}) \frac{p_R^B + p_i^B - p_R^B p_i^B}{p_R^B - p_R^B p_i^B} \right]}{\ln(1 - p_{R,i})} \right\rceil \quad (20)$$

而让每个节点的包接收率都大于 P_{th} 的 L 的最小取值为:

$$L_{opt} = \max_{i \in I \setminus \{R\}} \{ L_{opt}^{(i)} \} \quad (21)$$

4.4 包平均转发次数上限约束下的包接收率最大化

APRT 上限约束是指当前这组数据包多播的次数 L 的取值要使期望的 APRT 不大于给定阈值 N_{th} ($N_{th} > 1$), 即:

$$\bar{N}_R \leq N_{th} \quad (22)$$

L 的取值过大会导致该约束不被满足。考虑到 \bar{N}_R 随着 L 单调递增, 基于二分法可以得到满足上式的 L 上界值, 该上界值即是满足包平均转发次数约束且最大化包接收率的 L_{opt} 。

5 基站多播流量降低程度分析

5.1 所提多播方案中基站的包平均发送次数

本文提出的多播方案中, 对于当前一组由节点 n_R 作为转发节点进行发送的数据包, 由于 BS 反复发送直到节点 n_R 正确接收, 因此基站的包平均发送次数为:

$$\bar{N}_{BS}^{(R)} = \frac{1}{p_R^B} \quad (23)$$

由于 n_1, n_2, \dots, n_K 在不同的数据组中轮流担当中继节

点, 因此基站的包平均发送次数为:

$$\bar{N}_{BS} = \frac{1}{K} \sum_{R=1}^K \bar{N}_{BS}^{(R)} = \frac{1}{K} \sum_{R=1}^K \frac{1}{p_R^B} \quad (24)$$

5.2 传统多播方案中基站的包平均发送次数

由于传统多播方案无需节点进行 D2D 中继, 因此无需考虑中继节点包平均转发次数这一性能指标, 只需考虑包接收率。接下来分析包接收率约束下的传统多播方案的基站包平均发送次数。

传统多播方案中, 用 L' 表示 BS 上数据包的最大转发次数, 则节点 n_i 的包接收率为:

$$p_i^{(s)} = 1 - (1 - p_i^B)^{L'} \quad (25)$$

其中, L' 的取值要满足包接收率不低于 P_{th} , 即:

$$\min_{i \in I} \{ p_i^{(s)} \} = 1 - (1 - \min_{i \in I} \{ p_i^B \})^{L'} \geq P_{th} \quad (26)$$

从而有:

$$L' \geq \lceil \log_{1 - \min_{i \in I} \{ p_i^B \}} (1 - P_{th}) \rceil \quad (27)$$

对于传统的由 BS 来重发丢包的多播方案, BS 发送 1 次时 K 个节点都成功接收的概率为:

$$\alpha_1 = \prod_{i=1}^K p_i^B \quad (28)$$

BS 发送 m ($m=1, 2, \dots, L'$) 次后 K 个节点都成功接收的概率为 $\prod_{i=1}^K [1 - (1 - p_i^B)^m]$ 。因此, 恰巧在中继节点发送第 m ($m=2, 3, \dots, L'$) 次时所有节点接收成功的概率 α_m 为:

$$\alpha_m = \prod_{i=1}^K [1 - (1 - p_i^B)^m] - \prod_{i=1}^K [1 - (1 - p_i^B)^{m-1}] \quad (29)$$

而中继节点发送第 L' 次后不是所有节点都接收成功的概率为 $1 - \sum_{m=1}^{L'} \alpha_m$ 。

综上, BS 的包平均发送次数为:

$$\begin{aligned}\bar{N}'_{BS} &= L' (1 - \sum_{m=1}^{L'} \alpha_m) + \sum_{m=1}^{L'} m \alpha_m \\ &= L' \{ 1 - \prod_{i=1}^K [1 - (1 - p_i^B)^{L'}] \} + \sum_{m=1}^{L'} m \{ \prod_{i=1}^K [1 - (1 - p_i^B)^m] - \prod_{i=1}^K [1 - (1 - p_i^B)^{m-1}] \} \quad (30)\end{aligned}$$

使用所提出的多播方案带来的 BS 多播流量下降比例为:

$$\beta = \frac{\bar{N}'_{BS} - \bar{N}_{BS}}{\bar{N}'_{BS}} \quad (31)$$

6 性能评估

本节首先评估本文的两种多播方案相比于传统多播方案的 BS 流量降低程度。另外, 考虑到目前尚无面向 D2D 多播簇的包接收率或包平均转发次数可控的方案, 本节比较所提方案的 APRT-M 和 PRR-M 这两种最大转发次数 L 动态变化的多播方式以及 L 值固定(将所提方案中的每组数据包包的 D2D 中继节点最大转发次数 L 取固定值)的基准方案。

6.1 基站流量降低程度评估

由于 APRT-M 和 PRR-M 两种方式的第一阶段是相同的, 仅仅是在第二阶段的 D2D 数据包中继方面有所不同, 因此两种方式具有相同的 BS 包平均发送次数。表 1 列出了不

同节点数目和不同蜂窝链路(即基站到节点)包接收率时的 BS 包平均发送次数。可以看出,相比于传统方案,本文所提出的方案可以大大降低 BS 的包平均发送次数,并且降低量随着包接收率需求值 P_{th} 的增大、节点数目的增加以及蜂窝链路质量的下降而增加。

表 1 基站包平均发送次数

Table 1 Average packet retransmission times of BS

K	p_i^B	传统方案 ($P_{th}=0.9$)	传统方案 ($P_{th}=0.95$)	APRT-M 和 PRR-M
10	0.6	2.819	3.303	1.667
	0.7	1.972	2.582	1.429
	0.8	1.893	1.893	1.250
15	0.6	2.926	3.556	1.667
	0.7	1.995	2.752	1.429
	0.8	1.965	1.965	1.250
20	0.6	2.969	3.703	1.667
	0.7	1.999	2.848	1.429
	0.8	1.988	1.988	1.250

例如,对于 $K=10$, $p_i^B=0.6$, $P_{th}=0.9$ 的网络场景,所提方案的 BS 包平均发送次数下降比例为 40.87%;而对于 $K=10$, $p_i^B=0.6$, $P_{th}=0.95$ 的网络,所提方案的 BS 包平均发送次数下降比例高达 49.53%;对于 $K=20$, $p_i^B=0.6$, $P_{th}=0.9$ 的网络,所提方案的 BS 包平均发送次数下降比例为 43.85%;对于 $K=10$, $p_i^B=0.8$, $P_{th}=0.9$ 的网络,所提方案的 BS 包平均发送次数下降比例为 33.97%。

6.2 APRT-M 和 PRR-M 的性能比较

实验中,APRT-M 中的 $P_{th}=0.95$,PRR-M 中的 $N_{th}=1.5$ 。仿真的网络包含 1 个 BS 以及随机部署的 K 个用户。图 2 中每个数据点都是 5000 组数据的平均结果,每组数据包含 5 个数据包的发送,且每组数据对应的链路丢包率是随机生成的:BS 到 K 个用户的丢包率是在 $[0.6, 0.9]$ 范围内的随机值,中继节点到其余各节点之间的丢包率是在 $[p_{min}, 0.99]$ 范围内的随机值。

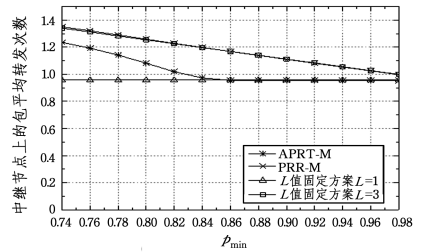
图 2 给出了 APRT-M 和 PRR-M 两种方式以及 L 值固定的方案在不同 D2D 传输可靠性时的包平均转发次数和包接收率。

首先,从图 2(a)可以看出,APRT-M 的包平均转发次数始终是优于 PRR-M 的包平均转发次数;而从图 2(b)可以看出,PRR-M 的包接收率大于 APRT-M 的包接收率。其原因如下:APRT-M 的 L 取值较小,在保证所有节点的包接收率都不低于 $P_{th}=0.95$ 的情况下 L 取尽可能小的值(在随机生成的大多数拓扑中该值是 1,2 或 3),以最小化包平均转发次数;而 PRR-M 的 L 取值相对较大,在保证中继节点上的包平均转发次数不超过 N_{th} 的情况下 L 取尽可能大的值(在随机生成的大多数拓扑中该值相对较大),从而最大化包接收率。综上,APRT-M 以相对较低的包接收率为代价,达到了较小的包平均转发次数;而 PRR-M 以相对较大的包平均转发次数为代价,达到了较高的包接收率。

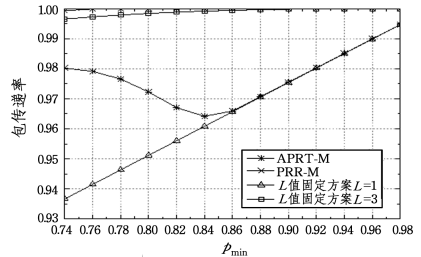
其次,从图 2(a)中可以看出,随着 D2D 传输可靠性的不断增加,两个方式的包平均转发次数都有所下降。APRT-M

中,随着 D2D 传输可靠性的不断增加,包接收率先下降后上升。这是因为当 D2D 传输可靠性较低时,即在 $p_{min}=0.74$ 到 $p_{min}=0.84$ 区间内, p_{min} 的增加使得 L_{opt} 的平均值下降,虽然 L_{opt} 的平均值下降导致包平均转发次数也下降,但是数据包发送 L_{opt} 次后仍有节点接收失败的概率上升,从而导致包接收率下降。当 D2D 传输可靠性从 $p_{min}=0.84$ 进一步升高时,大多数数据组(即拓扑)的 L_{opt} 取值为极小值 1,平均转发次数收敛,如图 2(a)所示。 L_{opt} 取值为 1 的情况下,包转发一次就使所有节点正确接收到数据包的概率随着 p_{min} 的升高而增大。PRR-M 中,随着 D2D 传输可靠性的不断增加直到 $p_{min}=0.80$,满足包平均转发次数约束 $\bar{N}_R \leq N_{th}$ 的 L 最优取值越来越大,并且当 p_{min} 足够大(大于 0.80)时, L 取无限大的值,且 \bar{N}_R 仍收敛于一个小于 N_{th} 的值,此时的包接收率为 100%(见图 2(b)),而 p_{min} 的不断加使得包平均转发次数不断下降而收敛。

另外, L 值固定的方案显然无法控制包接收率和包平均转发次数这两个性能指标。例如,当 $L=1$ 时,从图 2(b)可以看出,虽然在 p_{min} 较大的区间段包传递率达到门限值 $P_{th}=0.95$,但在 p_{min} 较小的区间段包传递率达不到门限值 $P_{th}=0.95$,从而无法应用需要将包接收率控制在阈值范围的场景。而当 $L=3$ 时,从图 2(b)可以看出,虽然在 p_{min} 的所有取值下包接收率都达到门限值 $P_{th}=0.95$,但包平均转发次数相对较大。当 D2D 链路丢包率偏高时(p_{min} 大约为 0.70 时),包平均转发次数超出门限值 N_{th} ,从而无法应用于需要将包平均转发次数控制在阈值范围的场景。



(a) 包平均转发次数的比较



(b) 包接收率的比较

图 2 不同 D2D 传输可靠性时的包平均转发次数和包接收率($K=15$)Fig. 2 APRT and PRR under different D2D communication reliabilities($K=15$)

图 3 给出了 APRT-M 和 PRR-M 两种方式在不同节点个数下的包平均转发次数和平均包接收率。

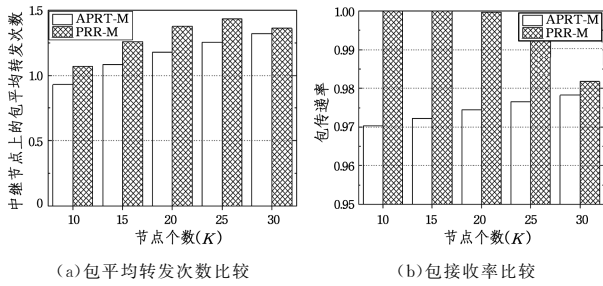


图3 $P_{\min}=0.80$ 时,不同节点数目下的包平均转发次数 APRT 和包接收率 PRR

Fig. 3 APRT and PRR under different node numbers when $p_{\min}=0.80$

首先,从图3也可以得到前面的结论:APRT-M的包平均转发次数要小于PRR-M的包平均转发次数,但PRR-M的包接收率大于APRT-M的包接收率。

其次,对于APRT-M,随着节点数目 K 的增大,为了保证最差节点的包接收率大于门限值,所需要的 L 平均取值也不断增大,依次为1.30,1.41,1.53,1.61和1.68,从而包平均转发次数不断增大。另外,虽然 K 增大看似会使包接收率下降,但 L 取值的增大使得包接收率也增大,具体原因如下。从仿真数据中观察到,当 K 较小(如 $K=10$)时,很多随机生成的拓扑中,最差节点达到包接收率 P_{th} 所需的 L 值小于1但比较接近1,然而由于 L 必须取整数,因此在这些拓扑中 L 的取值为1,从而使真实的包接收率略高于 P_{th} ;当 K 较大(如 $K=30$)时,很多随机生成的拓扑中,最差节点达到包接收率 P_{th} 所需的 L 值略大于1但比较接近1,因此在这些拓扑中 L 的取值为2,从而使真实的包接收率远高于 P_{th} 。

而对于PRR-M,总的来说,由于D2D链路的高可靠性,即使 L 取值较大(如 $L=100$),大多数包只需转发几次就使所有节点接收到,从而仍然满足包平均转发次数低于 N_{th} ,而较大的 L 值显然使 PRR 较大。具体来说,随着节点数目 K 的增大, L 平均取值不断地下降以保证包平均转发次数低于 N_{th} , K 的增大和 L 取值的下降使 PRR 下降。另外,虽然随着 K 增大 L 的取值下降,但包平均转发次数不断靠近 N_{th} 。

结束语 本文研究基站到某个小区域内多个设备的基于D2D通信的高效数据多播,提出了一种包接收率和包平均转发次数可控的多播方案,并分别以包接收率下限约束下的包平均转发次数最小化和包平均转发次数上限约束下的包接收率最大化为目标,最优化本方案中的中继节点最大转发次数。相比于传统方案,所提方案可降低BS的多播负载高达50%左右。包接收率下限约束下的包平均转发次数最小化方式以尽可能降低包接收率(但不小于给定值)为代价来最小化包平均转发次数,而包平均转发次数上限约束下的包接收率最大化方式以尽可能增大包平均转发次数(但不大于给定值)为代价来最大化包接收率。

参考文献

[1] LIU J, KATO N, MA J, et al. Device-to-Device Communication in LTE-Advanced Networks: A Survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 17(4):1923-1940.

[2] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(4):1801-1819.

[3] LIU J, KAWAMOTO Y, NISHIYAMA H, et al. Device-to-device Communications Achieve Efficient Load Balancing in LTE-Advanced Network[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(2):57-65.

[4] MILITANO L, CONDOLUCI M, ARANITI G, et al. Single Frequency-Based Device-to-Device-Enhanced Video Delivery for Evolved Multimedia Broadcast and Multicast Services[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(2):263-278.

[5] CHI K, HUANG L, LI Y, et al. Efficient and Reliable Multicast using Device-to-Device Communication and Network Coding for 5G Network[J]. IEEE Network, 2017, 31(4):78-84.

[6] HOU F, CAI L, HO P, et al. A Cooperative Multicast Scheduling Scheme for Multimedia Services in IEEE 802.16 Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3):1508-1519.

[7] MESHIGI H, ZHAO D, ZHENG R. Optimal Resource Allocation in Multicast Device-to-Device Communications Underlying LTE Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(9):8357-8371.

[8] PENG B, PENG T, LIU Z, et al. Cluster-Based Multicast Transmission for Device-to-Device (D2D) Communication[C]// Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. Las Vegas: IEEE Press, 2013:1-5.

[9] CAO Y, JIANG T, CHEN X, et al. Social-Aware Video Multicast Based on Device-to-Device Communications [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(6):1528-1539.

[10] WU X, CHEN Y, YUAN X, et al. Joint Resource Allocation and Power Control for Cellular and Device-to-device Multicast Based on Cognitive Radio[J]. IET Communications, 2014, 8(16):2805-2813.

[11] MESHIGI H, ZHAO D, ZHENG R. Joint Channel and Power Allocation in Underlay Multicast Device-to-device Communications[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications. London: IEEE Press, 2015:2937-2942.

[12] HAMDI M, YUAN D, ZAIED M. GA-based Scheme for Fair Joint Channel Allocation and Power Control for Underlying D2D Multicast Communications [C]// Proceedings of IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Valencia: IEEE Press, 2017:446-451.

[13] LIN X, RATASUK R, GHOSH A, et al. Modeling, Analysis, and Optimization of Multicast Device-to-Device Transmissions [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8):4346-4359.

[14] ZHANG Q, FITZEK F, IVERSEN V. Design and Performance Evaluation of Cooperative Retransmission Scheme for Reliable Multicast Services in Cellular Controlled P2P Networks [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Athens: IEEE Press, 2007:1-5.

[15] ZHOU B, HU H, HUANG S, et al. Intracluster Device-to-Device Relay Algorithm With Optimal Resource Utilization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5):2315-2326.