

D2D 网络中基于立即可解网络编码的时延最小化重传方案

王 练* 王 萌 任治豪 白佳洁
(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

摘 要: 该文针对 D2D 无线网络中多终端并发协作重传冲突避免问题, 提出一种基于立即可解网络编码的时延最小化重传方案。在重传阶段, 充分利用 D2D 无线网络终端协作传输数据的优势, 结合各终端数据包接收状态, 综合考虑时延的影响因素, 选取单次重传时延增量较小的数据包生成编码包, 最小化重传时延。同时, 构建终端冲突图, 在图中搜索极大独立集, 根据各终端的编码包权重值, 选择最大加权独立集中的终端作为并发协作重传终端, 从而降低重传次数。仿真结果表明, 所提方案能够进一步改善 D2D 无线网络的重传效率。

关键词: 网络编码; 重传; 时延; 终端直通

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)07-1691-08

DOI: 10.11999/JEIT170976

Delay Minimization Retransmission Scheme Based on Instantly Decodable Network Coding for D2D Communications

WANG Lian WANG Meng REN Zhihao BAI Jiajie

(School of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications,
Chongqing 400065, China)

Abstract: A delay minimization retransmission scheme based on an instantly decodable network coding is proposed to solve the conflict problem when multiple devices cooperatively retransmit in Device-to-Device (D2D) wireless networks concurrently. In retransmission stage, making full use of multiple devices cooperative transmission advantages in D2D wireless network, combined with the packet receiving state of each devices, taking all of the influence factors of delay into account, and then the packets with smaller incremental delay for each retransmission are selected to generate encoding packets to minimize the retransmission delay. At the same time, the devices conflict graph is constructed and the maximal independent set is searched in the graph. According to the encoding package weight value of each device, the maximum weighted independent set are selected as the concurrent cooperative retransmission devices to reduce the number of retransmission. Simulation results show that the proposed scheme can further improve the retransmission efficiency of D2D wireless network.

Key words: Network coding; Retransmission; Delay; Device-to-Device (D2D)

1 引言

随着智能移动设备数量的剧增, 传统无线网络中发送与接收信息多集中由基站处理, 该方式浪费了大量终端资源, 导致终端设备间的高效数据通信受限。D2D(Device-to-Device)通信是一种允许移动终端在通信系统的控制下使用系统授权频段进行点到点通信的终端间直接通信技术^[1]。D2D 网络中终端设备能够在小范围且更可靠的无线信道间相互协作交换数据, 该方式不仅可节省基站的无线资源, 更可提高数据传输可靠性^[2]。但由于无线信道传输中

数据包的易失性, D2D 网络的终端间也需要高效的数据传输方式来提高效率。

网络编码于 2000 年由 Ahlswede 等人^[3]首次提出, 其核心思想打破了传统网络中间节点仅对信息进行存储转发的限制, 允许中间节点对接收到的信息进行编码, 有效提升了通信网络的容量和重传有效性。Ho 等人^[4]提出的随机线性网络编码(Random Linear Network Coding, RLNC), 将同等大小的数据包进行随机线性组合生成多个线性无关的编码包, 信宿节点将收到的编码包进行解码, 译码出原始数据包, 但由于 RLNC 在解码时要求信宿节点必须收到足够多的编码包, 导致信宿节点等待解码的时间比较长。文献 [5,6] 提出的机会式网络编码(Opportunistic Network Coding, ONC), 将数据包进行简单的 XOR 运算生成编码包, ONC 在解码时

收稿日期: 2017-10-20; 改回日期: 2018-01-24; 网络出版: 2018-04-08

*通信作者: 王练 wanglian@cqupt.edu.cn

基金项目: 重庆市教委科学技术研究(KJ1704103)

Foundation Item: The Research on Science and Technology of Chongqing Education Commission (KJ1704103)

要求信宿节点至多包含该节点的任意一个丢包,相比RLNC信宿节点等待解码的时间更短。因而作为ONC的一个子类的立即可解网络编码(Instantly Decodable Network Coding, IDNC)^[7],是一种更适用于时延敏感应用场景的网络编码构造方案^[8-11]。结合网络编码的优势和D2D网络的特点,将编解码复杂度低的IDNC应用于D2D网络的终端协作数据交换中,可使D2D网络在原有优势的基础上降低终端间数据交换传输次数的同时降低时延,进一步提升D2D网络传输性能^[12]。

D2D网络与传统的一对多组播网络传输模型的不同是,重传阶段的信源可以是某一个或多个终端。所以D2D网络中,基于网络编码的重传过程在考虑编码方案的同时,还需考虑如何选择发送端^[13-17]。文献[13]提出在D2D网络中采用集中化方式选择IDNC编码包,降低单次重传的解码时延增量。文献[14]提出一种基于马尔科夫决策理论的特殊情况,利用随机最短路径问题来解决D2D网络中的重传编码包选择问题,以降低完成时延。文献[15]通过基于博弈论的分布式完成时延优化方案。由于发送范围的限制,全相连的D2D网络模型通常较理想化。文献[16]提出多跳D2D网络中降低解码时延的网络编码重传方案,通过降低单次重传的平均解码时延增量,降低整个重传过程的平均解码时延,再根据网络连接状况构造终端节点协作图,在该协作图中采用寻找最大加权团,最终得出该时隙下的最大协作发送终端集合。文献[17]在文献[16]的基础上,提出降低完成时延的编码重传方案。以上方案中,在编码包选择时仅考虑降低平均解码时延或者平均完成时延,在选择协作发送终端集合时采用贪心算法,选出的最大发送终端集合不一定是全局最优的。

在现有研究的基础上,本文以最小化时延为目标,针对部分连接D2D网络中编码包和重传终端节点选择问题做了进一步研究,提出了一种基于IDNC的时延最小化协作重传方案(Delay Minimization for Cooperation Retransmission, DMCR)。在重传阶段,由D2D网络终端连接状态和各终端的数据包接收状态反馈矩阵以及时延影响因素,计算数据包的权重值,生成最优编码包。同时,通过在终端冲突图中搜索极大独立集,结合各终端的最优编码包的权重值,选择最优并发协作发送终端组合重传相应编码包,在最小化时延的同时进一步减少重传次数,提高重传效率。

2 系统模型及相关定义

2.1 系统模型

D2D网络传输模型包含一个信源BS, M 个终

端 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$, N 个源数据包 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$,如图1所示。用 $p_{s,i}$ 和 $p_{i,j}$ 分别表示BS到终端和终端到终端间的丢包率,且满足 $p_{s,i} > p_{i,j}$ 。假设整个传输过程中,信道上的丢包率保持不变。终端之间均可通过单跳或多跳实现互联。其中,与终端 D_i 相邻的终端属于 D_i 的发送覆盖范围,用 C_i 表示。并假设整个传输过程中,各终端位置及其发送覆盖范围不变, $\mathbf{p} = [p_{i,j}] (\forall i, \forall j \in M)$ 表示 D_i 到 D_j 的丢包率。

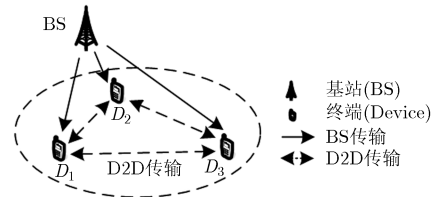


图1 D2D无线网络传输模型

传输模型中,数据包传输分为2个阶段。第1阶段是初始传输阶段,BS向 M 个终端发送源数据包,确保各源数据包至少被一个终端正确接收。初始传输阶段结束后,将各终端数据包分成2类:

(1)已接收数据包集(H_i):终端 D_i 已正确接收到的数据包;

(2)丢失数据包集(W_i):终端 D_i 丢失的数据包。

第2阶段为终端间的协作重传阶段。各终端之间通过半双工方式相互协作恢复丢包,系统根据各终端的数据包接收情况,决定下一时隙的发送端及编码包,直到所有终端成功接收到所有源数据包。

2.2 相关定义

定义1 状态反馈矩阵(State Feedback Matrix, SFM):传输过程中,终端的数据包接收状态用 $M \times N$ 的矩阵 $\mathbf{SFM} = [f_{i,j}]_{M \times N} (\forall i \in M, \forall j \in N)$ 表示。

$$f_{i,j} = \begin{cases} 0, & j \in H_i \\ 1, & j \in W_i \end{cases}$$

参与编码的源数据包集合用 K 表示,编码包 $P^* = \bigoplus_{P_n \in K} P_n$, P^* 在接收端 D_j 处根据解码情况可分为3种:

(1)立即可解编码包: $\exists P_i \in K$, 使得 $P_i \in W_j$ 且 $\{\forall P \in \{K \setminus P_i\} \subseteq H_j, \text{即 } |K \cap W_j| = 1\}$ 时, P^* 在 D_j 处为立即可解编码包。

(2)不可解编码包: $\exists P_n, P_i \in K$, 使得 $P_n \in W_j$ 且 $P_i \in W_j$, 即 $|K \cap W_j| > 1$ 时, P^* 在 D_j 处为不可解编码包。

(3)无效编码包: $K \cap W_j = \emptyset, P^*$ 中的数据包集 K 不包含终端 D_j 的丢失数据包集 W_j 中任意数据包, 则称 P^* 在接收终端 D_j 处为无效编码包。

定义 2 解码时延(Decoding Delay, DD): 重传阶段, 在时隙 t , 如果一个丢包集不为空的终端 D_i 未接收到编码包, 或者收到无效或不可解编码包时, D_i 的解码时延增加 1。如果终端 D_i 正确接收到一个立即可解的编码包 P^* , 则终端 D_i 在这个时隙的解码时延不增加。在时隙 t , 终端 D_i 处产生的解码时延 d_i^t 为

$$d_i^t = \begin{cases} 0, & W_i \neq \emptyset \ \& \ |K \cap W_i| = 1 \ \& \ D_i \text{收到} P^* \\ 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

定义 3 平均解码时延(Average Decoding Delay, ADD): 所有终端的解码时延之和的平均值, 用 \bar{D} 表示。

$$\bar{D} = \frac{1}{|M|} \sum_{i=1}^{|M|} d_i \quad (2)$$

定义 4 完成时延(Individual Completion Delay, ICD): 所有 $W_i \neq \emptyset$ 的终端恢复所有丢包时, 系统经历的重传次数, 终端 D_i 的完成时延用 ICD_i 表示。

$$ICD_i = |W_i| + \sum_{t=1}^t d_i^t \quad (3)$$

定义 5 系统完成时延(System Completion Delay, SCD): 所有终端恢复所有丢包所需要的重传次数。

$$\begin{aligned} D &= |M_w| - \left(\sum_{D_i \in S} |T_i(P^*)| - \sum_{D_i \in S} \left(\sum_{\substack{D_j \in T_i(P^*) \\ |K \cap W_j|=1}} 1 \cdot p_{i,j} + \sum_{\substack{D_j \in T_i(P^*) \\ |K \cap W_j|=1}} 0 \cdot (1 - p_{i,j}) \right) \right) = |M_w| - \sum_{D_i \in S} \left(|T_i(P^*)| - \sum_{\substack{D_j \in T_i(P^*) \\ |K \cap W_j|=1}} 1 \cdot p_{i,j} \right) \\ &= |M_w| - \sum_{D_i \in S} \left(\sum_{\substack{D_j \in T_i(P^*) \\ |K \cap W_j|=1}} 1 - \sum_{\substack{D_j \in T_i(P^*) \\ |K \cap W_j|=1}} p_{i,j} \right) = |M_w| - \sum_{D_i \in S} \left(\sum_{\substack{D_j \in T_i(P^*) \\ |K \cap W_j|=1}} (1 - p_{i,j}) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$SCD = \max_{D_i: W_i \neq \emptyset} \{ICD_i\} = \max_{D_i: W_i \neq \emptyset} \left\{ |W_i| + \sum_{t=1}^t d_i^t \right\} \quad (4)$$

表 1 总结了本文中使用的符号及其含义。

3 基于立即可解网络编码的重传方案

3.1 问题描述

多终端在避免冲突的情况下, 允许多终端在同一个时隙向各自 \mathcal{C}_i 内的终端发送编码包。 $\mathcal{P}(D)$ 表示 D_i 的所有可能的终端组合, $S = \{D_1, D_2, \dots, D_{|S|}\}$ 为可同时发送的终端集合, 所有可能的 S 所构成的集合为 $\mathcal{I}(S)$:

$$\begin{aligned} \mathcal{I}(S) &= \{S \in \mathcal{P}(D) \mid \mathcal{C}_i \cap \mathcal{C}_j = \emptyset, D_k \neq D_j, \\ &\quad \forall D_k \in \mathcal{C}_i, \forall D_i \in S, \forall D_j \in S, \forall D_k \in S\} \end{aligned} \quad (5)$$

若 D_i 发送的编码包 P^* 在 D_j 处立即可解, 则称 D_j 为本次重传的目标接收端, 用 $T_i(P^*)$ 表示。 M_w 表示丢包集非空的终端集合。由定义 2 可知, 理想情况下, 编码包在所有接收端都是立即可解的, 一次重传后, 所有终端经历的解码时延均为 0, 系统平均解码时延增量最小为

$$\bar{D}_{\min} = \frac{1}{|M_w|} \sum_{i=1}^{|M_w|} d_i = 0 \quad (6)$$

一般情况下, 一次重传后的所有丢包集非空的终端的解码时延均增加 1, 共增加 $|M_w|$, 但其中部分目标接收端因正确接收到立即可解编码包而不增加解码时延, 故应减去正确接收到立即可解编码包的目标接收端数, 实际解码时延增量为

表 1 本文主要符号及含义

符号	含义	符号	含义
D_i	第 i 个终端节点	SCD	系统完成时延
P_j	第 j 个源数据包	ICD_i	终端 D_i 经历的完成时延
$p_{s,i}$	信源到终端 D_i 的链路丢包率	S	同一时隙并发协作重传终端集合
$p_{i,j}$	终端 D_i 到终端 D_j 的链路丢包率	$\mathcal{I}(S)$	所有可能的 S 构成的集合
H_i	终端 D_i 已正确接收到的数据包集合	$\mathcal{P}(D)$	终端间所有可能的组合
W_i	终端 D_i 丢失的数据包集合	M_w	丢失数据包集合为非空的终端集合
K	重传阶段参与编码的数据包集合	$T_i(P^*)$	终端 D_i 发送编码包 P^* 的目标接收端集合
d_i^t	终端 D_i 在时隙 t 经历的解码时延	$\mathcal{G}(v, \epsilon)$	IDNC 图
\bar{D}	所有终端经历的解码时延的平均值	$\mathcal{L}\mathcal{G}(v, \epsilon)$	终端 D_i 独立的 IDNC 图
SFM	状态反馈矩阵	$\mathcal{C}\mathcal{G}(v, \epsilon)$	发送终端冲突图

因此,为降低重传过程的平均解码时延,每次重传应选取链路丢包率小的终端作为目标接收端。

由定义4可知,完成时延由两部分构成,初始传输阶段终端自身的丢包数 $|W_i|$ 及其在重传阶段所经历的解码时延。理想情况下,所有接收端在重传阶段经历的解码时延均为0,各终端的完成时延为 $|W_i|$,此时系统完成时延为理论上的最小值:

$$\text{SCD}_{\min} = \max_{D_i:W_i \neq \emptyset} \{|W_i| + 0\} = \max_{D_i:W_i \neq \emptyset} |W_i| \quad (8)$$

假设 D_j 和 D_k 是 D_i 的 \mathcal{C}_i 内的两个终端,且 $p_{i,j} = p_{i,k}$,若只考虑降低平均解码时延,则两个候选目标接收端的优先级相同,但若同时考虑完成时延,应该比较 D_j 和 D_k 在当前时隙下的ICD,在 $\text{ICD}_j > \text{ICD}_k$ 时, D_j 应当被给予更高的优先级。

3.2 基于IDNC的时延最小化重传方案

3.2.1 IDNC 编码包选择策略

IDNC图是用来表示

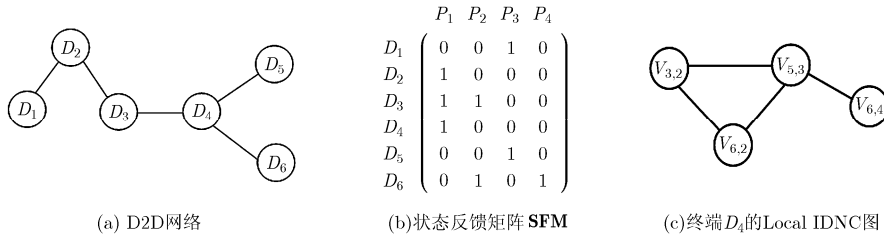


图2 D2D网络、各终端数据包接收反馈及终端 D_4 的IDNC图

团。 $\mathcal{L}\mathcal{G}_i(v,\varepsilon)$ 中的顶点 $v_{j,l}$ 的权重值为 $(1-p_{i,j}) \cdot \left[|W_j| + \sum_{t=1}^t d_j^t \right]$,终端 D_i 中最小化时延的最优编码包 P^* 为

$$P_{\max}^* = \arg \max_{P_i^* \in \mathcal{G}_i} \left[\sum_{D_j \in \mathcal{T}_i(P_i^*)} (1-p_{i,j}) \left[|W_j| + \sum_{t=1}^t d_j^t \right] \right] \quad (9)$$

最大团搜索采用贪心算法,初始为空,每次搜索将最大权重顶点加入其中,直到获得一个团。相应伪代码如表2所示。

3.2.2 协作重传终端选择策略 发送端冲突图 $\mathcal{C}\mathcal{G}(v,\varepsilon)$ 中的顶点对应系统模型终端,其中任意两个终端 D_m 和 D_n 通过边 ε 连接的条件为:

(1) $D_m \neq D_n, D_n \in \mathcal{C}_m$ or $D_m \in \mathcal{C}_n$, 即 D_m 或 D_n 中的任意一个终端在另一个终端的发送覆盖范围之内。

(2) $D_m \neq D_n, \exists D_k \neq D_m \& D_n, D_k \in \mathcal{C}_m \& D_k \in \mathcal{C}_n$, 即某一接收端同时在终端 D_m 和 D_n 的覆盖范围之内。

例2 图3为图2(a)对应的终端冲突图 $\mathcal{C}\mathcal{G}(v,\varepsilon)$ 。

数据包间编码关系的图模型,用 $\mathcal{G}(v,\varepsilon)$ 表示,用来找出可被接收端立即解码的所有可能的编码包组合。在D2D网络中,终端 D_i 根据其 \mathcal{C}_i 内终端的数据包接收反馈构建独立的IDNC图(Local IDNC graph),用 $\mathcal{L}\mathcal{G}_i(v,\varepsilon)$ 表示,顶点用 $v_{m,k} (\forall D_m \in \mathcal{C}_i, P_k \in W_m \cap H_i)$ 表示。

$\mathcal{L}\mathcal{G}_i(v,\varepsilon)$ 中的顶点 $v_{m,k}$ 与 $v_{n,l}$ 之间通过边 ε 连接,需满足以下两个条件之一:

条件1: $l=k$, 即终端 D_m 和 D_n 同时丢失数据包 P_l 。

条件2: $l \in H_m \& k \in H_n$, 即终端 D_m 和 D_n 相互拥有对方丢失的数据包。

例1 图2(a)为6个终端组成的D2D网络,图2(b)为对应的**SFM**,图2(c)为终端 D_4 的 $\mathcal{L}\mathcal{G}_4(v,\varepsilon)$ 。

将链路丢包率等时延影响因素用于 $\mathcal{L}\mathcal{G}_i(v,\varepsilon)$ 中顶点的权重值计算,进而寻找 $\mathcal{L}\mathcal{G}_i(v,\varepsilon)$ 的最大权重

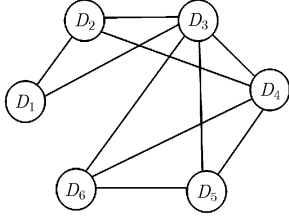
表2 IDNC 编码包选择策略伪代码

```

输入:  $\Omega$  //状态矩阵
输出:  $K_{\text{IDNC}}$  //得出权重最大编码包组合
初始化:  $K_{\text{IDNC}}$  //  $K_{\text{IDNC}}$ : IDNC 编码包组合
If  $|T_{P_k}| = |D|$  //如果存在数据包 $P_k$ 在所有接收终端均丢失
     $P^* = P_k$ 
else
    Generate  $\mathcal{L}\mathcal{G}_i(v,\varepsilon)$  //生成 Local IDNC 图
    While ( $\varepsilon \neq \emptyset$ )
         $P_{\max} = \arg \max_{v_{i,j} \in G} \{v_{i,j}\}$  //权重最大的顶点对应的数据包
         $K_{\text{IDNC}} = K_{\text{IDNC}} \cup \{P_{\max}\}$  //继续寻找权重最大的顶点,并将其对应的数据包加入到编码包中
    end while
     $P^* = \bigoplus_{P_k \in K_{\text{IDNC}}} P_k$ 
end if
transmit  $P^*$  and update  $\Omega$ 
重复以上步骤直到恢复所有丢包

```

在 $\mathcal{C}\mathcal{G}(v,\varepsilon)$ 中,不相邻的顶点满足并发协作条件。由图论中独立集的定义可知,冲突图中独立集中的终端满足并发协作条件。因此, $\mathcal{C}\mathcal{G}(v,\varepsilon)$ 中极大

图3 终端冲突图 $\mathcal{G}(v, \varepsilon)$

独立集代表的终端就是一个极大可并发协作重传终端集合。每次重传找出权重值之和最大的独立集, 即最优并发协作发送终端集。其中, $\mathcal{G}(v, \varepsilon)$ 中的顶点权重值为

$$w(D_i) = |\mathcal{C}_i \setminus T_i(P^*) \cap M_w| + |D_i \cap M_w| + \max_{P^* \in \mathcal{L}_{\mathcal{G}_i}} \left(\sum_{D_j \in T_i(P^*)} (1 - p_{i,j}) \left(|W_j| + \sum_{t=1}^t d_j^t \right) \right) \quad (10)$$

一个极大并发协作发送终端集合的权重为

$$w(s) = \sum_{D_i \in s} w(D_i) \quad (11)$$

所以, 时延最小化并发协作重传终端集 S^* 为

$$S^* = \arg \max_{S \in \mathcal{I}(s)} (w(s)) \quad (12)$$

相应伪代码如表3所示。

4 算法复杂度分析

本方案中, 初始传输阶段结束后, D_i 的 $\mathcal{L}_{\mathcal{G}_i}(v, \varepsilon)$ 中的顶点数为 $\sum_{D_j \in \mathcal{C}_i} |W_j|$, 构建所有终端的 $\mathcal{L}_{\mathcal{G}_i}(v, \varepsilon)$ 的复杂度为 $O\left(\sum_{i=1}^M \left(\sum_{D_j \in \mathcal{C}_i} |W_j|\right)^2\right)$ 。 $\mathcal{L}_{\mathcal{G}_i}(v, \varepsilon)$ 中的最大团搜索算法复杂度为 $O\left(\left(\sum_{D_j \in \mathcal{C}_i} |W_j|\right) + |\varepsilon|\right)$, 其中 $|\varepsilon|$ 为 $\mathcal{L}_{\mathcal{G}_i}(v, \varepsilon)$ 中的边数。在构建 $\mathcal{G}(v, \varepsilon)$ 时, 确定 $\mathcal{G}(v, \varepsilon)$ 中顶点之间的连接关系的计算复杂度为 $O(|M|^2)$, 搜索极大独立集的复杂度为 $O(|M|^3)$ 。综上, 本方案整体的复杂度为 $O\left(\sum_{i=1}^M \left(\sum_{D_j \in \mathcal{C}_i} |W_j|\right)^2\right) + \left(\sum_{D_j \in \mathcal{C}_i} |W_j| + |\varepsilon|\right) + (|M|^2) + (|M|^3)$ 。因此, 本方案整个算法的计算复杂度由量级最高部分决定, 为 $O(|M|^3)$ 。

5 仿真实验

本文将 DMCR 方案与 DRNC 和 CTRBC 方案进行仿真对比分析。仿真模型包括一个 BS, M 个终端及 N 个源数据包。接收端在初始传输阶段丢失部分源数据包, 各终端的丢包根据 $p_{s,i}$ 从 N 个数据包中

随机选择。终端间的连接关系用矩阵 $\mathbf{C} = (c_{i,j})_{M \times M}$, $(\forall i \in M, \forall j \in M)$ 表示, $c_{i,j} = 1$ 表示终端 D_i 和 D_j 之间通过单跳可达。D2D 网络中的连接度用 $\theta = \text{num} / M^2$ 表示, num 表示矩阵 \mathbf{C} 中“1”的个数。对比降低解码时延的编码重传方案 (Delay Reduction in multi-hop device-to-device communication using Network Coding, DRNC)^[16] 和降低完成时延的编码重传方案 (Completion Time Reduction for partially connected D2D-enabled network using Binary Codes, CTRBC)^[17], 将平均解码时延和系统完成时延作为性能标准, 研究 M, N 和 θ 对重传性能的影响。通过多次仿真实验, 得出平均实验结果。

图4分别表示平均解码时延和系统完成时延随网络连接度 θ 变化的对比。参数设置为 $M = 40$, $N = 30$, $p_{s,i} = [0.2, 0.3]$, $p_{i,j} = [0.1, 0.2]$ 。仿真结果表明, 随着网络连接度增加, 3种方案的平均解码时延和系统完成时延均有所降低, 最终逐渐趋于平稳。各终端同时重传时发生冲突的可能性增大, 当 θ 增加到最大, 不论哪种方案, 都仅能够由一个权重值最大的终端发送编码包, 此时的 DMCR 方案和 DRNC 方案性能比较接近, 且优于 CTRBC 方案。当 θ 小于 0.4 时, DMCR 方案明显优于其他两种方案, 原因在于网络连接度较小时, DMCR 方案选择的发送端集合是权重值最大、最优的。因此, 在连接度较低时, DMCR 方案明显优于 DRNC 和 CTRBC 方案。

如图5所示, 各方案的时延随数据包数 N 变化的对比。其中, 参数 $\theta = 0.2$, $M = 40$, $p_{s,i} = [0.2, 0.3]$, $p_{i,j} = [0.1, 0.2]$ 。各终端在初始传输阶段丢失的数据包数及重传次数也随 N 变化, 随着 N 的增加, 时延必定增加, 因此, 时延呈现明显的增加趋势。DMCR 方案的时延相比 DRNC 和 CTRBC 方案增加趋势平稳且缓慢。在其它条件不变的情况下随着数据包数 N 的增加, DRNC 和 CTRBC 方案的时延较接近, 但当 N 增加到 70 时, 这两种方案的时延增速加快, DMCR 方案明显优于这两种方案。

如图6所示, 各方案的性能随终端数 M 变化的对比, $\theta = 0.2$, $N = 30$, $p_{s,i} = [0.2, 0.3]$, $p_{i,j} = [0.1, 0.2]$ 。可以看出, 终端数 M 变化对时延造成的影响不大。在终端数 M 从 10 增加到 100 的过程中, DMCR 方案的平均解码时延仅从 12 增加到 25 左右, 系统完成时延也从 30 左右增加至 45 左右, 增加趋势缓慢, 增量小。同时, DMCR 方案的时延的变化波动较小, DRNC 和 CTRBC 方案在随 M 增加的过程中, 波动较大。

表 3 并发协作终端选择策略伪代码

```

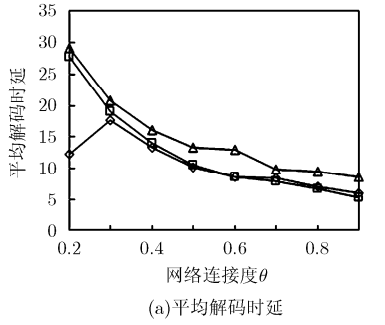
输入:  $C, \text{ConflictMatr}$  //终端连接状态矩阵, 冲突矩阵
输出: The maximum weight independent set //最优协作终端集
 $k \leftarrow 1$ 
while  $k \leq M$ 
  for  $i=k+1:M$ 
     $\text{ConflictSet}_k \leftarrow D_i$  //将  $D_j$  加入到终端  $D_k$  的冲突集合中
  end for
  delete redundant devices in  $\text{ConflictSet}_k$ 
   $k \leftarrow k + 1$ 
end while
//生成所有可协作终端将其放入可协作集  $\text{CooperateSet}$  中,
for  $i=1:M$ 
  for  $j=1:M$ 
     $\text{CooperateSet}_i \leftarrow D_i$ 
    if  $\text{ConflictMatr}(i, j) == 0$  //终端  $D_i$  和  $D_j$  同时发送编码包时不发生冲突
       $\text{CooperateSet}_i \leftarrow D_j$  // 每个终端  $D_i$  的可协作终端  $D_j$  加入到可协作终端集  $\text{CooperateSet}_i$  中
    end if
  end for
end for
//生成所有独立集, 即可同时发送端集,  $k$  为可协作发送终端数量
 $k \leftarrow 1$ 
for  $i = 1 : M$ 
  if  $\text{CooperateSet}_i$  is not empty
    if  $\text{length}(\text{CooperateSet}_i) == 1$ 
       $\text{IndependentSet}_k = D_i$ 
       $k \leftarrow k + 1$ 
    end if
    if  $\text{length}(\text{CooperateSet}_i) \geq 2$  // 可协作集中可协作终端个数大于等于 2
      for  $m = 2 : \text{length}(\text{CooperateSet}_i)$ 
         $\text{IndependentSet}_k \leftarrow D_i \cup \text{CooperateSet}_i(m)$ 
         $k \leftarrow k + 1$ 
      end for
    end if
    if  $\text{length}(\text{CooperateSet}_i) \geq 3$ 
      for level = 2 :  $\text{length}(\text{CooperateSet}_i)$  // level 记录当前独立集中终端个数
        for  $m=1$ : the row number of  $\text{IndependentSet}_k$  //独立集数
          如果  $\text{CooperateSet}_m$  中第 1 个终端是  $D_i$ , 并且  $\text{CooperateSet}_m$  中终端的个数等于当前的 level
             $q \leftarrow$  当前  $\text{CooperateSet}_i$  中最后一个终端索引
            for 如果  $\text{CooperateSet}_i$  中的终端  $D_r$  在  $\text{CooperateSet}_m$  中而不在  $\text{conflict Set}_m$  中
               $\text{IndependentSet}_k \leftarrow D_r \cup \text{CooperateSet}_m$ 
               $k \leftarrow k + 1$ 
            end for
          end for
        end for
      end if
    end if
  end if
end for
计算所有极大独立集的权重值, 选择权值最大的独立集, 得出最优并发协作发送终端集合

```

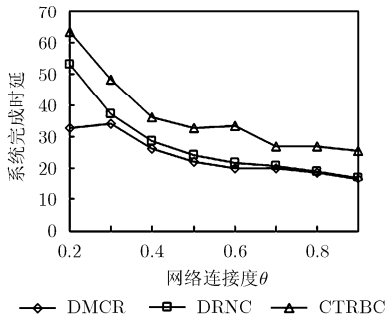
综上所述, 系统性能由多个变量共同决定, 协作重传过程中时延仅受其中一个变量的影响不大。

6 结论

本文针对 D2D 网络模型, 提出基于 IDNC 的时

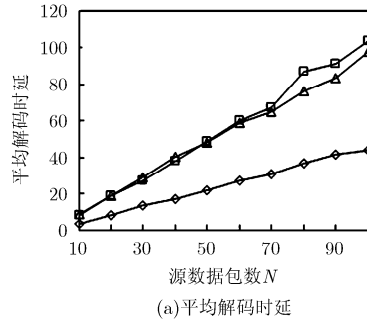


(a)平均解码时延

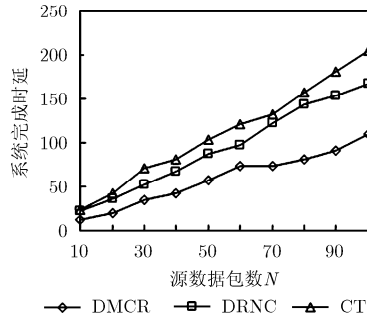


(b)系统完成时延

图4 网络连接度 θ 对性能的影响

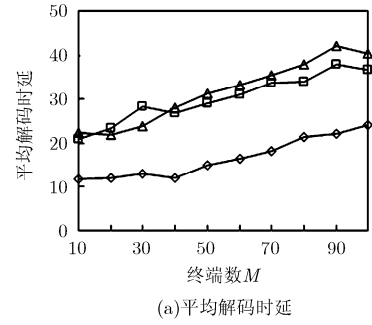


(a)平均解码时延

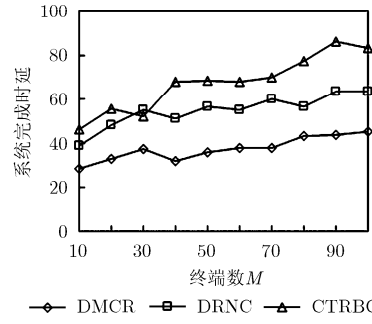


(b)系统完成时延

图5 数据包数 N 对性能的影响



(a)平均解码时延



(b)系统完成时延

图6 终端数 M 对性能的影响

延最小化重传方案 DMCR。本方案综合考虑了当各终端间连接状态和链路传输可靠性等因素不同的情况下, 构建终端发送冲突图模型, 并根据时延影响因素计算数据包权值选择最优编码包和协作重传终端, 降低重传次数, 最小化时延。仿真实验表明, 连接状态不同的 D2D 无线网络中, DMCR 方案能有效降低时延, 减少重传次数, 尤其是在网络连接度较低的情况下, 优势更为突出。本文方案可推广到无线传感器网络和 Ad hoc 等网络中。

参 考 文 献

[1] AAADI A, WANG Q, and MANCUSO V. A survey on Device-to-Device communication in cellular networks[J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, 2014, 16(4): 1801-1819. doi: 10.1109/COMST.2014.2319555.

[2] BOCCARDI F, HEATH R W, LOZANO A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 74-80. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736746.

[3] AHLSWEDER, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216. doi: 10.1109/18.850663.

[4] HO T, MEDARD M, KOETTER R, et al. A random linear network coding approach to multicast[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(10): 4413-4430. doi: 10.1109/TIT.2006.881746.

[5] KATTI S, RAHUL H, HU W, et al. XORs in the air: Practical wireless network coding[J]. *IEEE/ACM*

Transactions on Networking, 2008, 16(3): 497-510. doi: 10.1109/TNET.2008.923722.

[6] 苟亮, 张更新, 孙伟, 等. 无线网络中基于机会网络编码的加权广播重传[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(3): 749-753. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00598.

GOU Liang, ZHANG Gengxin, SUN Wei, et al. Weighted broadcasting retransmission based on opportunistic network coding in wireless networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(3): 749-753. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00598.

[7] TRASKOV D, MEDARD M, SADEGHI P, et al. Joint scheduling and instantaneously decodable network coding[C]. *IEEE Conference on Global Telecommunications*. Honolulu, USA, 2009: 3835-3840. doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425315.

[8] SOROUR S and VALAEE S. Completion delay minimization for instantly decodable network codes[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2015, 23(5): 1553-1567. doi: 10.1109/TNET.2014.2338053.

[9] GOU L, ZHANG G, BIAN Z, et al. Minimizing completion time for relay-assisted multicast with instantly decodable network coding[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(3): 434-437. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2518163.

[10] ZHAN C and XIAO F. Coding based wireless broadcast scheduling in real time applications[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, 64: 194-203. doi: 10.1016/j.jnca.2016.02.004.

[11] YAN Y, ZHANG B, and LI C. Opportunistic network coding

- based cooperative retransmissions in D2D communications[J]. *Computer Networks*, 2017, 113: 72–83. doi: 10.1016/j.comnet.2016.12.004.
- [12] TAJBAKHS S E, SADEGHI P, and ABOUTORAB N. Instantly Decodable Network Codes for Cooperative Index Coding Problem over General Topologies[M]. AUSCTW, Sydney, Australia, 2014: 84–89. doi: 10.1109/AusCTW.2014.6766433.
- [13] ABOUTORAB N, SADEGHI P, and TAJBAKHS S E. Instantly decodable network coding for delay reduction in cooperative data exchange systems[C]. IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings. Istanbul, Turkey, 2013: 3095–3099. doi: 10.1109/ISIT.2013.6620795.
- [14] ABOUTORAB N and SADEGHI P. Instantly decodable network coding for completion time or decoding delay reduction in cooperative data exchange systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(3): 1212–1228. doi: 10.1109/TVT.2015.2405917.
- [15] DOUIK A, SOROUR S, TEMBINE H, *et al.* A game theoretic approach to minimize the completion time of network coded cooperative data exchange[C]. Global Communications Conference. Austin, USA, 2014: 1583–1589. doi: 10.1109/GLOCOM.2014.7037034.
- [16] DOUIK A, SOROUR S, AL-NAFFOURI T Y, *et al.* Delay reduction in multi-hop device-to-device communication using network coding[C]. International Symposium on Network Coding. Sydney, Australia, 2015: 6–10. doi: 10.1109/NETCOD.2015.7176779.
- [17] DOUIK A and SOROUR S. Data dissemination using instantly decodable binary codes in fog-radio access networks [C]. Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Valencia, Spain, 2017: 604–609. doi: 10.1109/IWCMC.2017.7986354.
- 王 练: 女, 1976 年生, 博士, 副教授, 研究方向为网络编码、无线网络安全.
- 王 萌: 女, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为网络编码.
- 任治豪: 男, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为网络编码.
- 白佳洁: 女, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为网络编码.