



文章编号:1001-9081(2019)06-1786-06

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2018102152

# 移动自组网媒体接入控制协议自私行为优化算法设计

高士娟<sup>1\*</sup>, 王喜军<sup>1</sup>, 朱清超<sup>2</sup>

(1. 郑州工业应用技术学院 信息工程学院, 河南 新郑 451100; 2. 武警工程大学 信息工程学院, 西安 710086)

(\*通信作者电子邮箱 tgzy0516zqc@126.com)

**摘要:**针对移动自组网媒体接入控制协议的自私行为处理机制中存在的静态性、不公平性和复杂性等问题,提出一种自私行为优化处理算法。首先,结合最优化理论和反馈原理,利用历史样本推导最优接入概率,实现参数的实时动态变化,改善静态性;然后,设置所有节点特定时刻均采用最优接入概率,改善网络公平索引系数;最后,采用线性迭代机制,避免算法复杂度的增加。在此基础上,利用李雅普诺夫算法和全局稳态点,理论上证明了所提算法的稳定性和有效性。实验结果表明,相比优化前,所提算法自私节点数、时延分别降低了30%~50%、8~10 ms,吞吐量、公平索引值分别提高了0.5 Mb/s、0.05,控制开销基本保持不变,自私行为处理机制的性能得到改善。

**关键词:**自私行为; 移动自组网; 媒体接入控制协议; 稳态; 李雅普诺夫算法

**中图分类号:** TP393.04    **文献标志码:**A

## Design of optimization algorithm for selfish misbehavior in medium access control protocol of mobile Ad Hoc network

GAO Shijuan<sup>1\*</sup>, WANG Xijun<sup>1</sup>, ZHU Qingchao<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University of Industry Technology, Xinzheng Henan 451100, China;

2. School of Information Engineering, Engineering University of People's Armed Police, Xi'an Shaanxi 710086, China)

**Abstract:** To address the problems like static nature, unfairness and complexity in Selfish Misbehavior (SM) processing mechanism of Medium Access Control (MAC) protocol of Mobile Ad Hoc NETwork (MANET), an optimization algorithm for SM was proposed. By using optimization theory and feedback theory, the Optimal Access Probability (OAP) was conducted through the utilization of historical samples, realizing the dynamic change of parameters to improve static nature. Then, all nodes in the network were set to use the OAP at the given period, thus the fairness index of the network was promoted. Finally, linear iteration mechanism was adopted to avoid the increase of complexity. On basis of the above, stability and effectiveness of the proposed algorithm were proved theoretically by Lyapunov algorithm and global stable point. Experimental results show that, by the proposed algorithm, the number of SM decreases by 30%~50%, the end-to-end delay brings down 8~10 ms, the throughput increases about 0.5 Mb/s, the fairness index raises by 0.05, while the control overhead remains unchanged, all of which indicates that the performance of the SM processing mechanism has been improved.

**Key words:** selfish misbehavior; Mobile Ad Hoc NETwork (MANET); Medium Access Control (MAC) protocol; stability state; Lyapunov algorithm

## 0 引言

移动自组网(Mobile Ad Hoc NETwork, MANET)以高度的自组织性、鲁棒性和抗毁性,成为地震、极地考察等恶劣环境的首选通信方式之一。但MANET缺乏基础设施等管理节点,若终端/节点修改信道参数、丢弃分组或切换休眠模式<sup>[1-2]</sup>,优先接入信道,则违背了公平性原则,自私行为(Selfish Misbehavior, SM)产生。媒体接入控制(Media Access Control, MAC)协议中SM的影响尤为显著,因为MAC协议控制分布式帧间隔、短时帧间隔、竞争窗口(Contention Window, CW)等参数,直接与信道交互,SM势必降低邻节点的接入概率,导致节点资源闲置,网络吞吐量降低;且网络层、传输层、

应用层等上层协议依赖MAC协议性能,因而后者影响范围更广,因此MAC协议中SM行为的研究备受关注。

目前MANET中MAC协议集中于分布式SM检测和处理算法的研究,后者起步较晚,研究相对较少。就检测算法而言,文献[3]指出传统DOMINO、CUSUM(CUMulative SUM)和SWN-CUSUM(Sliding Window Non-parameter CUSUM)等算法依赖接入点(Access Point, AP)的检测功能,与MANET分布式、多跳特点不符。文献[4]指出MANET中SM的研究应包含检测和反馈机制,并提出一种集数据搜集、判决和处理于一体的SM检测算法,但时延相对较高。文献[5]指出MAC协议中基于载波监听多址接入冲突避免(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, CSMA/CA)模式的分布式协调

收稿日期:2018-10-26;修回日期:2018-12-11;录用日期:2018-12-25。

基金项目:河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2017GGJS195)。

作者简介:高士娟(1981—),女,河南郑州人,讲师,硕士,主要研究方向:目标跟踪算法、算法理论; 王喜军(1982—),男,河南郑州人,讲师,硕士,主要研究方向:数据分析与处理、软件开发; 朱清超(1987—),男,山东济宁人,讲师,博士,主要研究方向:通信与信息系统、计算机组网理论。



功能(Distributed Coordination Function, DCF)协议是MANET组网的重要组成部分,虽无法完全消除SM,但可最大限度降低SM对吞吐量的影响;并提出一种自由碰撞策略,改善了DCF协议的短期公平性,但与MANET分布式不符。就处理算法而言,其概念由Kyasanur等<sup>[6]</sup>首次提出,思想在于对判定为SM的节点降低其接入概率,并提出一种分布式协作处理机制<sup>[7]</sup>,奠定了SM处理算法的基调;但适用范围受限。文献[8]针对SM导致的节点“饿死”现象,引入help标签,使得普通节点多次尝试请求发送(Request To Send, RTS)失败后仍可接入信道,缓解了SM导致的吞吐量降级问题;但控制开销已不容忽视。文献[9]在前期研究基础上,将SM分为丢弃型(Dumb)和智能型(Smart)两类,并提出通过限定参数范围实现分布式处理的思想。在此论文仅针对SM处理算法展开研究。

虽然SM处理机制取得了一定成果,但仍存在以下不足:一是静态性问题,即处理算法仅增加SM节点的接入概率,而邻节点自身参数未作调整,吞吐量并未得到根本改变,原因在于算法缺乏接入概率的预测功能,造成数据资源的浪费;二是公平性问题,即SM处理过程忽略了节点MAC协议信道接入的公平性,使得其他SM节点仍“有机可乘”;三是复杂度问题,即智能型SM处理复杂度较高。

针对上述不足,本文在不增加算法复杂度的基础上,以改善静态性和公平性为目标,将接入概率 $\tau$ 作为研究参数,针对DCF协议智能型SM,基于统计思想和最优化理论,兼顾节点公平性,提出了一种本地参数可实时更改的SM优化处理算法。该算法本质为节点均以最优接入概率接入信道时,可实现SM处理机制的优化,并限制SM性能的提升。在此基础上,基于李雅普诺夫理论证明了算法的稳定性和有效性,并仿真验证了优化算法的公平性、吞吐量等性能。

## 1 SM优化算法设计

本章基于最优化理论提出一种SM优化处理算法,使其兼顾两个目标:一是执行算法的节点 $\tau$ 收敛到最优值 $\tau_{\text{opt}}$ ,即最优化指标;二是SM节点吞吐量不高于普通节点,即公平性指标;三是为避免算法复杂度较高,应以多项式为主,尽量减少指数或对数形式。令连续两个控制分组间隔时间为一步,算法原理为:当检测到残余SM时,邻节点在下一步起始位置增加自身 $\tau_i$ ,阻止SM获得更高接入概率和吞吐量。

不难看出,算法设计的关键在于如何保证普通节点 $\tau_i$ 收敛到 $\tau_{\text{opt}}$ ,且避免吞吐量失衡。为解决该问题,将 $\tau$ 离散化,于是迭代过程可视为离散时间系统,状态空间为 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]$ , $\tau_i$ 为节点*i*任意时隙内分组发送概率,即:

$$\tau(t+1) = f(\tau(t)) \quad (1)$$

其中映射 $f: [0,1]^n \rightarrow [0,1]^n$ 为模拟动态拓扑的非线性函数,函数f的设计成为关键。

基于反馈原理,每一步中参数 $\tau_i$ 更新规则为:

$$\tau_i(t+1) = \tau_i(t) + \gamma g_i(t) \quad (2)$$

其中,标量 $\gamma > 0$ ,映射 $g_i: [0,1]^n \rightarrow [0,1]$ 。式(2)表明 $\gamma$ 值越大,收敛时间越短。为使性能最优,各节点任意时隙内传输概率不小于 $\tau_{\text{opt}}/2$ , $\tau_{\text{opt}}$ 为 $\tau_i$ 最优值(迭代获得)。令 $\tau_i(t) > 1$ 时 $\tau_i(t) = 1$ ,节点以概率1发送,换言之, $\tau_i(t)$ 取值为:

$$\tau_i(t) = \min(1, \max(\tau_i(t), \tau_{\text{opt}}/2)) \quad (3)$$

对于给定 $\tau_i(t)$ ,各 $W_i$ 值满足 $W_i(t) = 2/\tau_i(t) - 1$ ,此时问题转化为函数 $g_i(t)$ 的设计。为实现算法目标,基于最优化理论,文献[10]指出, $g_i(t)$ 可分为两部分,即:

$$g_i(t) = \sum_{j \neq i} (s_j(t) - s_i(t)) - F_i(t) \quad (4)$$

式中: $F_i(t)$ 为待设计函数; $s_i(t)$ 为节点*j*在第*t*步所得吞吐量。式(4)中各部分解释如下:

1)  $\sum_{j \neq i} (s_j(t) - s_i(t))$ 用于抑制SM吞吐量提升,当节点*i*吞吐量低于邻节点时,其值为正,则节点*i*增加传输概率 $\tau_i$ ,限制SM接入,抑制吞吐量提升;

2) 当SM发生时, $F_i(t)$ 强制系统收敛到最优值。

不难理解,此时 $g_i(t)$ 转化为 $F_i(t)$ 函数的设计。为使 $F_i(t)$ 确保 $\tau_i$ 收敛到最优值 $\tau_{\text{opt}}$ ,需满足 $\tau_i \geq \tau_{\text{opt}}$ 时, $F_i(t) \geq 0$ ,反之 $F_i(t) < 0$ ,且 $F_i(t)$ 限制SM吞吐量不高于普通节点。

假设稳态网络存在SM节点数目为 $n_r$ ,此时式(2)两边对普通节点等号恒成立,即 $\forall i \neq r$ 时, $g_i(t^\infty) = 0$ , $r$ 为SM节点集, $n_r = \|r\|$ ,则式(5)成立:

$$F_i(t^\infty) = \sum_{j \neq i} (s_j(t^\infty) - s_i(t^\infty)) = s_r(t^\infty) - s(t^\infty) \quad (5)$$

其中, $s(t^\infty)$ 为普通节点吞吐量,算法目标在于SM吞吐量不超过最优吞吐量,即 $s_r(t^\infty) \leq s_{\text{opt}}$ 。因为式(6)成立,将其代入式(5)可得式(7):

$$\begin{aligned} ns_r(t^\infty) &= s_r(t^\infty) + (n - n_r)s(t^\infty) + \\ &(n - n_r)(s_r(t^\infty) - s(t^\infty)) = \\ &\sum_{j=1}^n s_r(t^\infty) + (n - n_r)F_i(t^\infty) \leq ns_{\text{opt}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$F_i(t^\infty) \leq \left( ns_{\text{opt}} - \sum_{j=1}^n s_r(t^\infty) \right) / (n - n_r) = \frac{D(t)}{(n - n_r)} \quad (7)$$

式中 $D(t) = ns_{\text{opt}} - \sum_{j=1}^n s_r(t^\infty)$ 。

由于SM吞吐量高于普通节点, $F_i(t^\infty)$ 增加, $g_i(t)$ 减小, $\tau_i(t+1)$ 降低。换言之,SM吞吐量增加将导致下一步信道接入概率降低,使得节点所得吞吐量不高于最优值。

根据上述分析,结合式(7),函数 $F_i(t)$ 最终确定为:

$$F_i(t) = \begin{cases} D(t)/[2(n - n_r)], & \tau_i > \tau_{\text{opt}}, D(t) \geq 0 \\ -D(t)/[2(n - n_r)], & \tau_i \leq \tau_{\text{opt}}, D(t) \geq 0 \\ D(t)/(n - n_r), & D(t) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)可满足以下目标:1)使式(7)成立,保证SM无法获得额外吞吐量;2)对于普通节点,当 $\tau_i \geq \tau_{\text{opt}}$ 时, $F_i(t) \geq 0$ ,而 $\tau_i < \tau_{\text{opt}}$ 时, $F_i(t) < 0$ 。只要 $D(t) < 0$ , $F_i(t)$ 等于式(7)中上边界的一半,从而保证当存在SM时,强制其吞吐量降低,保证所有节点吞吐量均收敛至最优值。

对于给定 $g_i(t)$ 和 $F_i(t)$ ,各节点在每一步结束后计算自身吞吐量及其一跳邻节点吞吐量,代入式(2)可确定下一步接入概率,以此类推可得其收敛值 $\tau_{\text{opt}}$ 。

## 2 稳定性和有效性分析

基于算法设计目标,在此定量分析算法稳定性和有效性,稳定性确保节点收敛到最优值,有效性衡量SM的抑制能力。



## 2.1 稳定性分析

理论条件下,当所有节点均采用该算法时,网络吞吐量趋于最优值,即 $\tau_i = \tau_{\text{opt}}$ , $\forall i$ 成立。

一般而言,任意 $\tau_e \in [0,1]^n$ ,若满足条件:1)  $\forall \varepsilon > 0$ , $\exists \delta > 0$ ,对于 $\forall t$ , $\|\tau(0) - \tau_e\| < \delta \Rightarrow \|\tau(t) - \tau_e\| < \varepsilon$ ;2) 给定 $\forall \tau(0) \in [0,1]^n$ , $\lim_{t \rightarrow \infty} \tau(t) = \tau_e$ ,则称 $\tau_e$ 为全局稳态点。两者可保证系统收敛到 $\tau_e$ ,与初始状态无关,且最优值唯一。

根据式(2)可知,存在需要确定参数 $\gamma$ 取值的问题,且 $\gamma$ 值越小,式(2)收敛越慢,反之亦成立。由Ziegler-Nichols法则<sup>[11]</sup>可知, $\gamma$ 取值为系统即将变为不稳定状态时对应最大值 $\gamma_{\max}$ 的一半,即 $\gamma = \gamma_{\max}/2$ 。由于式(2)中 $g_i(t)$ 函数与 $F_i(t)$ 相关,等价于 $\gamma_{\max}$ 与 $F_i(t)$ 密切相关。

接下来介绍 $\gamma_{\max}$ 值的计算。直观而言,系统经过特定算法处理后,剩余SM数目 $n_r$ 相对较小。为简化计算,且不失一般性,令 $n_r = 1$ ,扩展到 $n_r$ 个节点时结论成立。由DCF原理可知,任意节点*i*执行二进制指数回退(Binary Exponential Backoff,BEB)算法时,节点吞吐量与Bianchi公式<sup>[12]</sup>类似。但接入概率并非一成不变,其值随SM波动。令 $\tau_i$ 为任意节点接入概率,对于N个信道竞争节点,吞吐量 $s(\tau_i)$ 表示为:

$$s(\tau_i) = \frac{E[P]}{E[\sigma_i]} \frac{\tau_i}{1 - \tau_i} \prod_{j=1}^n (1 - \tau_j) \quad (9)$$

式中,各变量含义与Bianchi公式相同,区别在于 $E[\sigma_i] = T_{tr} + \sigma \prod_j (1 - \tau_j)$ , $T_{tr}$ 为分组传输时间。令 $\tau_M = \max_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} \tau_i$ , $\tau_m = \min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} \tau_i$ 分别表示最大和最小传输概率,对应吞吐量为 $s_M$ 和 $s_m$ ,显然任意节点吞吐量 $s_m \leq s_i \leq s_M$ ,且 $\sum_{j \neq i} (s_j - s_i) \leq \sum_{j \neq i} (s_M - s_i) = (n-1)(s_M - s_i)$ 。

根据式(9)可得:

$$(n-1)(s_M - s_i) = \frac{(n-1)E[P]}{E[\sigma]} (\tau_M - \tau_i) \prod_{k \neq i, M} (1 - \tau_k) \leq \frac{(n-1)E[P]}{T_{tr} + \sigma(1 - \tau_{\text{opt}}/2)^n} (\tau_M - \tau_i) \left(1 - \frac{\tau_{\text{opt}}}{2}\right)^{n-2} = \frac{(n-1)E[P]}{T_m} (\tau_M - \tau_i) \left(1 - \frac{\tau_{\text{opt}}}{2}\right)^{n-2} \quad (10)$$

其中 $T_m = T_{tr} + \sigma(1 - \tau_{\text{opt}}/2)^n$ 。吞吐量上限不等式成立:

$$\sum_{j \neq i} (s_j - s_i) \leq \frac{(n-1)E[P]}{T_m} (\tau_M - \tau_i) \left(1 - \frac{\tau_{\text{opt}}}{2}\right)^{n-2} \quad (11)$$

同理可得吞吐量下限不等式:

$$\sum_{j \neq i} (s_j - s_i) \geq \frac{(n-1)E[P]}{T_m} (\tau_m - \tau_i) \left(1 - \frac{\tau_{\text{opt}}}{2}\right)^{n-2} \quad (12)$$

联立式(10)~(12)可得:

$$\frac{(n-1)E[P]}{T_m} (\tau_m - \tau_i) \left(1 - \frac{\tau_{\text{opt}}}{2}\right)^{n-2} \leq \sum_{j \neq i} (s_j - s_i) \leq \frac{(n-1)E[P]}{T_m} (\tau_M - \tau_i) \left(1 - \frac{\tau_{\text{opt}}}{2}\right)^{n-2} \quad (13)$$

根据全局稳态点和李亚普诺夫公式<sup>[13]</sup>,稳定系统满足 $\|\tau(t+1) - \tau_{\text{opt}}\|_\infty < \|\tau(t) - \tau_{\text{opt}}\|_\infty$ ,由于:

$$\|\tau(t) - \tau_{\text{opt}}\|_\infty = \max(|\tau_M(t) - \tau_{\text{opt}}|, |\tau_m(t) - \tau_{\text{opt}}|)$$

当 $\tau_M(t) > \tau_{\text{opt}}$ 时, $\|\tau(t) - \tau_{\text{opt}}\|_\infty = \tau_M(t) - \tau_{\text{opt}}$ 。为了实现系统稳定,式(14)成立:

$$\|\tau(t+1) - \tau_{\text{opt}}\|_\infty < \tau_M(t) - \tau_{\text{opt}} \quad (14)$$

联立式(2)、(4)和(14)可得:

$$\tau_{\text{opt}} - \tau_M < \tau_i + \gamma \left( \sum_{j \neq i} (s_j - s_i) - F_i \right) - \tau_{\text{opt}} < \tau_M - \tau_{\text{opt}} \quad (15)$$

式(15)中已省略变量 $t$ 。

当 $n_r = 1$ ,即 $F_i = -D/[2(n-1)]$ 时,由式(10)可知式(15)等价于:

$$\gamma \left( \frac{(n-1)E[P]}{T_m} (\tau_M - \tau_i) \left(1 - \frac{\tau_{\text{opt}}}{2}\right)^{n-2} + \frac{n\rho}{2(n-1)} (\tau_M - \tau_{\text{opt}}) \right) < \tau_M - \tau_i \quad (16)$$

其中 $\rho = E[P](1 - \tau_{\text{opt}})^{n-2}/T_{\text{opt}}$ 。式(16)进一步简化为:

$$\gamma < \left( \frac{(n-1)E[P]}{T_m} \left(1 - \frac{\tau_{\text{opt}}}{2}\right)^{n-2} + \frac{n\rho}{2(n-1)} \right)^{-1} \quad (17)$$

由于 $\rho < E[P](1 - \tau_{\text{opt}}/2)^{n-2}/T_m$ ,则:

$$\gamma < \left( \frac{nE[P]}{T_m} \left(1 - \frac{\tau_{\text{opt}}}{2}\right)^{n-2} \right)^{-1} \quad (18)$$

同理当 $F_i = D/[2(n-1)]$ 和 $F_i = D/(n-1)$ 时,式(18)仍成立。根据以上分析,对于 $F_i(t)$ , $\gamma$ 存在上限值为:

$$\gamma_{\max} = \left( \frac{nE[P]}{T_m} \left(1 - \frac{\tau_{\text{opt}}}{2}\right)^{n-2} \right)^{-1} \quad (19)$$

上述证明过程引入李亚普诺夫算子,即若存在连续映射无界函数 $V: [0,1]^n \rightarrow [0,1]$ ,对于 $\forall \tau \neq \tau_e$ 满足 $V(\tau - \tau_e) > 0$ , $V(\tau_e) = 0$ 和 $V(\tau(t+1) - \tau_e) < V(\tau(t) - \tau_e) > 0$ ,则 $\tau_e$ 为系统全局稳态点。此时稳态判断转变为李亚普诺夫函数V的设计。可令 $V(\tau - \tau_e) = \|\tau - \tau_e\|_\infty$ ,则 $\tau_e = \tau_{\text{opt}} = [\tau_{\text{opt}}, \tau_{\text{opt}}, \dots, \tau_{\text{opt}}]$ 即为稳态点,同时式(20)成立:

$$\|\tau(t+1) - \tau_{\text{opt}}\|_\infty < \|\tau(t) - \tau_{\text{opt}}\|_\infty \quad (20)$$

换言之,函数V使式(20)成立,且 $n \geq 2$ 时, $\tau_{\text{opt}}$ 为式(2)对应系统的全局稳态点 $\tau_e$ 。

根据全局稳态点定义可知,函数V和 $\gamma$ 取值可保证系统趋于稳定,且分析过程中假设节点包含 $s_i$ 相关信息。但由于MANET节点移动性,其值产生随机波动,系统以小概率事件偏离理论值。只要干扰受限,其值将趋于理论值,但必须满足以下条件:1) 存在两类K函数 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ ,使得 $|x| \leq c$ 时, $\alpha_1(|x|) \leq V(x) \leq \alpha_2(|x|)$ ;2) 存在K函数 $\alpha_3$ ,使得 $|x| \leq c$ 时, $V(x(t+1)) - V(x(t)) \leq -\alpha_3(|x|)$ ;3) 对于系统节点接入概率 $\tau$ ,存在连续李亚普诺夫函数;4) 系统在干扰条件时为连续函数。根据算法模型,当 $\alpha_1 = \alpha_2 = \|\tau - \tau_{\text{opt}}\|_\infty$ 时条件1)成立;当 $\|x\| \in [0, \tau_{\text{opt}}/2]$ ,即 $\|\tau - \tau_{\text{opt}}\| \leq \tau_{\text{opt}}/2$ 时条件2)成立;函数V使条件3)成立;对于任意 $\tau_i$ 和 $r_i$ , $g_i(t)$ 使条件4)恒成立。综上所述,新算法中参数 $\gamma$ 、 $F_i(t)$ 可使MANET系统趋于稳定,吞吐量收敛到最优值。

## 2.2 有效性分析

如前文所述,当所有节点采用新算法时,系统将收敛到稳态,即节点接入概率为 $\tau_i = \tau_{\text{opt}}$ ,吞吐量为 $s_i = s_{\text{opt}}$ 。在此定量分析任意节点不遵守算法时,吞吐量不超过 $s_{\text{opt}}$ 。对采用优化处理算法的节点称为普通节点,否则为SM。

下面定量证明任意节点吞吐量不超过 $s_{\text{opt}}$ 。

由于给定步数 $t'$ 和初始接入概率 $\tau_i^0$ ,节点接入概率为:



$$\tau_i(t') = \tau_i^0 + \gamma \sum_{t=0}^{t'} \left( \sum_{j \neq i} (s_j(t) - s_i(t)) - F_i(t) \right) \quad (21)$$

对于任意步数  $\tau_i \geq 1$ , 下一步  $j \neq i$  时,  $s_j = 0$  且  $F_i > -s_i$ ,  $\tau_i$  小于 1, 使得  $\tau_i$  不大于最大值  $\tau_{\max} = 1 + \varepsilon$ , 则式(21) 变为:

$$\sum_i \left( \sum_{j \neq i} (s_j(t) - s_i(t)) - F_i(t) \right) \leq s_{\max} \quad (22)$$

其中  $s_{\max} = (\tau_{\max} - \tau_i^0)/\gamma$ 。令  $s(t)$ 、 $s_s(t)$  分别为普通节点和 SM 吞吐量, 则式(22) 转化为:

$$\sum_t s_s(t) \leq \sum_t (s(t) + F_i(t)) + s_{\max} \quad (23)$$

考虑时间间隔  $T$  内 SM 平均吞吐量为  $s_s = (1/T) \sum_t s_s(t) T_{\text{beacon}}$ , 其中  $T_{\text{beacon}}$  为游标间隔, 则:

$$s_s \leq \frac{1}{T} \sum_t (s(t) + F_i(t)) T_{\text{beacon}} + s_{\max} \frac{T_{\text{beacon}}}{T} \quad (24)$$

令  $T \rightarrow \infty$ ,  $s_{\max} T_{\text{beacon}}/T \rightarrow 0$ , 即:

$$s_s \leq \frac{1}{T} \sum_t (s(t) + F_i(t)) T_{\text{beacon}} \quad (25)$$

给定  $t$  值时, 根据式(8) 可得  $F_i(t) \leq \frac{1}{n-1}(ns_{\text{opt}} - s_s(t) - (n-1)s(t))$ , 即:

$$(n-1)s(t) + s_s(t) + (n-1)F_i(t) \leq ns_{\text{opt}} \quad (26)$$

对式(26) 等号两边同时求和:

$$\sum_t (n-1)s(t) + s_s(t) + (n-1)F_i(t) \leq \sum_t ns_{\text{opt}} \quad (27)$$

根据式(25) 可知:

$$(n-1) \sum_t s_s(t) \leq (n-1) \sum_t (s(t) + F_i(t)) \quad (28)$$

联立式(25)、(26)、(28) 可得:

$$s_s = \frac{1}{T} \sum_t s_s(t) T_{\text{beacon}} \leq \frac{1}{T} \sum_t s_{\text{opt}} T_{\text{beacon}} = s_{\text{opt}} \quad (29)$$

即  $n \sum_t s_s(t) \leq n \sum_t s_{\text{opt}}$ , 表明 SM 吞吐量  $s_s$  不大于最优值  $s_{\text{opt}}$ , 则算法限制 SM 吞吐量进一步提升, 确保无额外吞吐量产生。

### 2.3 复杂度分析

本文算法复杂度包括最优接入概率和 SM 处理两部分。前者对应复杂度为  $T_1(n) \approx O(n * n + n) = O(n^2)$ , 后者对应复杂度为  $T_2(n) \approx O(n^3 * n) = O(n^4)$ , 因此该算法对应复杂度为  $T(n) = T_1(n) + T_2(n) = O(n^4)$ , 这与目前 SM 相关处理算法的复杂度基本相同, 该值可用控制开销/分组数描述。

## 3 性能仿真结果与分析

### 3.1 参数设置

假设节点为手持设备, 对应中低速运动场景, 速率限定为 2 m/s, 频率为 300 Mb/s, 分组传输速率为 11 Mb/s。对于 MANET 而言, 网络层选择动态源路由(Dynamic Source Route, DSR)协议<sup>[14]</sup>, 应用层选择恒定比特流(Constant Bit Rate, CBR), 参数设置如表 1 所示。其他参数与 IEEE 文档规范<sup>[15]</sup>保持一致, 并利用软件 NS-2<sup>[16]</sup>对协议各项性能指标进行仿真。

### 3.2 性能指标

为了衡量改进算法的性能, 分别对吞吐量、端到端时延、公平性指数和控制开销等指标进行分析(使用 awk 工具分析), 所有数据由 NS-2 中的 trace 文件获得。

吞吐量是指单位时间内成功传输的比特数, 端到端时延是指分组从源节点到目的节点成功传输所经历的时间(忽略传播时延和排队时延), 两者可衡量优化算法改进的程度。前者由式(9)计算, 值越大越好, 后者由 trace 文件统计平均获得, 值越小越好。

表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Parameters configuration in simulation

参数	取值	参数	取值
节点速度	2 m/s	路由协议	DSR
报文速率	11 Mb/s	业务流	CBR
场地大小	10 km × 10 km	仿真时间	300 s
$CW_{\min}$	16	最大连接数	10
$CW_{\max}$	256	节点数	100, 200
停留时间	0 s	SM 数目比例	10%, 20%, 30%

公平性指数用于衡量协议优化后节点接入信道的公平性程度, 值越大越好。Jain 索引<sup>[17]</sup>以其群体无关性、性能独立性、有界性和连续性等优势成为表征公平性的主流参数, 分为时间公平性和吞吐量公平性, 在此关注后者。其表达式为:

$$f(t) = \left| \sum_{i=1}^n S_i \right| / \left( n \sum_{i=1}^n S_i^2 \right) \quad (30)$$

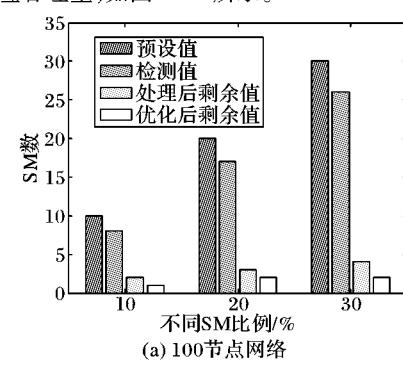
控制开销是指系统稳定后算法所产生的额外分组, 可用于表征算法的时间复杂度, 值越小越好。

为更好地衡量新算法(记为优化后)的有效性, 在此将各性能指标与文献[9]中 SM 处理结果(记为优化前)进行对比, 并通过其检测算法统计 SM 节点数。

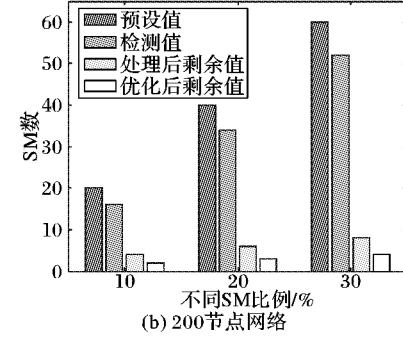
### 3.3 结果分析

#### 1) 吞吐量

吞吐量与 SM 数目相关, 为此需综合考虑优化前后 SM 剩余数和对应吞吐量, 如图 1~2 所示。



(a) 100 节点网络



(b) 200 节点网络

Fig. 1 SM number before and after optimization in networks with different nodes

从图 1 可以看出, 网络节点数一定时, 不同比例 SM 数



(10% ~ 30%) 优化后 SM 剩余值较优化前(处理后剩余值)降低约 30% ~ 50%, 意味着优化后协议吞吐量必然会提升。

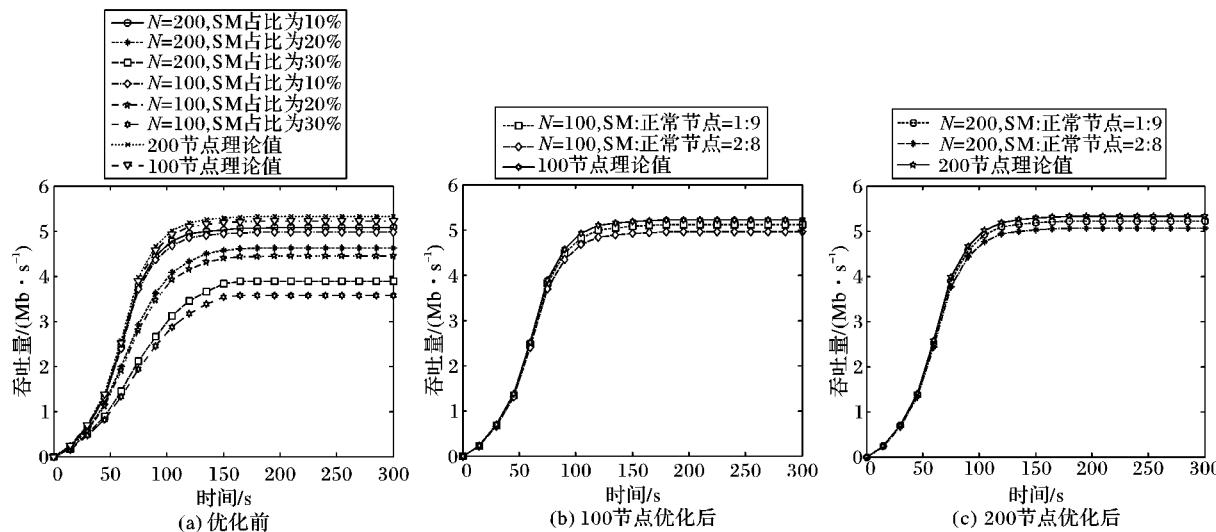


图 2 不同节点网络优化前后吞吐量

Fig. 2 Throughput before and after optimization in networks with different nodes

由图 2 可以看出, 优化前随着 SM 数的增加, 吞吐量逐渐降低, 差值达 1 Mb/s, 而优化后仍保持吞吐量与 SM 的负相关特性, 但是其差值降低到 0.5 Mb/s。原因在于节点接入概率  $\tau$  基于样本实时估计并动态变化, 降低了 SM 对网络的影响, 吞吐量得到一定改善。

### 2) 平均端到端时延。

图 3 所示为端到端时延曲线, 为避免曲线重合, 在此仅考虑网络规模为 200 节点、SM 占比 20% 时对应值。不难看出, 本文算法时延降低了 8 ~ 10 ms, 原因有二: 一是随着 SM 数的降低, 越来越多的节点成功接入链路的概率增加, 等待时间降低; 二是最优接入概率的时变特性同样降低了等待时间, 两者共同降低了分组传输时延。

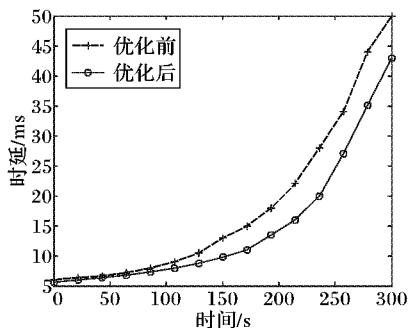


图 3 网络规模为 200 节点、SM 占比 20% 时的平均端到端时延

Fig. 3 Average end-to-end delay with network size of 200 nodes and SM accounts for 20%

### 2) 公平性。

图 4 所示为优化前后 Jain 索引值, 且稳态时优化后 Jain 索引值比优化前高 0.05, 更接近理想值 1, 前者收敛速度更快。原因在于, 理论上优化后网络节点若均以概率  $\tau_{opt}$  接入信道, Jain 索引值可达最大值 1, 而实际中受诸多因素的影响, 网络中仍存在部分 SM, 因而协议只趋于 1。同时优化前协议未考虑节点之间公平性系数, 因而其 Jain 索引值较低。

### 3) 控制开销数。

图 5 所示为优化前后协议对应控制开销。不难看出, 优

化前后协议控制开销基本保持不变, 均低于原 DCF 协议对应值。原因在于, 优化算法是以牺牲节点计算资源和存储资源换取网络性能, 并未发送额外的控制分组, 因而两者持平。

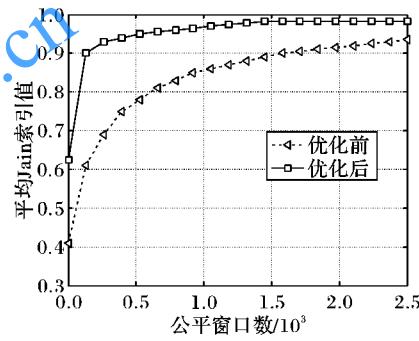


图 4 Jain 索引

Fig. 4 Jain's index

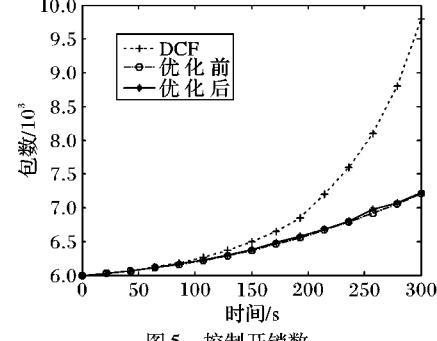


图 5 控制开销数

Fig. 5 Number of control overhead

## 4 结语

本文基于所有节点采用最优接入概率的思想, 缓解了 SM 处理机制存在的静态性和公平性问题, 理论和仿真验证了算法的稳定性、有效性和优越性。但是仍存在以下几个问题亟待解决: 一是能耗问题, 所提算法以计算资源、存储资源换取性能优化, 不难理解其能耗必然增加, 如何实现性能与能耗的均衡是必须考虑的问题; 二是多点协同处理问题, 该算法设计



过程中未考虑节点之间的互操作,如何实现节点之间的协同处理是算法改进设计的难题;三是所提算法在维持算法复杂度的基础上实现了公平性、吞吐量等性能的改善,但复杂度方面仍存在一定的改进空间,后期将继续针对上述问题展开研究。

#### 参考文献 (References)

- [1] 朱清超,陈靖,龚水清,等.移动自组网媒体接入控制协议吞吐量与公平性均衡设计[J].计算机应用,2015,35(11):3275–3279,3311.(ZHU Q C, CHEN J, GONG S Q, et al. Design of medium access control protocol tradeoff between throughput and fairness in MANET [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35 (11): 3275 – 3279, 3311.)
- [2] 朱清超,陈靖,龚水清,等.移动自组网自私行为闭环惩罚模型设计[J].计算机应用研究,2016,33(8):2446–2450.(ZHU Q C, CHEN J, GONG S Q, et al. Design of closed-loop model on selfish behavior in MANET [J]. Application Research of Computers, 2016, 33(8): 2446 – 2450.)
- [3] GUANG L, ASSI C, BENSLIMANE A. MAC layer misbehavior in wireless networks: challenges and solutions [J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 15(4): 6 – 14.
- [4] TARANNUM R, PANDEY Y. Detection and deletion of selfish MANET nodes a distributed approach [C]// Proceedings of the 2012 1st International Conference on Recent Advances in Information Technology. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 152 – 156.
- [5] SANABRIA-RUSSO L, BARCELO J, BELLALTA B, et al. A high efficiency MAC protocol for WLANs: providing fairness in dense scenarios [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25 (1): 492 – 505.
- [6] KYASANUR P, VAIDYA N H. Selfish MAC layer misbehavior in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 5(4): 502 – 516.
- [7] KYASANUR P, VAIDYA N H. Detection and handling of MAC layer misbehavior in wireless networks [C]// Proceedings of 2003 International Conference on Dependable Systems and Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2003: 1 – 10.
- [8] HUANG C, LEA C-T, WONG A K-S. Fairness enhancement for 802.11 MAC [C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Access Networks, LNICST 37. Berlin: Springer, 2010: 25 – 39.
- [9] LI M, SALINAS S, LI P, et al. MAC-layer selfish misbehavior in IEEE 802.11 Ad Hoc networks: detection and defense [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(6): 1203 – 1217.
- [10] KONORSKI J. A game-theoretic study of CSMA/CA under a back-off attack [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14 (6): 1167 – 1178.
- [11] FRANKLIN G F, POWELL J D, WORKMAN M L. Digital Control of Dynamic Systems [M]. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990: 192 – 196.
- [12] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535 – 547.
- [13] KALIL H K. Nonlinear Systems [M]. 3rd ed. New York: Macmillan, 2002: 174 – 180.
- [14] MISTRY H P, MISTRY N H. A survey use of ACO on AODV & DSR routing protocols in MANET [C]// Proceedings of the 2015 International Conference on Innovations in Information Embedded and Communication System. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1 – 6.
- [15] EASTLAKE 3rd D E, ABLEY J. IANA considerations and IETF protocol and documentation usage for IEEE 802 parameters: RFC7042 [EB/OL]. [2018-09-26]. <https://tools.ietf.org/pdf/rfc7042.pdf>.
- [16] CHUNG J, CLAYPOOL M. NS by example [EB/OL]. [2018-09-26]. <http://nile.wpi.edu/NS/>.
- [17] JAIN R K, CHIU D-M W, HAVE W R. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems: DEC-TR-301 [R]. Hudson, MA: Eastern Research Laboratory, 1984.

This work is partially supported by the Young Backbone Teachers Development Program for Higher Institutions of Henan (2017GGJS195).

**GAO Shijuan**, born in 1981, M. S., lecturer. Her research interests include target tracking algorithm, algorithm theory.

**WANG Xijun**, born in 1982, M. S., lecturer. His research interests include data analysis and processing, software development.

**ZHU Qingchao**, born in 1987, Ph. D., lecturer. His research interests include communication and information system, computer networking theory.