

变时延移动 Ad-Hoc 网络容量非合作规划博弈模型的渐近稳定性*

杨娟^{1)2)†} 杨丹³⁾ 黄彬⁴⁾ 张小洪³⁾ 杨聪⁵⁾

1) (重庆大学通信工程学院, 重庆 400030)

2) (中国人民解放军重庆通信学院三系, 重庆 400035)

3) (重庆大学软件学院, 重庆 400030)

4) (中国人民解放军重庆通信学院基础部, 重庆 400035)

5) (中国人民解放军重庆通信学院一系, 重庆 400035)

(2013年8月12日收到; 2013年10月28日收到修改稿)

移动 Ad-Hoc 网络容量的稳定性是保证其服务质量的关键性质之一. 本文提出一种新颖的考虑时变传播时延的非合作规划博弈移动 Ad-Hoc 网络容量分析模型稳定性控制技术. 首先求得加入时变传播时延项的非合作规划博弈移动 Ad-Hoc 网络容量分析模型的源节点发送流量速率演化方程组——一类非线性时变时滞微分方程组, 在此基础上采用描述器技术结合线性矩阵不等式技术得到该模型的渐近稳定性准则, 并设计了模型稳定性控制的迭代算法. 由于是基于等价模型变换, 所提出的渐近稳定性判别准则具有较小的保守性. 仿真实验验证了本算法的有效性. 本建模与分析方法虽以具体的非合作规划博弈移动 Ad-Hoc 网络容量分析模型为例, 但其可以应用于一般的移动 Ad-Hoc 网络容量稳定性控制问题.

关键词: 非合作规划博弈, 时变传播时延, 描述器, 线性矩阵不等式

PACS: 05.45.-a, 02.30.Yy

DOI: 10.7498/aps.63.020501

1 引言

网络容量是移动 Ad-Hoc 网络 (MANETs) 的关键特性^[1,2]. 但 MANETs 中节点传输数据时共享信道不可避免地存在竞争, 故对于一个多跳业务流来说, 普遍存在流间竞争和流内竞争, 极易导致部分信息流丢失, 无谓浪费 MANETs 有限的带宽资源, 进而降低网络容量. 为最大限度地利用 MANETs 资源, 应使通过链路的信息流速率趋向于平衡, 最好接近于链路容量, 而不是在剩余带宽和完全超载之间持续地振荡, 从而使 MANETs 容量趋于稳定. 但由于 MANETs 是一个分布式时变

动态系统, 同时因 MANETs 自身的诸多因素, 如功率、带宽、通信模式、路由策略、干扰模型等影响着其容量, 使得 MANETs 容量稳定性控制问题成为一个极具挑战性的课题.

尽管目前对于通信系统信道容量^[3]、MANETs 容量^[4-6]、有基站的网络^[7,8]及无中心基站的分布式网络^[9-11]的稳定性已有较多研究成果, 但由于分布式网络 MANETs 容量模型多为非线性动态方程^[12-14], 而研究非线性动态方程稳定性的文献本并不多^[15-17], 故对于 MANETs 容量稳定性分析的研究就更为少见. 文献^[14]基于流量平衡原理得到 MANETs 稳定吞吐量稳定性条件的描述; 文献

* 国家自然科学基金 (批准号: 61173131)、中央高校基本科研业务费跨学科类重大项目 (批准号: CDJZR12098801)、重庆市基础与前沿研究计划 (批准号: cstc2013jcyjA40033)、重庆市重点攻关项目 (批准号: CSTC2009AB2230)、重庆市攻关项目 (批准号: 2009AC2057) 和重庆市博士后特别资助项目 (批准号: XM20120054) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: juanyang@cqu.edu.cn

[18] 用一般博弈论分析 MANETs 容量并进行了端到端最大吞吐量的稳定性分析; 文献 [19] 利用相对熵约束方法研究了一类 MANETs 的容量稳定性控制范围. 但上述文献均未采用 Lyapunov 稳定性理论对 MANETs 容量的稳定性进行分析. 文献 [20] 虽采用 Lyapunov 稳定性理论分析了 MANETs 容量的稳定性, 但未考虑链路中的数据传播时延.

考虑数据传播时延的 MANETs 容量分析模型无疑是非线性时变时滞系统, 非线性时变时滞系统广泛出现在航天、通信、生物系统等领域 [21–28], 而已有的对其稳定性的研究由于在模型变换时引入额外的动力学讨论而使结论变得保守而实用性较差 [29]. 描述器作为基于不产生任何额外动力学讨论的中立型模型变换技术 [29], 正是分析非线性动态时滞系统稳定性且使所得判定准则具有较小保守性的有力工具 [29,30], 而将其运用于 MANETs 容量分析模型的稳定性控制国内外还未见报道.

同时, 利用 Lyapunov 稳定性理论, 针对考虑时变传播时延的 MANETs 的容量稳定性研究还处于起步萌芽阶段, 尤其将描述器技术结合线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 方法运用到基于含有变时延项的非线性动态微分方程建模的 MANETs 容量稳定性研究领域仍然是一片崭新的研究天地. 本研究基于文献 [20, 31] 的研究, 从全新的角度——描述器技术结合 LMI 方法 [32,33], 对归一化时间内基于无冲突共享单信道、考虑时变传播时延的 MANETs 容量分析模型的稳定性进行了分析, 旨在针对采用非竞争无冲突类多路访问控制 (MAC) 协议的 MANETs 建立保守性小的、统一的容量稳定性控制框架.

本文具体组织如下: 第 2 节基于非合作规划博弈的 MANETs 容量分析模型, 建立了不考虑时变传播时延的分布式时变动态系统 MANETs 源节点发送流量速率演化方程组; 第 3 节基于不考虑时变传播时延的分布式时变动态系统 MANETs 源节点发送流量速率演化方程组, 得到加入时变传播时延项的分布式时变动态系统 MANETs 源节点发送流量速率演化方程组——一类非线性动态微分时滞方程组, 重点基于描述器技术及 LMI 方法, 系统分析了该方程组的渐近稳定性准则, 给出稳定性控制算法; 第 4 节给出了 4 组仿真实验结果; 第 5 节是结论.

2 问题描述和系统模型

2.1 MANETs 容量分析的非合作规划博弈模型

设任一广义 MANETs 的网络拓扑为 $M = (N, L)$, 其中节点集 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, 链路集 $L = \{1, 2, \dots, m, \dots, j\}$; 源节点集合 $K = \{1, 2, \dots, i, \dots, k\}$ 共享链路集合 L . 对于每个源节点 i , 它的路由链路由集合 $L_i = \{l_{i_m}\}, l_{i_m} \in L$ 组成, 显然 $L_i \subset L$; 且网络中每一条链路都有一个固定容量 g_m , 一个固定的数据缓冲区 B_i , $g_m > 0, B_i > 0$, 则 MANETs 中源节点发送流量速率分配的非合作规划博弈可表示为 $G = \{K, \{\Omega_i\}, \{u_i(x_i)\}\}, i = 1, 2, \dots, k$. 且假定时间被划分为固定长度的时隙, 设 S 表示在归一化时间 1 内所有可并发链路的场景, 即归一化时间 1 内的可行链路集, $S = \{s_{\{m\}}, \{m\} \subset L\}$, 其中每一个 $s_{\{m\}}$ 表示 MANETs 中一个可并发场景的可行链路集合. 模型中所用变量的定义及说明见表 1.

定义 1 [20,31] 如果在归一化时间内, 满足 (1) 式的时间分配的链路调度集叫做 MANETs 的可行调度链路集:

$$\left. \begin{aligned} t_{s_m} &\geq 0 \\ \sum_{s_{\{m\}} \in S} t_{s_{\{m\}}} &\leq 1 \\ t_{s_m} &= t_{s_{\{m\}}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

注: 由于可行调度链路集是以获得单位时间内无冲突最大并发链路为优化目标 [31], 而 MAC 协议的主要设计目标是避免共享信道的业务碰撞, 使得链路吞吐率最大化, 故获得可行调度链路集的方法对于设计非竞争无冲突类的 MAC 协议 (如时分多址 TDMA) 具有普遍的指导意义. 获得可行调度链路集方法我们已在前期工作中解决 [30].

定义 2 [20,31] 在归一化时间内, 有 n 个节点, j 条链路的 MANETs 中如果存在能同时并发并且无相互干扰的最大可行链路集 S_{\max} , 且 S_{\max} 为满足 (1) 式的可行调度链路集, 则 MANETs 容量为

$$C(n) = \sum_{s_{\{m\}} \in S_{\max}} \left(\sum_{\substack{i \in K \\ m \in s_{\{m\}}}} x_i^* \right),$$

其中, K 表示源节点集合, $x_i > 0, i = 1, 2, \dots, k$ 表示源节点 i 发送流量的速率, $m = 1, 2, \dots, j$ 表示链路数, $\{x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*\}$ 表示 Nash 均衡解.

注: x_i^* 为非合作规划博弈.

$$G = \{K, \{\Omega_i\}, \{u_i(x_i)\}\} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

中博弈节点 (源节点) i 在发送流量速率 x_i 的策略空间 Ω_i 内, 取值范围在 $[0, g_{l_i}]$, $g_{l_i} = \min\{g_{l_{i_m}}, l_{i_m} \in L_i\}$ 上的约束下, 最大化效用函数

$$u_i(x_i) = \alpha_i \sum_{l_{i_m} \in s_{\{m\}}} \lg \left(\frac{x_{i,l_{i_m}}^h + 1}{g_{l_i}} \right) - \beta_i \sum_{l_{i_m} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{t_{s_{l_{i_m}}} g_{l_i} - x_{l_{i_m}}}, \quad (3)$$

所求出的Nash均衡解 $\{x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*\}$ 中源节点 i 的Nash均衡流量速率. 显然, 在理想状态下,

$x_i = x_{i,l_{i_m}}^h$, 故 $\Omega_i = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 可用

$$\left\{ \begin{aligned} x_{i,l_{i_m}}^h | x_{l_{i_m}} &= \sum_{h \in K} x_{i,l_{i_m}}^h < t_{s_{l_{i_m}}} g_{l_i} \\ i &= 1, 2, \dots, k, m = 1, 2, \dots, j \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

表示, $g_{l_i} = \min\{g_{l_{i_m}}, l_{i_m} \in L_i\}$ 表示预定路由链路集合 $\{l_{i_m}\}$ 的最小容量, α_i 表示节点 i 对发送流量速率 x_i 的敏感程度, 由节点 i 采用的功率、可用内存大小、信号调制方法、编码方式以及与连接 i 的链路带宽、路由策略等因素决定; β_i 表示节点 i 采用发送流量速率 x_i 对排队时延的敏感程度.

注: 本模型Nash均衡解的存在性已在前期工作中得到证明 [30].

表1 变量定义及说明

变量定义	变量说明
$L = \{1, 2, \dots, m, \dots, j\}$	链路集合
K	源节点集合
k	源节点数
$x_i, i = 1, 2, \dots, k$	源节点 i 发送数据流量的速率
$\{x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*\}$	Nash 均衡解
$x_{i,l_{i_m}}^h, h = 1, 2, \dots, k$	源节点 i 发送的流量速率 x_i 经过链路 l_{i_m} 的第 h 个流量速率
$x_{l_{i_m}} = \sum_{h \in K} x_{i,l_{i_m}}^h$	经过链路 l_{i_m} 的流量速率之和
g_m	链路 m 的容量
Ω_i	源节点 i 流量分配速率策略空间
$u_i(x_i)$	源节点 i 流量分配速率效用函数
$S = \{s_{\{m\}}, \{m\} \subset L\}$	归一化时间 1 内的可行链路集
$s_{\{m\}}$	一个可并发场景的可行链路集合
$ s_{\{m\}} $	并发场景 $s_{\{m\}}$ 中的可行链路数
$T = \{t_{s_{\{m\}}} : s_{\{m\}} \in S\}$	归一化时间 1 内所有并发场景占用时间集合
$t_{s_{\{m\}}}$	分配给链路 m 的时间比率

2.2 不考虑时延的分布式时变动态系统 MANETs 源节点发送速率演化方程组

考查分布式时变动态系统 MANETs 源节点发送流量速率随时间的变化率, 考虑最简单的 MANETs 博弈动态系统: 每个源节点发送流量速率随时间的变化率与其效用函数关于发送速率的

变化率成正比 [34], 将文献 [20] 中的不考虑时延的分布式时变动态系统 MANETs 源节点发送流量速率演化方程 (5) 扩展为方程组, 即得到不考虑时延的分布式时变动态系统 MANETs 源节点发送流量速率演化方程组.

定义 3 不考虑时延的分布式时变动态系统 MANETs 源节点发送流量速率演化方程组为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \omega\alpha_1 \sum_{l_{1m} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{x_{1,l_{1m}}^h(t) + gl_1} - \omega\beta_1 \sum_{l_{1m} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{\left(t_{sl_{1m}} gl_1 - \sum_{h \in K} x_{i,l_{1m}}^h(t)\right)^2} \\ \dots \\ \dot{x}_i(t) = \omega\alpha_i \sum_{l_{im} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{x_{i,l_{im}}^h(t) + gl_i} - \omega\beta_i \sum_{l_{im} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{\left(t_{sl_{im}} gl_i - \sum_{h \in K} x_{i,l_{im}}^h(t)\right)^2} \\ \dots \\ \dot{x}_k(t) = \omega\alpha_k \sum_{l_{km} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{x_{k,l_{km}}^h(t) + gl_k} - \omega\beta_k \sum_{l_{km} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{\left(t_{sl_{km}} gl_k - \sum_{h \in K} x_{i,l_{km}}^h(t)\right)^2} \end{cases}, \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, k; m = 1, 2, \dots, j; h = 1, 2, \dots, k; \omega \in R^+$ 且为常数 α_i, β_i 物理含义如定义 2 所述.

定义 4 S-procedure^[33]: 定义集合 $Z = \{z\}$ 并设 $F(z), \sigma_1(z), \sigma_2(z), \dots, \sigma_k(z)$ 是实值泛函, 进一步定义 $D = \{z \in Z : \sigma_1(z) \geq 0, \sigma_2(z) \geq 0, \dots, \sigma_k(z) \geq 0\}$, 考虑以下两个条件:

- (A) $F(z) \geq 0, \forall z \in D, z \neq 0,$
- (B) $\exists \varepsilon_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, N,$ 使得

$$\delta(\varepsilon, z) = F(z) - \sum_{\tau=1}^k \varepsilon_\tau \sigma_\tau(x) > 0 \quad \forall z \in Z, \quad (6)$$

则两个条件中可以通过条件 (B) 推出条件 (A).

S-procedure 就是通过判断条件 (B) 的真实性来验证条件 (A) 是否成立. 一般来说, 条件 (B) 比条件 (A) 要更容易检验. 因此, 通过应用 S-procedure 可以找到检验 (A) 成立与否的一个更有效的方法.

3 考虑时变传播时延的 MANETs 容量分析非合作规划博弈模型的稳定性

在方程组 (5) 中, 考虑最简单情形: 取 $\omega = 1,$ 且由于 $\alpha_i \sum_{l_{im} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{x_{i,l_{im}}^h(t) + gl_i}$ 表示 MANETs 非合作规划博弈中, 源节点 i 采用发送流量速率 x_i 在比例公平意义下的链路累积收益变化率^[30], 故仅在其博弈的成本项——排队时延变化率项 $\beta_i \sum_{l_{im} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{\left(t_{sl_{im}} gl_i - \sum_{h \in K} x_{i,l_{im}}^h(t)\right)^2}$ 中^[30] 考虑数据传播时的时变传播时延.

此时 x_i 应为 t 的函数, 即 $x_i(t).$ 设 $r(t)$ 表示节点 i 发送流量速率为 $x_i(t)$ 的数据流经过链路 $l_{im}, m = 1, 2, \dots, j$ 所产生的时变传播时延. 则排队时延变化率项可写为

$$\beta_i \sum_{l_{im} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{\left(t_{sl_{im}} gl_i - \sum_{h \in K} x_{i,l_{im}}^h(t - r(t))\right)^2}, \quad (7)$$

且 $r(t)$ 是关于 t 的函数, $0 \leq r(t) \leq r_\Gamma, \dot{r}(t) \leq r_d, r_\Gamma, r_d$ 为常数. 同时, 为考查 $t_{sl_{im}} gl_i$ 对 $r(t)$ 的影响, 进一步将其恒等变形为

$$\beta_i \min\{t_{sl_{im}} gl_i\} \sum_{l_{im} \in s_{\{m\}}} \frac{1}{\left(t_{sl_{im}} gl_i - \sum_{h \in K} x_{i,l_{im}}^h(t - r(t))\right)^2 * \min\{t_{sl_{im}} gl_i\}}, \quad (8)$$

则得到考虑时变传播时延的 MANETs 容量分析非合作规划博弈模型源节点发送流量速率演化方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1(t) = \alpha_1 \sum_{l_{1m} \in S\{m\}} \frac{1}{x_{1,l_{1m}}^h(t) + g_{l_1}} - \beta_1 \min\{t_{sl_{1m}} g_{l_1}\} \\ \quad \times \sum_{l_{1m} \in S\{m\}} \frac{1}{\left(t_{sl_{1m}} g_{l_1} - \sum_{h \in K} x_{i,l_{1m}}^h(t-r(t))\right)^2 * \min\{t_{sl_{1m}} g_{l_1}\}} \\ \dots \\ \dot{x}_i(t) = \alpha_i \sum_{l_{im} \in S\{m\}} \frac{1}{x_{i,l_{im}}^h(t) + g_{l_i}} - \beta_i \min\{t_{sl_{im}} g_{l_i}\} \\ \quad \times \sum_{l_{im} \in S\{m\}} \frac{1}{\left(t_{sl_{im}} g_{l_i} - \sum_{h \in K} x_{i,l_{im}}^h(t-r(t))\right)^2 * \min\{t_{sl_{im}} g_{l_i}\}} \\ \dots \\ \dot{x}_k(t) = \alpha_k \sum_{l_{km} \in S\{m\}} \frac{1}{x_{k,l_{km}}^h(t) + g_{l_k}} - \beta_k \min\{t_{sl_{km}} g_{l_k}\} \\ \quad \times \sum_{l_{km} \in S\{m\}} \frac{1}{\left(t_{sl_{km}} g_{l_k} - \sum_{h \in K} x_{i,l_{km}}^h(t-r(t))\right)^2 * \min\{t_{sl_{km}} g_{l_k}\}} \end{array} \right. , \quad (9)$$

$i = 1, 2, \dots, k, m = 1, 2, \dots, j, h = 1, 2, \dots, k$

方程组 (9) 是一个非线性时变时滞微分方程组. 为了使对方程组 (9) 的分析不引入额外的动力学讨论, 首先对其进行如下恒等变换.

定理 1 MANETs 容量分析非合作规划博弈模型源节点发送流量速率演化方程组 (9) 等价于描述器 [30]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = y(t) \\ y(t) = \mathbf{A}f(x(t)) + \mathbf{B}g(x(t-r(t))) \end{cases} .$$

证明 简记 $f_i(x(t)) = \sum_{l_{im} \in S\{m\}} \frac{1}{x_{i,l_{im}}^h(t) + g_{l_i}}$,

$$g_i(x(t-r(t))) = \sum_{l_{im} \in S\{m\}} \frac{1}{\left(t_{sl_{im}} g_{l_i} - \sum_{h \in K} x_{i,l_{im}}^h(t-r(t))\right)^2 * \min\{t_{sl_{im}} g_{l_i}\}}$$

则 $\dot{x}_i(t) = \alpha_i f_i(x(t)) - \beta_i \min\{t_{sl_{im}} g_{l_i}\} g_i(x(t-r(t))) \quad i = 1, 2, \dots, k; m = 1, 2, \dots, j$. 再令 $\dot{x}(t) = [\dot{x}_1(t) \dot{x}_2(t) \dots \dot{x}_k(t)]^T, y(t) = \dot{x}(t)$,

$$f(x(t)) = [f_1(x(t)) f_2(x(t)) \dots f_k(x(t))]^T,$$

$$g(x(t-r(t))) = [g_1(x(t-r(t))) g_2(x(t-r(t))) \dots g_k(x(t-r(t)))]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\beta_1 \min\{t_{sl_{1m}} g_{l_1}\} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\beta_2 \min\{t_{sl_{2m}} g_{l_2}\} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -\beta_k \min\{t_{sl_{km}} g_{l_k}\} \end{bmatrix},$$

则方程组 (7) 等价于

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = y(t) \\ y(t) = \mathbf{A}f(x(t)) + \mathbf{B}g(x(t-r(t))) \end{cases} . \quad (10)$$

系统(9)和(10)是完全等价的,这将使得对原模型稳定性分析不会产生任何额外动力学讨论,并减少所得结论的保守性.

显然,作为描述器(10)非线性项的 $f(x(t)), g(x(t-r(t)))$ 在(4)式的约束下满足

$$\begin{aligned} \|f(x(t))\| &\leq \varphi^2 \|x(t)\| \\ \|g(x(t-r(t)))\| &\leq \theta^2 \|x(t-r(t))\|, \end{aligned} \tag{11}$$

其中, $\varphi \geq 0, \theta \geq 0$ 是给定常数. 约束条件(11)也可被写为

$$\begin{aligned} f^T(x(t))f(x(t)) &\leq \varphi^2 x^T(t)x(t), \\ g^T(x(t-r(t)))g(x(t-r(t))) &\leq \theta^2 x^T(t-r(t))x(t-r(t)). \end{aligned} \tag{12}$$

定理2 如果存在 $P_1 = P_1^T > 0, Q = Q^T > 0$, 实矩阵 P_2, P_3 , 标量 $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$, 使得如下LMI(13)式成立

$$\Xi = \begin{bmatrix} Q + \varepsilon_1 \varphi^2 I & P_1 - P_2^T & 0 & P_2^T A & P_2^T B \\ P_1^T - P_2 & -(P_3 + P_3^T) & 0 & P_3^T A & P_3^T B \\ 0 & 0 & -(1-r_d)Q + \varepsilon_2 \theta^2 I & 0 & 0 \\ A^T P_2 & A^T P_3 & 0 & -\varepsilon_1 I & 0 \\ B^T P_2 & B^T P_3 & 0 & 0 & -\varepsilon_2 I \end{bmatrix} < 0, \tag{13}$$

则动态系统(10)是渐近稳定的.

证明 构造如下形式Lyapunov-Krasovskii泛函:

$$\begin{aligned} V(t) &= V_1(t) + V_2(t) \\ &= (x^T(t)y^T(t)) \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ P_2 & P_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} + \int_{t-r(t)}^t x^T(s)Qx(s)ds, \end{aligned}$$

其中 $P_1 = P_1^T > 0, Q = Q^T > 0$ 及实矩阵 P_2, P_3 是待定矩阵, 标量 $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$ 是待定常数. 计算 $V(t)$ 沿系统(8)的导数, 得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= 2(x^T(t)y^T(t)) \begin{bmatrix} P_1 & P_2^T \\ 0 & P_3^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} y(t) \\ 0 \end{pmatrix} + x^T(t)Qx(t) - x^T(t-r(t))Qx(t-r(t)) \\ &= 2(x^T(t)y^T(t)) \begin{bmatrix} P_1 & P_2^T \\ 0 & P_3^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} y(t) \\ -y(t) \end{pmatrix} + 2(x^T(t)y^T(t)) \begin{bmatrix} P_1 & P_2^T \\ 0 & P_3^T \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{pmatrix} 0 \\ Af(x(t)) + Bg(x(t-r(t))) \end{pmatrix} + x^T(t)Qx(t) - (1-r_d)x^T(t-r(t))Qx(t-r(t)) \\ &\leq 2x^T(t)(P_1 - P_2^T)y(t) - y^T(t)(P_3 + P_3^T)y(t) + 2x^T(t)P_2^T Af(x(t)) \\ &\quad + 2x^T(t)P_2^T Bg(x(t-r(t))) + 2y^T(t)P_3^T Af(x(t)) + 2y^T(t)P_3^T Bg(x(t-r(t))) \\ &\quad + x^T(t)Qx(t) - (1-r_d)x^T(t-r(t))Qx(t-r(t)) \\ &= \lambda^T(t)\Xi_0\lambda(t) \end{aligned}$$

其中, $\lambda^T(t) = (x^T(t) \ y^T(t) \ x^T(t-r(t)) \ f^T(x(t)) \ g^T(x(t-r(t))))$

$$\Xi_0 = \begin{bmatrix} Q & P_1 - P_2^T & 0 & P_2^T A & P_2^T B \\ P_1^T - P_2 & -(P_3 + P_3^T) & 0 & P_3^T A & P_3^T B \\ 0 & 0 & -(1-r_d)Q & 0 & 0 \\ A^T P_2 & A^T P_3 & 0 & 0 & 0 \\ B^T P_2 & B^T P_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

显然, 对任意 $\lambda(t) \neq 0$ (注释1), $\dot{V}(t) = \lambda^T(t)\Xi_0\lambda(t)$ 有可能等于0, 即使存在 $P_1 = P_1^T > 0, Q = Q^T > 0$ 及实矩阵 P_2, P_3 使得 $\Xi_0 \leq 0$, 我们也仅能得到关于系统 (10) 的半正定的条件, 即 $\dot{V}(t) = \lambda^T(t)\Xi_0\lambda(t) \leq 0$. 而系统 (8) 渐近稳定的充分条件是存在 $P_1 = P_1^T > 0, Q = Q^T > 0$ 及实矩阵 P_2, P_3 , 使得 $\dot{V}(t, x_t) < 0$. 为此, 我们采用 S-procedure (定义 4) 构造系统 (10) 渐近稳定的放松条件 [29]: 只要存在标量 $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$, 使得下式成立:

$$\begin{aligned} & \lambda^T(t)\Xi_0\lambda(t) + \varepsilon_1(\varphi^2 x^T(t)x(t) - f^T(x(t))) \\ & + \varepsilon_2(\theta^2 x^T(t-r(t))x(t-r(t)) \\ & - g^T(x(t-r(t)))g(x(t-r(t)))) < 0, \end{aligned} \quad (15)$$

故对所有 $\lambda(t) \neq 0$, 如果存在 $P_1 = P_1^T > 0, Q = Q^T > 0$, 实矩阵 P_2, P_3 , 标量 $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$, 使得 LMI (12) 式成立, 则动态系统 (10) 是渐近稳定的 [35].

注释 1 显然, $\lambda(t) \neq 0$ 等价于 $(x^T(t)x^T(t-r(t))) \neq 0$. 事实上, 如果 $(x^T(t)x^T(t-r(t))) = 0$, 那么 $f(x(t)) = 0$ 且 $g(x(t-r(t))) = 0$, 则由系统 (10), 可得 $y(t) = \dot{x}(t) = 0$, 因而 $\lambda(t) = 0$.

至此, 得到方程组 (9) 渐近稳定的充分条件. 但由于方程组 (9) 中的 α_i, β_i 为待定系数, 由定理 2 可知, 借助 MATLAB 中的 LMI 工具箱, 只要能取到使得满足条件的 $P_1, P_2, P_3, Q, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 存在且使 r_d 最小的 α_i, β_i , 就能使得考虑时变传播时延的非合作规划博弈 MANETs 容量达到稳定. 而这样的 α_i, β_i 在其有效取值范围内不唯一, 故可取使得满足条件的 $P_1, P_2, P_3, Q, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 存在且 $r_d = r_{d_{\min}}$ 时的 α_i, β_i .

我们设计如下考虑时变传播时延、无冲突共享信道的 MANETs 容量分析非合作规划博弈模型的稳定性控制算法.

根据实际 MANETs 的物理性能, 设定 α_i, β_i 的

取值范围 $\alpha_i \in [a_{\alpha i} \ b_{\alpha i}], \beta_i \in [a_{\beta i} \ b_{\beta i}]$, 搜索步长 $h_{\alpha i} = \frac{b_{\alpha i} - a_{\alpha i}}{n}, h_{\beta i} = \frac{b_{\beta i} - a_{\beta i}}{n}$, n 为自然数.

输入: $a_{\alpha i}, b_{\alpha i}, a_{\beta i}, b_{\beta i}, r_{d_{\min}} = 1, h_{\alpha i}, h_{\beta i}, i = 1, 2, \dots, k$;

Step1: 设 $i = 1$;

Step2: 设 $\alpha_i = a_{\alpha i}, i = 1, 2, \dots, k$;

Step3: 设 $\beta_i = a_{\beta i}, i = 1, 2, \dots, k$;

Step4: 根据 (13) 式计算 $P_{1i}, P_{2i}, P_{3i}, Q_i, \varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}, r_{di}$; 如果 $P_{1i}, P_{2i}, P_{3i}, Q_i, \varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}, r_{di}$ 存在, 且 $r_{di} < r_{d_{\min}}$, 执行 Step5; 如果 $P_{1i}, P_{2i}, P_{3i}, Q_i, \varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}, r_{di}$ 不存在, 执行 Step6;

Step5: 令 $r_{d_{\min}} = r_{di}, \tilde{\alpha}_i = \alpha_i, \tilde{\beta}_i = \beta_i, \tilde{P}_{1i} = P_{1i}, \tilde{P}_{2i} = P_{2i}, \tilde{P}_{3i} = P_{3i}, \tilde{Q}_i = Q_i, \tilde{\varepsilon}_{1i} = \varepsilon_{1i}, \tilde{\varepsilon}_{2i} = \varepsilon_{2i}$, 跳转 Step6, $\tilde{P}_{1i}, \tilde{P}_{2i}, \tilde{P}_{3i}, \tilde{Q}_i, \tilde{\varepsilon}_{1i}, \tilde{\varepsilon}_{2i}, \tilde{\alpha}_i, \tilde{\beta}_i, r_{d_{\min}}$ 分别是在 $i = 1, 2, \dots, k$ 中 i 为当前取值时 $P_{1i}, P_{2i}, P_{3i}, Q_i, \varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}, \alpha_i, \beta_i, r_{di}$ 的缓存输出值;

Step6: 设 $\beta_i = a_{\beta i} + h_{\beta i}$, 如果 $\beta_i \leq b_{\beta i}$, 转 Step4, 否则令 $\beta_i = a_{\beta i}$, 转 Step7;

Step7: 设 $\alpha_i = a_{\alpha i} + h_{\alpha i}$, 如果 $\alpha_i \leq b_{\alpha i}$, 转 Step3, 否则 $i = i + 1$; 转 Step2;

Step8: 输出在 $i = 1, 2, \dots, k$ 中 i 相应取值时 $P_{1i}, P_{2i}, P_{3i}, Q_i, \varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}, \alpha_i, \beta_i, r_{di}$ 的缓存输出值 $\tilde{P}_{1i}, \tilde{P}_{2i}, \tilde{P}_{3i}, \tilde{Q}_i, \tilde{\varepsilon}_{1i}, \tilde{\varepsilon}_{2i}, \tilde{\alpha}_i, \tilde{\beta}_i, r_{d_{\min}}$.

4 仿真实验

为验证本算法性能, 分别采用 MATLAB 7.0 和 OPNET14.5 联合仿真, 进行了如下 3 组实验.

4.1 仿真实验 1

设无线 MANETs 中有 3 个节点 Node1, Node2, Node3 和两条链路 $l_{11}, l_{12} = l_{21}$, 其容量值分别为 $g_{l_{11}} = 10 \text{ kb/s}, g_{l_{12}} = g_{l_{21}} = 7 \text{ kb/s}$, 归一化时间内链路的调度时间分别为 $t_{l_{11}} = 2/3, t_{l_{12}} = t_{l_{21}} =$

1/3, 网络中有 Node1 发送到 Node3 的流量速率 x_1 , Node2 发送到 Node3 的流量速率为 x_2 . 设 α_i, β_i 取值范围为: $\alpha_1 \in [1, 10], \alpha_2 \in [1, 10], \beta_1 \in [1, 8], \beta_2 \in [1, 8]$. 网络拓扑结构如图 1 所示.

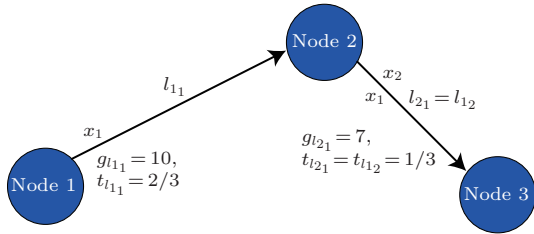


图 1 MANETs 容量稳定性分析实验 1

若不采用算法计算 α_i, β_i 对其容量进行稳定性控制, 在 α_i, β_i 取值范围内任意取值 (如表 2), 则得到如图 2 所示的 Node1, Node2 发送流量速率图, 很显然网络容量不可能达到稳定状态.

表 2 仿真实验 1 对 α_i, β_i 任意取值

源节点	α	β
Node1	9	8
Node2	8	3

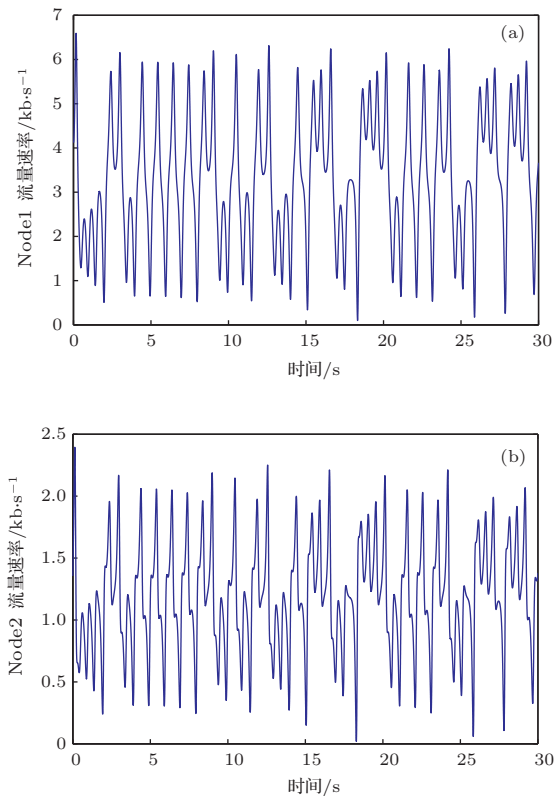


图 2 未采用算法控制的 Node1, Node2 流量速率 (a) Node1 发送流量速率; (b) Node2 发送流量速率

然后, 我们采用 MANETs 容量分析非合作规划博弈时变传播时延模型的稳定性控制算法计算出

$$P_1 = 10^3 \times \begin{bmatrix} 1.5541 & 0 \\ 0 & 3.8853 \end{bmatrix},$$

$$Q = 10^3 \times \begin{bmatrix} 5.1804 & 0 \\ 0 & 5.1804 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = 10^3 \times \begin{bmatrix} 1.321 & -1.356 \\ 0 & 2.175 \end{bmatrix},$$

$$P_3 = 10^3 \times \begin{bmatrix} 3.127 & 1.456 \\ -0.369 & 2.184 \end{bmatrix},$$

$$\varepsilon_1 = 132.176, \varepsilon_2 = 615.223,$$

及 $r_{d_{\min}} = 0.231$, 求得此时的 $\alpha_i \beta_i$ (见表 3), 代入 MANETs 源节点发送速率演化方程组 (9), 对图 1 所示 MANETs 进行仿真, 仿真时间以秒 (s) 为单位, 每隔 1 s 源节点发送流量速率更新一次, 得到如图 3 所示的 Node1, Node2 发送流量速率图及网络容量图.

由图 3 可以看出, 源节点 Node1, Node2 的发送流量速率均在不到 5.3 s 的时间内收敛到平衡点, 且 MANETs 容量也在 5.3 s 内即达到稳定容量. 本组实验验证了 MANETs 容量分析非合作规划博弈时变传播时延模型的稳定性控制算法对于图 1 所示的拓扑具有良好的稳定性控制效果, 故我们可以在 MANETs 物理性能范围内 (即 $\alpha_i, \beta_i, i = 1, 2$ 的有效取值范围内), 调整 $\alpha_i, \beta_i, i = 1, 2$ 的取值对容量进行稳定性控制, 并优化分配各源节点发送流量的速率, 以充分利用网络资源, 使网络容量达到最大化.

表 3 仿真实验 1 运用算法所得 α_i, β_i 取值

源节点	α	β
Node1	10	2
Node2	8	4

4.2 仿真实验 2

设 MANETs 中有 4 个节点 Node1, Node2, Node3, Node4 和 3 条链路 $l_{11}, l_{21}, l_{31} = l_{12} = l_{22}$, 其容量值分别为 $g_{l_{11}} = 6 \text{ kb/s}, g_{l_{21}} = 4 \text{ kb/s}, g_{l_{31}} = g_{l_{12}} = g_{l_{22}} = 10 \text{ kb/s}$, 网络中有 Node1 发送

到Node3的流量速率 x_1 , Node2 发送到Node3的流量速率 x_2 和Node3发送到Node4的流量速率 x_3 , 其中 x_1 和 x_2 同时发送, 归一化时间1内的可行链路集 $S = \{s\{l_{11}, l_{21}\}, s\{l_{31}\}\}$, 归一化时间内各链路的调度时间分别为 $t_{s\{l_{11}, l_{21}\}} = \frac{1}{3}$, $t_{s\{l_{31}\}} = \frac{2}{3}$. 设 α_i, β_i 取值范围为: $\alpha_1 \in [1, 10]$, $\alpha_2 \in [1, 15]$, $\alpha_3 \in [1, 15]$, $\beta_1 \in [1, 10]$, $\beta_2 \in [1, 15]$, $\beta_3 \in [1, 15]$. 网络拓扑如图4所示.

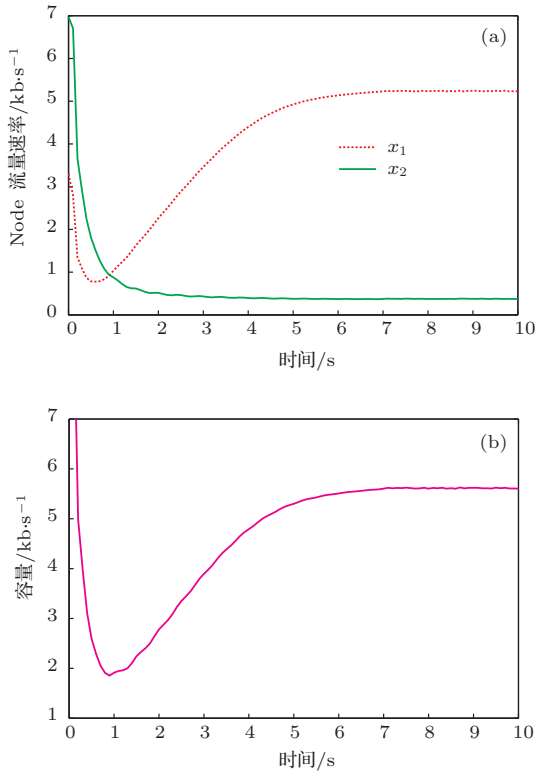


图3 采用算法控制后节点 Node1, Node2 流量速率和容量稳定性 (a) 发送流量速率稳定性; (b) 容量稳定性

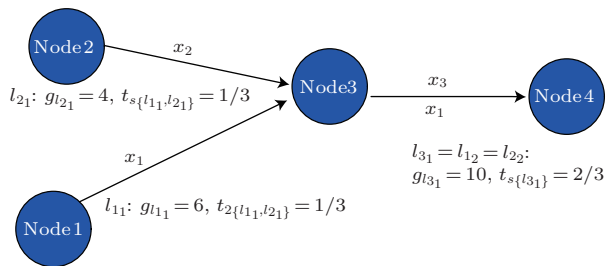


图4 MANETs 容量稳定性分析实验2

若不用MANETs容量分析非合作规划博弈时变传播时延模型的稳定性控制算法计算 α_i, β_i 对其容量进行稳定性控制, 在 α_i, β_i 取值范围内任意取值 (如表4), 则得到如图5所示的Node1, Node2, Node3的发送流量速率图, 很显然MANETs容量

不可能达到稳定状态.

表4 仿真实验2对 α_i, β_i 任意取值

源节点	α	β
Node1	9	7
Node2	10	8
Node3	8	6

然后, 我们采用MANETs容量分析非合作规划博弈时变传播时延模型的稳定性控制算法计算出

$$P_1 = 10^4 \times \begin{bmatrix} 2.1325 & 0 & 0 \\ 0 & 3.2028 & 0 \\ 0 & 0 & 3.2028 \end{bmatrix},$$

$$Q = 10^3 \times \begin{bmatrix} 4.2704 & 0 & 0 \\ 0 & 4.2704 & 0 \\ 0 & 0 & 4.2704 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = 10^3 \times \begin{bmatrix} 6.973 & 0 & 0 \\ 0 & 3.124 & 0 \\ 0 & 0 & 3.124 \end{bmatrix},$$

$$P_3 = 10^3 \times \begin{bmatrix} 9.536 & 0 & 0 \\ 0 & 8.253 & 0 \\ 0 & 0 & 9.354 \end{bmatrix},$$

$$\varepsilon_1 = 10^3 \times 1.6534, \varepsilon_2 = 10^3 \times 1.9657$$

及 $r_{d \min} = 0.256$, 求得此时的 α_i, β_i (见表5), 代入MANETs源节点发送流量速率演化方程组(9), 对图7所示MANETs进行仿真, 仿真时间以秒(s)为单位, 每隔1s源节点发送流量速率更新一次. 得到如图6所示的Node1, Node2, Node3发送流量速率图及网络容量图. 由图6可以看出, 源节点Node1, Node2, Node3的发送流量速率均在不到3.5s时收敛到平衡点, 且MANETs容量也在3.5s内即达到稳定容量. 实验验证了在MANETs容量分析非合作规划博弈时变传播时延模型的稳定性控制算法的控制下本模型有很好的稳定性, 故可以在MANETs物理性能范围内 (即 $\alpha_i, \beta_i, i = 1, 2, 3$ 的有效取值范围内), 调整 $\alpha_i, \beta_i, i = 1, 2, 3$ 的取值对容量进行稳定性控制, 优化分配各源节点发送流量的速率, 以充分利用网络资源, 使网络容量达到最大化.

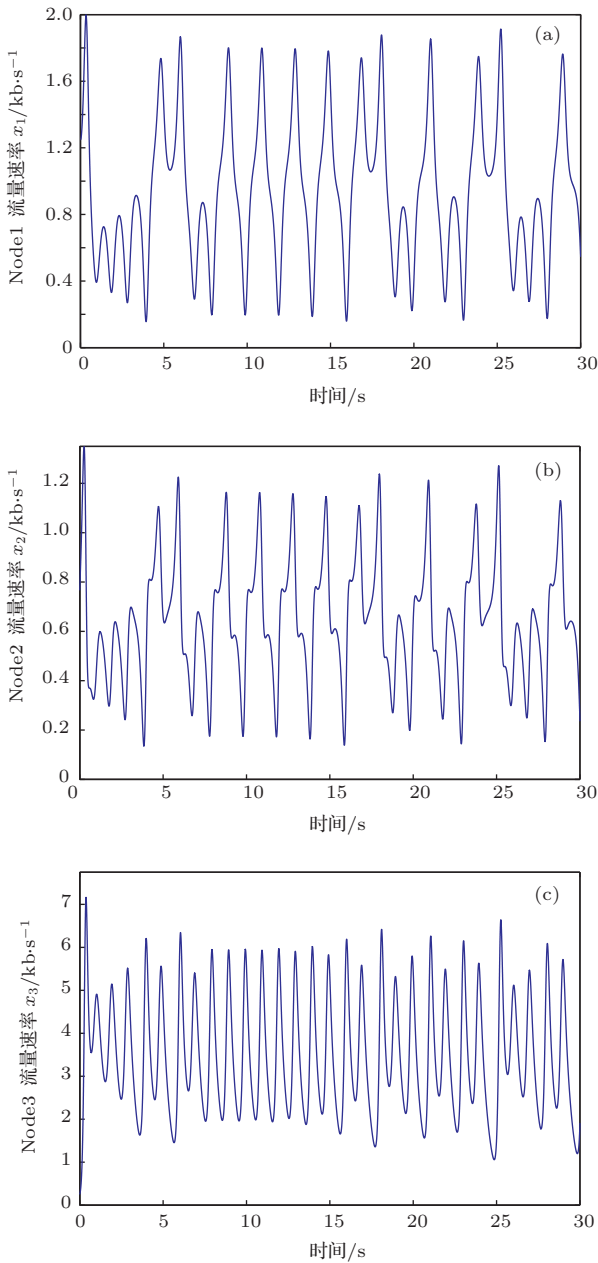


图5 未采用算法控制的 Node1, Node2, Node3 发送流量速率 (a) Node1 发送流量速率; (b) Node2 发送流量速率; (c) Node3 发送流量速率

表5 仿真实验2运用算法所得 α_i, β_i 取值

源节点	α	β
Node1	8	5
Node2	12	10
Node3	12	2

4.3 仿真实验3

为进一步验证本算法的性能, 我们针对仿真实验2采用算法进行稳定性控制后, 在 OPNET 14.5 平台搭建了仿真网络, 如图7所示. 并假设移动节点

以 wlan-roaming 的轨迹, 在 10^2 km 的范围内移动, MAC层采用 TDMA 协议, 路由层分别采用 AODV (Ad-Hoc on-Oem and Distance Vector Routing) 及 DSR (Dynamic Source Routing) 协议, 其余参数取值同仿真实验2, 结果如图8, 图9所示. 由实验结果可以看出, 尽管较仿真实验2, MANETs 容量收敛到稳定状态所需时间较长, 但在不同路由协议下其容量均能收敛于稳定状态. 其中 DSR 协议下收敛时间较长 (需 7.5 s), 分析其原因在于在同等网络条件下, DSR 协议下端到端时延大于 AODV 的端到端时延所致.

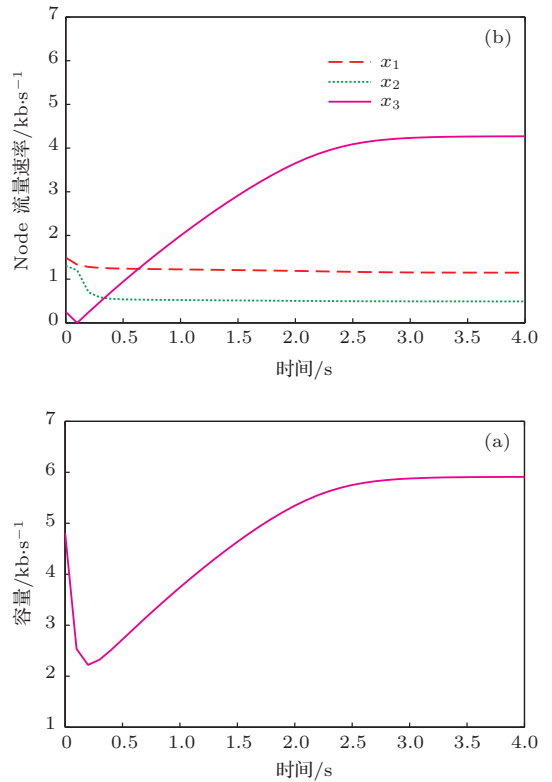


图6 采用算法控制后节点 Node1, Node2, Node3 发送流量的速率和容量稳定性 (a) 发送流量速率稳定性; (b) 容量稳定性

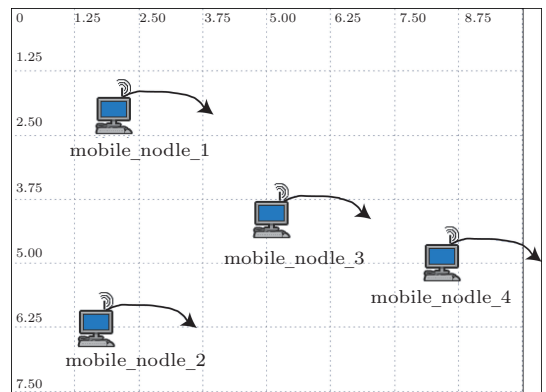


图7 OPNET 14.5 仿真网络

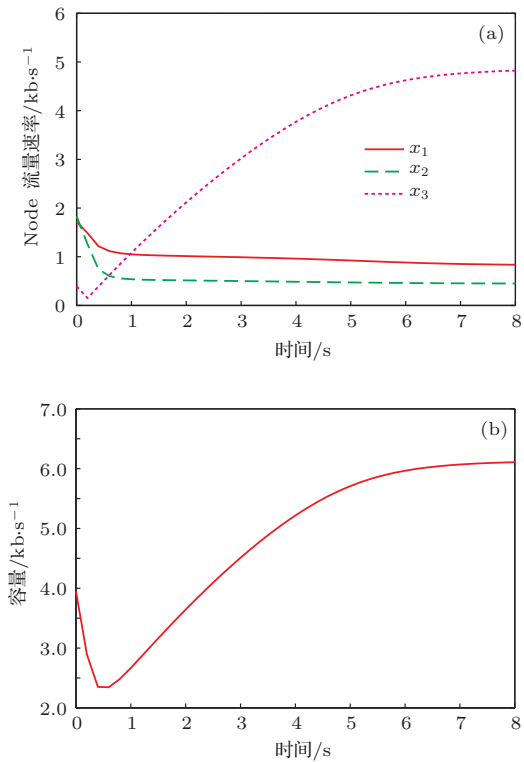


图8 TDMA, DSR协议下节点Node1, Node2, Node3流量速率和容量稳定性 (a) 流量速率稳定性; (b) 容量稳定性

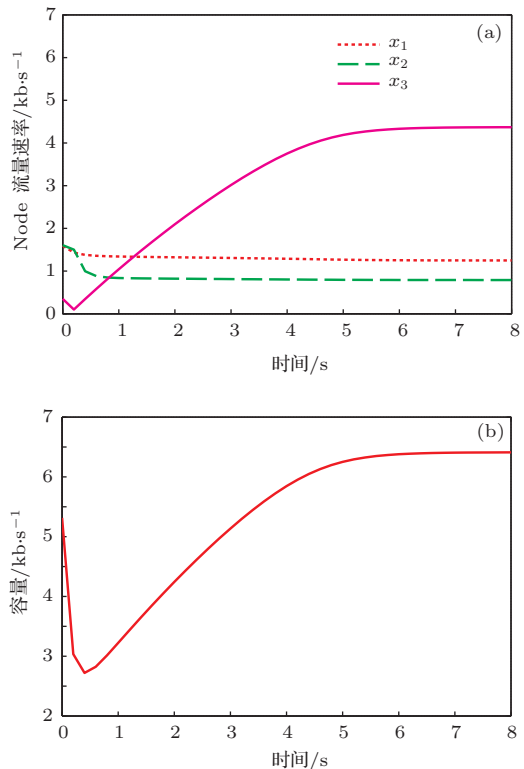


图9 TDMA, AODV协议下节点Node1, Node2, Node3流量速率和容量稳定性 (a) 流量速率稳定性; (b) 容量稳定性

5 结 论

本文提出一种新颖的考虑时变传播时延的非合作规划博弈MANETs容量分析模型稳定性控制方法. 首先得到考虑时变传播时延的非合作规划博弈MANETs容量分析模型的源节点发送流量速率演化方程组, 即加入时变传播时延项的分布式时变动态系统MANETs的源节点发送流量速率演化方程组, 在此基础上重点基于描述器技术结合LMI方法, 构造Lyapunov-Krasovskii泛函, 证明了考虑时变传播时延的非合作规划博弈MANETs容量分析模型的渐近稳定性准则, 得到MANETs容量稳定性控制算法. 仿真试验也验证了本算法具有很好的稳定性控制性能. 由于MANETs具有移动性, 我们下一步的研究方向将基于随机图论建立随机网络拓扑, 进而建立随机微分方程针对MANET容量稳定性进行讨论.

本文的贡献如下:

1) 针对MANETs容量, 首次考虑时变传播时延对其稳定性的影响, 并采用将非线性时变时滞系统恒等变换的技术——描述器技术结合Lyapunov-Krasovskii泛函及LMI技术的方法考察MANETs容量稳定性, 其结论具有较小保守性, 适用范围广, 且国内外均未见报道;

2) 得到的MANETs容量稳定性控制方法对于采用非竞争无冲突类MAC协议的MANETs具有普适性, 只需通过调解MANETs节点的物理性能, 如采用的功率、可用内存大小、信号调制方法、编码方式等即可达到, 为指导构建满足QoS (服务质量) 的MANETs提供有力的理论支撑;

3) 本文提出的稳定性控制算法计算量小, 仅需利用MATLAB工具箱即可得到容量稳定性控制准则.

最后需要指出的是, 本文虽然讨论的是具体的变时延MANETs非合作规划博弈网络容量控制方法, 但本文所使用的建模方法和分析手段具有广泛的适用性. 相当一大类网络容量稳定性控制问题可以模仿本文方法建立源节点发送流量的速率演化方程组, 进而使用与本文近似的系统分析法考察其容量稳定性. 本文方法适用范围的广泛性值得重视.

参考文献

- [1] Gupta P, Kumar P 2000 *IEEE Trans. Inform. Theory* **46** 388
- [2] Grossglauser M, Tse D N C 2002 *IEEEACM Trans. Networ.* **10** 477
- [3] Zhao S M, Liu J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 771 (in Chinese) [赵生妹, 刘静 2010 物理学报 **59** 771]
- [4] Shirong D, John N D, Bahram A 2011 *Ad-Hoc Net.* **9** 120
- [5] Zhao H T, Emiliano G P, Jibo W, Yong X 2011 *Phys. Commun.* **4** 98
- [6] Zhong L, Wang C, Jiang C J, Li X Y 2013 *Ad-Hoc Net.* **11** 29
- [7] Wang L J, Cai L, Liu X Z 2009 *Comput. Net.* **53** 338
- [8] Tassiulas L 1997 *IEEE Trans. Inform. Theory* **43** 106
- [9] Li W X, Su H, Wang K 2011 *Automatica* **47** 215
- [10] Feijer D, Paganini F 2010 *Automatica*. **46** 1974
- [11] Dargie W, Schill A 2011 *J. Comput. Syst. Sci.* **77** 852
- [12] Chen C H, Yin C C, Yue G X 2011 *J. China Universities of Posts and Telecommunications* **18** 22
- [13] Jae Y S, Seong L K 2012 *Comput. Commun.* **35** 1345
- [14] Kherani A, El-Khoury R, El-Azouzi R 2008 *Comput. Net.* **52** 1365
- [15] Liu S, Liu B, Zhang Y K, Wen Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 38
- [16] Shi P M, Li J Z, Liu B, Han D Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 94501
- [17] Shi P M, Liu B, Hou D X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1321
- [18] Kherani A, El-Khoury R, El-Azouzi R 2008 *Comput. Networks.* **52** 1365
- [19] Yamamoto K, 2005 *IEICE T. Commun.* **E88-B** 1009
- [20] Farhadi A, 2010 *Charalambous D: Automatica* **46** 889
- [21] Yang J, Li Y, Zhang Z J, Li J Q 2012 *JEIT* **34** 75
- [22] Li C D, Liao X F 2006 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **16** 3323
- [23] Liao X F, Li C D 2007 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **18** 342
- [24] Arik S 2002 *IEEE Trans. Neural Networks* **13** 1239
- [25] Cao J D 2001 *IEEE Trans. CAS I* **48** 1330
- [26] Hale J, Verduyn Lunel SM 1993 *Introduction to Functional Differential Aligns* (New York: Springer) p332
- [27] Kolmanovskii V, Nosov V 1986 *Stability of Functional Differential Aligns* (New York: Academic Press) p214
- [28] Zhang H G, Wang Z L, Wang Z S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2687
- [29] Gopalsamy K 1992 *Ph. D. Dissertation* (The Netherlands: Kluwer Academic)
- [30] Liao X F, Liu Y B, Guo S T, Huanhuan M 2009 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* **14** 3120
- [31] Fridman E 2001 *Syst. Control Lett.* **43** 309
- [32] Yang J 2011 *Ph. D. Dissertation* (Chongqing: Chongqing University) (in Chinese) [杨娟 2011 博士学位论文 (重庆: 重庆大学)]
- [33] Liao X X 2002 *Theory Methods and Application of Stability* (Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology) p40 (in Chinese) [廖晓昕 2002 稳定性的理论、方法和应用 (武汉: 华中科技大学出版社) 第 40 页]
- [34] Alpcan T, Basar T 2005 *IEEEACM Trans. Networ.* **13** 1261
- [35] Alpcan T, Basar T 2005 *IEEE/ACM Trans. Networ.* **13** 1261
- [36] Wu M, He Y 2008 *Delay System Robust Control - Liberty Matrix Method* (Beijing: Science Press) p1 (in Chinese) [吴敏, 何勇 2008 时滞系统鲁棒控制——自由权矩阵方法 (北京: 科学出版社) 第 1 页]

Asymptotic stability for non-cooperative program game model of the capacity analysis for mobile ad-hoc networks with variable time delay*

Yang Juan^{1)2)†} Yang Dan³⁾ Huang Bin⁴⁾ Zhang Xiao-Hong³⁾ Yang Cong⁵⁾

1) (College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

2) (The 3rd Department, PLA.Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

3) (School of Software Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

4) (Foundation department, PLA.Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China)

5) (The 1st Department, PLA.Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

(Received 12 August 2013; revised manuscript received 28 October 2013)

Abstract

Stability of capacity is one of the key properties for quality of service (QoS) support in mobile ad hoc networks (MANETs). In this paper, a novel technique is proposed for controlling the stability of capacity analysis model for non-cooperative program game MANETs, with the time-varying propagation delay taken into consideration. First, based on the obtained source node flow transmitting rate evolution aligns of capacity analysis model for non-cooperative program game mobile ad-hoc network, when adding the time-varying propagation delay term, which is a class of nonlinear time-varying delay differential aligns, the asymptotic stability criteria of the model are presented in the form of descriptor and linear matrix inequalities. Then, an iterative algorithm is also provided for controlling the stability of the model. The proposed criteria are less conservative since they are based on an equivalent model transformation. Simulation experiments verify the effectiveness of this algorithm. Although the model used in this paper focuses on a specific algorithm, we believe that this method has a great potential in analyzing and understanding the general capacity of MANETs stability control issues.

Keywords: non-cooperative program game, time-varying propagation delay, descriptor, linear matrix inequalities

PACS: 05.45.-a, 02.30.Yy

DOI: 10.7498/aps.63.020501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61173131), Central Universities Fundamental Research Interdisciplinary Class Major Projects, China (Grant No. CDJZR12098801), Based and Advanced Research Projects of Chongqing of China (Grant No. cstc2013jcyjA40033), Key Strategic Project of Chongqing of China (Grant No. CSTC2009AB2230), Strategic Project of Chongqing of China (Grant No. 2009AC2057), and the Special funding for Scientific Research Project of Chongqing Postdoctoral Researchers, China (Grant No. XM20120054).

† Corresponding author. E-mail: juanyang@cqu.edu.cn