

文章编号:1007-5321(2010)04-0088-05

# 延迟容忍网络中基于复制率的拥塞控制算法

刘期烈<sup>1,2</sup>, 潘英俊<sup>1</sup>, 李云<sup>2</sup>, 赵玲<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆邮电大学 移动通信重点实验室, 重庆 400065)

**摘要:** 为了解决延迟容忍网络中现有 Drop-Front (DF)、Drop-Oldest (DO) 等拥塞控制算法吞吐量较低的问题, 提出了一种在传统的传染路由协议下基于复制率的拥塞控制算法. 当节点接收新数据包缓存发生拥塞时, 节点根据数据包的复制次数和已经过的生命周期估算各数据包的复制率, 并丢弃复制率最大的数据包, 从而缓解拥塞. 仿真结果表明, 该算法较 DF 和 DO 算法降低了网络的丢包率, 提高了网络的吞吐量, 有效地缓解了拥塞.

**关键词:** 延迟容忍网络; 传染路由; 拥塞控制; 复制率

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

## Congestion Control Strategy Based on Copy Rate in DTN

LIU Qi-lie<sup>1,2</sup>, PAN Ying-jun<sup>1</sup>, LI Yun<sup>2</sup>, ZHAO Ling<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Optoelectronics Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the low throughput of the drop-front (DF) and drop-oldest (DO) in delay tolerant networks (DTN), an enhanced congestion control strategy is proposed under conventional epidemic routing, that is called drop copy rate (DCR). When the congestion of node happening, the copy rates of packets stored in buffer and arrived at this node at the same time are calculated, according to the copy numbers, the lapse time and the packet that has the highest copy rate will be deleted, and then the congestion can be relieved. Simulations indicate that DCR decreases the packet loss ratio, and improves the throughput, and relieves congestion effectively of the networks compared to DF and DO.

**Key words:** delay tolerant network; epidemic routing; congestion control; copy rate

延迟容忍网络(DTN, delay tolerant network)是从无线互联网中衍生出的一种新型网络, 被广泛应用于环境监测网络<sup>[1]</sup>、外太空网络<sup>[2]</sup>、战地网络(battle filed network)<sup>[3]</sup>等. DTN的特点是通信双方之间不总是存在可靠端到端路径, 而现有的基于TCP的无线网络拥塞控制算法<sup>[4-5]</sup>是建立在可靠端到端的路径基础上的, 因此, 这类算法已不再适用于延迟容忍网络.

现有基于传染路由<sup>[6]</sup>的拥塞控制算法 drop-random (DRA)<sup>[7]</sup>、DO<sup>[8]</sup>、drop-youngest (DY)<sup>[8]</sup>、DF<sup>[8]</sup>和 drop-last (DL)<sup>[8]</sup>均采用了队列管理的基本思想, 在节点拥塞时选择队列中适当的数据包丢弃, 释放缓存, 起到节点拥塞控制的作用. 上述几种算法没有考虑数据包在网络中的副本数, 很可能把缓存中副本数最少的数据包丢弃了, 使这些数据包不能达到目的节点, 从而发生丢包; 同时都是从删除节点缓

收稿日期: 2009-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(60702055); 重庆市教委项目(KJ090521); 重庆邮电大学基金项目(A2009-28)

作者简介: 刘期烈(1974—), 男, 讲师, 博士生, E-mail: liuql@cqupt.edu.cn; 潘英俊(1948—), 男, 教授, 博士生导师.

存数据包出发的,没有考虑节点接收的新数据包在网络中存在的副本数可能比节点中数据包在网络中副本数多. 针对以上问题,提出了一种基于复制率的拥塞控制算法. 即当节点拥塞时,删除单位时间内复制次数最多的数据包. 该算法既考虑数据包的复制次数又考虑数据包生命周期,从而降低了网络的丢包率,提高了网络的吞吐量,有效地缓解拥塞.

## 1 基于复制率的拥塞控制算法

基于复制率的节点拥塞控制算法(DCR, drop copy rate)主要从数据包的活跃程度考虑,历史时间里越活跃的数据包,其复制率越高,越容易传递到目的节点.

设DTN中共有 $n$ 个节点,每个节点的缓存最多能容纳 $L$ 个数据包. 两节点相遇后,数据包逐一传递且不分片. 网络中每个数据包 $j$ 维护一张自身信息表 $S_j$ ,表 $S_j$ 包括源节点ID(SID, source ID)、目的节点ID(DID, destination ID)、生命周期 $T_{TL}$ (time-to-live);数据包生成时间 $t_0$ 、 $t$ 时刻数据包复制次数 $N(t)$ . 数据包每经过1次复制,复制次数 $N(t)$ 加1.

网络中每个节点 $i$ 维护1张本地信息表 $D_i$ ,表 $D_i$ 包括丢弃过的数据包ID参数RID(removed ID). 为了使数据包ID成为整个网络中的唯一标识符,其ID号的编号机制采用源节点ID与数据包在源节点处生成序列号相结合的方式,即

数据包ID = 源节点ID × 数据包在源节点处生成的序列号

### 1.1 主要参数

DCR算法的主要参数如下:

- 1)  $f_p$ : 节点转发队列长度,即节点缓存中实际存储的数据包个数.
- 2)  $t_{i0}$ : 数据包 $i$ 在网络中生成的时刻;
- 3)  $N_i(t)$ :  $t$ 时刻数据包 $i$ 的复制次数;
- 4)  $r_i(t)$ : 数据包 $i$ 的复制率.

$$r_i(t) = \begin{cases} 0 & t_i = t_{i0} \\ \frac{cn_i(t_i)}{t_i - t_{i0}} & 0 < t_i - t_{i0} < T_{TL} \\ \infty & t_i - t_{i0} \geq T_{TL} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $t_i$ 为当前时刻.

### 1.2 基于复制率的拥塞控制算法流程

设节点 $A$ 、 $B$ 是任意2个节点,通信过程如下:

- 1) 节点 $B$ 向节点 $A$ 发送自己的摘要向量集合 $V_B$ ;

- 2) 节点 $A$ 收到 $V_B$ 后与自己的 $V_A$ 作比较,判断哪些数据包是被节点 $B$ 存储而自己没有的;

- 3) 节点 $A$ 向节点 $B$ 发送请求消息,请求节点 $B$ 发送由2)得知的数据包;

- 4) 节点 $B$ 复制数据包并更新 $N(t)$ 后逐一向节点 $A$ 发送;

- 5) 节点 $A$ 逐一接收节点 $B$ 发来的数据包,在存储每个数据包之前进行拥塞检测;

- 6) 根据5)的检测结果,若 $A$ 发生拥塞,节点 $A$ 执行拥塞避免操作,否则执行7);

- 7) 节点 $A$ 存储数据包并更新 $V_A$ 、 $f_q$ .

#### 1.2.1 拥塞检测

DCR算法采用2种最直接的拥塞检测算法:

- 1)  $f_q < L$ ,表示节点处并未发生拥塞;

- 2)  $f_q = L$ 表示节点处发生拥塞.

节点在每次存储数据包之前都进行拥塞检测,检测到本地处于拥塞状态,则执行拥塞避免操作.

#### 1.2.2 拥塞避免

节点拥塞时执行以下拥塞避免操作:

- 1) 节点根据表 $D_i$ 的记录,判断新数据包是否在本地被丢弃过,若没有丢弃过,执行2),否则,直接丢弃新数据包,拥塞避免结束;

- 2) 节点计算缓存中每个数据包的 $r(t)$ ,同时找出 $r(t)$ 的最大值,记为 $r_{max}$ ;读取新数据包包头中的目的节点ID,判断本节点是否为新数据包的目的节点,如果是,则执行3),否则,从新数据包包头中读取 $N(t)$ 与 $t_0$ 的值,计算出新数据包的 $r(t)$ ,并与 $r_{max}$ 作比较;如果新数据包的 $r(t)$ 小于 $r_{max}$ ,则执行3),否则,直接丢弃新数据包,并在表 $D$ 中记录新数据包ID,拥塞避免结束.

- 3) 丢弃缓存中 $r(t)$ 最大的数据包,并在表 $D$ 中记录其ID,更新 $V$ 和 $f_q$ .

## 2 仿真结果与性能分析

### 2.1 仿真场景设置

选用NS2<sup>[9]</sup>网络模拟仿真平台,在不同缓存空间和带宽仿真环境下,对DF、DO和DCR三种拥塞控制算法的性能进行了仿真. 仿真中,各节点采用two way ground模型,信道传输速率为2 Mbit/s,MAC协议采用IEEE802.11,路由协议采用Epidemic. 有效传输距离为50 m,侦听距离为250 m的节点通信范围,仿真时间为2 600 s. 仿真场景采用随机游动模型(RWP, random way point),网络覆盖范围为

1 000 m × 500 m 的矩形区域,网络中共有 45 个移动节点,每个节点的最大运动速率为 20 m/s,平均运动速率为 10 m/s。所有仿真都配置相同的恒定比特率(CBR, constant bit rate)业务流,在 45 个节点中随机选择 40 个节点作为数据源,每个数据源向 45 个节点中的 39 个节点每隔 0.8 s 发送 1 个数据,仿真中数据包的总量为 1 560 个,且每个数据包大小为 512 byte。

## 2.2 仿真性能参数

1) 丢包率即仿真中没有成功传递到目的节点的数据占所有仿真数据的比率,定义为

$$P = (N_1 - N_2) / N_1 \quad (2)$$

其中,  $N_1$  为发送数据包的个数;  $N_2$  为已接受数据包的个数。

2) 吞吐量即从目的节点正确接收第 1 个数据包开始到接收最后 1 个数据包为止,每秒成功接收的数据量,定义为

$$R = \frac{N_2}{t_{\text{last}} - t_1} S \times 8 \quad (3)$$

其中,  $S$  为包的大小,  $t_1$  表示目的节点接收第 1 个数据包的时间;  $t_{\text{last}}$  表示目的节点接收最后 1 个数据包的时间。

3) 端到端的平均交付时延即数据包从源节点成功传递到目的节点的平均时间,定义为

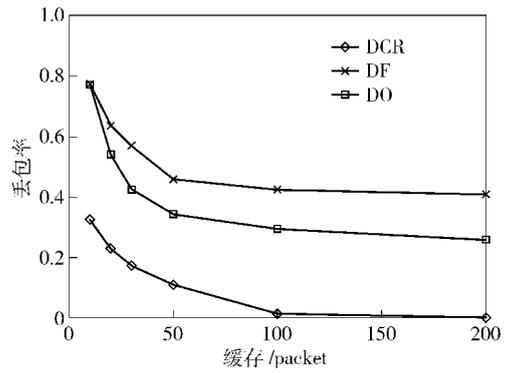
$$M = \sum_{i=1}^{N_2} t_i / N_2 \quad (4)$$

## 2.3 性能分析

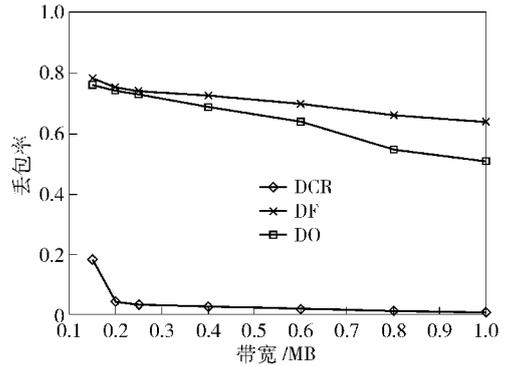
图 1 所示为 DCR、DF、DO 三种算法的网络丢包率对比。可以看出,随着节点缓存带宽和运动速度的增大,3 种算法的丢包率均呈现下降的趋势,DCR 算法的丢包率在 3 种算法中最小。

图 2 所示为 DCR、DF、DO 三种算法的网络吞吐量。可以看出,吞吐量的变化趋势与丢包率的变化趋势正相反,随着节点缓存、带宽和移动速度的增大,3 种算法的吞吐量均增大。但是,即使在节点缓存受限十分严重时,DCR 算法的吞吐量也明显好于 DF 和 DO 算法。

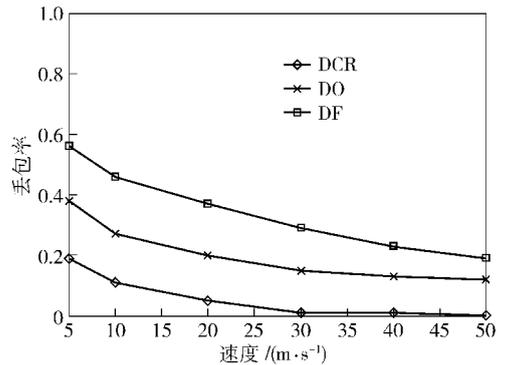
图 3 所示为 DCR、DF、DO 三种算法的端到端平均交付时延。从图 3(a)中可见,采用 DCR 算法时,端到端的平均时延增长缓慢。在缓存取值为 10、20、30、50、100 包时,DCR 算法的平均交付时延比 DF 算法大,这是因为 DCR 算法根据复制率丢包,增大了网络中复制较慢数据包的成功交付机会,即增大



(a) 丢包率随缓存空间变化



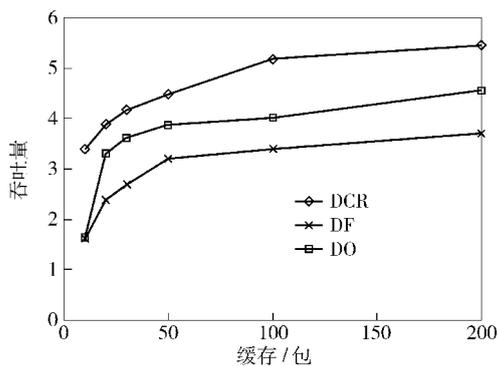
(b) 丢包率随带宽变化



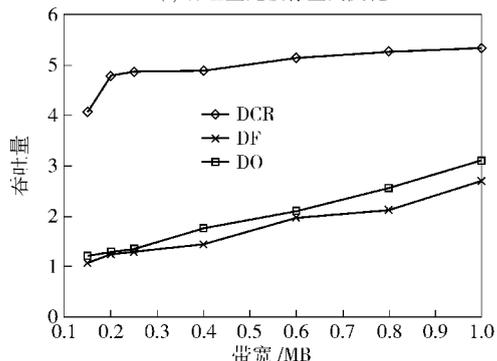
(c) 丢包率随速度变化

图 1 DCR/DF/DO 丢包率

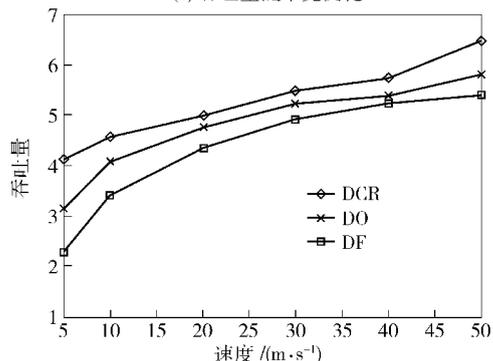
了数据包的交付时延。从图 3(b)和图 3(c)可以看出,随着带宽和节点移动速度的增加,平均时延下降。在图 3(b)中,当带宽大于 0.4 MB 时,DCR 算法的平均时延比 DO、DF 算法的平均时延小。在图 3(c)中,DF 算法平均端到端的时延最小,DCR 算法的时延居中,而 DO 算法的平均端到端时延最大。这主要是由于 DCR 算法要删除复制率最大的数据包,而让复制率较小的数据包有更多的机会发送,从而时延比 DF 算法大。在 DTN 网络中,吞吐量和丢包率 2 个参数很重要,时延略微增大是完全可以容忍的。



(a) 吞吐量随缓存空间变化

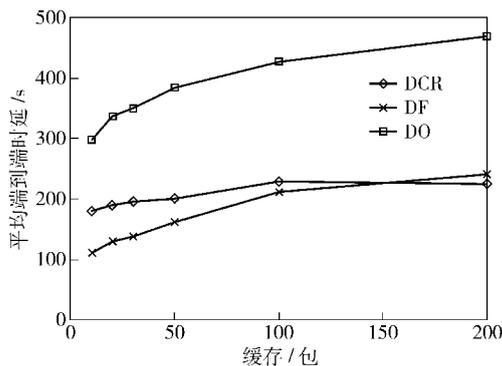


(b) 吞吐量随带宽变化

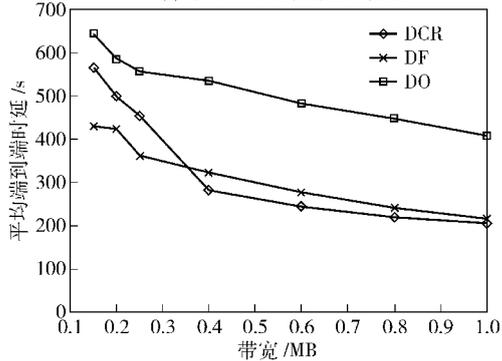


(c) 吞吐量随速度变化

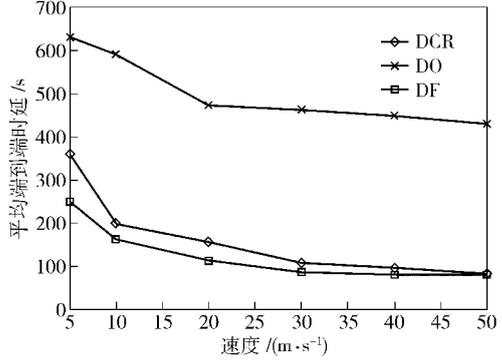
图 2 DCR、DF、DO 算法的吞吐量



(a) 平均时延随缓存空间变化



(b) 平均时延随带宽变化



(c) 平均时延随速度变化

图 3 DCR、DF、DO 算法的平均时延

### 3 结束语

本文提出了一种应用于 DTN 中的基于数据包复制率的节点拥塞控制算法 DCR. 该算法是通过数据包从源节点到当前节点的复制次数与当前节点发送该数据包的次数之和与该数据包的生命周期相结合估算出该数据包的复制率, 当节点发生拥塞时, 丢弃复制率最大的数据包, 使相对复制较慢的数据包有更多机会传递. 本文给出了 DCR 算法复制率的估算算法、拥塞控制和拥塞避免算法, 并在 NS2 上进行了仿真. 仿真结果表明, DCR 算法较 DO 和 DF 具有更高的吞吐量和更低的丢包率, 有效地缓解了拥塞.

### 参考文献:

- [1] Juang P, Oki H, Martonosi M, et al. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with zebraNet [C] // ASPLOS'02. San Jose: ACM, 2002: 96-107.
- [2] Warthman F. Delay tolerant networks (DTNs): a tutorial [EB/OL]. (2003-05-03) [http://www.ipnsig.or/reports/DTN\\_Tutorial11.pdf](http://www.ipnsig.or/reports/DTN_Tutorial11.pdf)
- [3] Burleigh S, Hooke A, Torgerson L, et al. Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary Internet [J]. Communications Magazine, 2003, 41(6): 128-136.
- [4] 姚凌, 纪红, 乐光新. 一种改进的无线 TCP 拥塞控制算法及其稳态流量模型 [J]. 北京邮电大学学报,

2005, 28(2): 42-45.

Yao Ling, Ji Hong, Yue Guangxin. A novel TCP over wireless fading channel and its steady state throughput model[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28(2): 42-45.

- [5] 李士宁, 方济平, 覃征. 一种动态门限变速增加的TCP慢启动算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(4): 640-645.

Li Shining, Fang Jiping, Qin Zheng. A dynamic threshold and varying rate TCP slow-start algorithm[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(4): 640-645.

- [6] Wang Hongpeng, Cui Lin. An enhanced AODV for mobile Ad hoc network[C]//2008 International Conference

on Machine Learning and Cybernetics. Kunming: [s. n.], 2008: 1135-1140.

- [7] James A D, Andrew H F, Brian N L. Wearable computers as packet transport mechanisms in highly-partitioned Ad hoc networks[C]//Fifth International Symposium on Wearable Computers, 2001: 141-148.

- [8] Krifa A, Baraka C, Spyropoulos T. Optimal buffer management policies for delay tolerant networks [C] // SECON'08. 5<sup>th</sup> Annual IEEE Communications Society Conference. San Francisco: IEEE Communications Society Magazines, 2008: 260-268.

- [9] 于斌, 孙斌, 温暖, 等. NS2 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 22-217.

(上接第82页)

#### 参考文献:

- [1] FCC spectrum policy task force. Report of spectrum efficiency working group [EB/OL]. Washington: Federal Communications Commission, 2002[2009-06-19]. [http://www.fcc.gov/sptf/files/SEWGFfinalReport\\_1.pdf](http://www.fcc.gov/sptf/files/SEWGFfinalReport_1.pdf).

- [2] 王朝翔, 苗建松, 丁炜. 模糊逻辑控制的MAC协议[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(6): 131-134.

Wang Zhaoxiang, Miao Jiansong, Ding Wei. A fuzzy logic MAC protocol [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(6): 131-134.

- [3] Claudia C, Kaushik R C. A survey on MAC protocols for cognitive radio networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(7): 1315-1329.

- [4] Ghasemi A, Sousa E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 32-39.

- [5] Unnikrishnan J V, Veeravalli V. Cooperative spectrum sensing and detection for cognitive radio [C] // IEEE Global Telecommunications Conference. Washington: [s. n.], 2007: 2972-2976.

- [6] Zhou C, Chigan C. A game theoretic DSA-driven MAC

framework for cognitive radio networks[C]//IEEE International Conference on Communications. Beijing: [s. n.], 2008: 4165-4169.

- [7] Ma L, Han X, Shen C C. Dynamic open spectrum sharing for wireless ad hoc networks [C] // IEEE Dynamic Spectrum Access Networks. Maryland: [s. n.], 2005: 203-213.

- [8] Pawelczak P, Prasad R V, Xia Liang, et al. Cognitive radio emergency networks-requirements and design[C]//IEEE Dynamic Spectrum Access networks. Maryland:[s. n.], 2005: 601-606.

- [9] Su Hang, Zhang Xi, CREAM-MAC: an efficient cognitive radio-enabled multi-channel MAC protocol for wireless networks [C] // IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Newport Beach: [s. n.], 2008: 1-8.

- [10] Baynast Alexandre de, Mahonen Petri, Petrova Marina. ARQ-based cross-layer optimization for wireless multi-carrier transmission on cognitive radio networks [J]. Computer Networks, 2008, 52(4): 778-794.

- [11] Baldo Nicola, Zorzi Michele. Fuzzy logic for cross-layer optimization in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 23(4): 64-71.