

文章编号:1007-5321(2020)05-0057-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-029

基于博弈的机坪感知网络机会传输控制方法

陈维兴¹, 苏景芳¹, 赵 卉²

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300; 2. 中国人民解放军 31439 部队, 沈阳 110015)

摘要: 在机坪感知网络场景下, 针对不连通网络消息机会传输过程中投递率低和网络开销大的问题, 提出一种基于博弈的机坪感知机会传输控制方法(OTCM)。首先结合场景特性建立首传节点博弈模型, 实现消息传输排序, 解决传输优先级的问题; 而后提出了一种融合多维拓扑节点属性的博弈规则体系和函数, 实现消息传输环境的优化及传输过程的可靠性; 同时根据博弈体系中的效用函数保证拓扑在新机会节点融入后的自适应更新, 维持其传输性能的最优状态。利用机会网络仿真器建立国内某机坪场景, 仿真结果表明, OTCM 算法相较于其他机会路由策略, 平均投递率可达 52.50%, 平均传输时延降低至 1 773 s, 基本达到了研究目标的要求。

关键词: 博弈论; 机坪网络; 机会网络; 拓扑控制; 路由策略

中图分类号: TP393.1

文献标志码: A

Opportunistic Transmission Control Method for Apron Sensing Network Based on Game Theory

CHEN Wei-xing¹, SU Jing-fang¹, ZHAO Hui²

(1. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. People's Liberation Army of China 31439, Shenyang 110015, China)

Abstract: The low delivery rate and large network overhead is of great challenge in the apron-aware network scenario. To solve the problem, an opportunistic transmission control method (OTCM) based on game theory is proposed. First, combining the characteristics of the scene to establish the initial-pass node game model to achieve message transmission sequencing and the problem of transmission priority is solved. Then a game rule system and function is planned that integrates multi-dimensional topology node attributes to achieve the optimization of the message transmission environment and the reliability of the transmission process. At the same time, according to the utility function in the game system, the topology can be adaptively updated after adding the new opportunity node. Hence the topology maintains its optimal state. Using opportunistic network environment to establish a domestic apron scene simulation. Verification shows that the OTCM algorithm has an average delivery rate of 52.50% and an average transmission delay reduced to 1 773 s compared with other opportunistic routing strategies, which basically meets the research goals.

Key words: game theory; apron network; opportunity network; topology control; routing strategy

作为智慧机场建设的关键组成部分, 需要实现 使机坪感知达到全面、准确和稳定性的要求。由于

收稿日期: 2020-03-24

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2018KJ237)

作者简介: 陈维兴(1981—), 男, 副教授, 硕士生导师, E-mail: cw007x130@163.com.

机坪范围大,各运行区域在机坪的分布不集中,故造成传感器节点分布密度不均匀,网络拓扑呈分散型,容易出现弱连接链路,甚至是不连通网络,使感知信息缺失.此外,近年来,机坪航班流、客货流和资源流的感知点需求数和感知信息的复杂度不断攀升,使机坪网络感知能力降低,尤其是远机位感知处于不连通网络的孤岛状态,且网络负载不均衡导致的感知盲区,使远机位处于较恶劣的网络环境中.针对上述问题,陈等^[1]提出在机坪传统无线传感网中实现机会传输控制方法.机会传输控制方法主要依据机会网络(ON, opportunistic network)理论,机会网络^[2-3]中源节点与目的节点之间不需要存在完整链路,是通过节点移动带来相遇机会实现通信的自组织网络.

当前国内外针对机会网络控制策略的研究主要涉及移动社交网络、移动车载网络、移动传感网络^[4-6]等方面,侧重于关键节点的选取,以便于对网络拓扑进行优化. Song 等^[7]提出在簇中通过衡量节点能量和距离选择双簇首进行拓扑控制,通过增加跳数来减少单簇首负担; Sara 等^[8]将非合作博弈与分散式聚类算法相结合,进行拓扑优化,增加网络的寿命,主要通过分层选取簇首,根据节点能量制约消息副本数量的方法最大化传感器的寿命; Zhao 等^[9]考虑节点能量的公平性,通过无线信道的动态变化控制消息副本数来减少能耗和网络开销.

Song 等^[7,9]从规划关键节点入手,从节点能量、节点间距离等方面实现拓扑优化,但对于节点自身信息的提取使用维度较单一,而较低维度有时很难完整描述当前网络节点所处状态,降低网络控制的适应性和准确性;此外,感知节点的负载和处理能力也是必须要考虑的,特别是在机坪这种对边缘节点有大量应用的场景.

影响机会传输控制的另一关键模型是备选转发节点的选取及其转发优先级的分配^[10],针对机坪场景提出了基于博弈的机坪感知网络机会传输控制方法(OTCM, opportunistic transmission control method).在首传节点模型和拓扑构造过程中对网络中下一跳节点的选取进行多次博弈分析,充分利用节点多维属性,使消息在传输过程中实现备选转发节点的最优选择,在保持最优拓扑下进行消息传输,提高传输的可靠性和投递率,从而提升机坪的网络感知能力.

1 路由策略模型

选取路由控制中的各类关键节点,基于多次博弈方法设计评估选取策略,建立博弈模型,以保证最优拓扑传输.路由控制模型分为首传节点模型、拓扑组合、更新模型.

1) 首传节点模型

在机坪网络中,需明确当前信息的重要程度,在路由始端即做出准确判断,以降低传输时延. Jiang 等^[11-12]为缩短消息的传输时间,在寻找最短最优路径时提出迪克斯特拉算法(Dijkstra)的改进方法,但是其首传节点属于前期指定,在真实工作环境中,因突发事件改变转发优先级的情况下,该方法并不适用.陈等^[13]为延长网络寿命通过对节点速率和能量进行衡量,选取关键节点,缺少对首传节点选取和优先级的分配,并且增加了关键节点评估个数,增大了计算量.而通过博弈的方式对首传节点进行选择,会规避上述问题.

定义 1 首传节点即众多网络节点中需要首先进行消息转发的节点.

首传节点博弈的参与者为边界子域内的 N 个节点.节点多维消息属性包括消息的重要程度、消息的大小、消息的起始位置、消息的终止位置等.

按重要程度将消息划分为 3 个等级,分别为重要、次重要和不重要,用 a, b, c 来表示(规定 $a > b > c > 0$);消息大小分为大型消息、中等消息和小型消息,用 d, e, f 表示(规定 $d > e > f > 0$).博弈支付矩阵如表 1 所示,其中,括号中的两部分分别为节点参与消息传输而获得的竞争收益和节点拒绝参与消息传输获得的收益.

表 1 博弈首传节点支付矩阵

重要程度	消息大小		
	大型	中等	小型
重要	$(a + d, a - d)$	$(a + e, a - e)$	$(a + f, a - f)$
次重要	$(b + d, b - d)$	$(b + e, b - e)$	$(b + f, b - f)$
不重要	$(c + d, c - d)$	$(c + e, c - e)$	$(c + f, c - f)$

根据上述博弈产生的收益,获得消息发送的顺序,并编号为 n_1, n_2, \dots, n_N ,其中 n_1 即为本次传输的首传节点 L .不需要针对节点传输顺序重复计算博弈收益而增加网络开销.当有突发情况消息时,根据表 1 计算收益,并与当前首传节点进行对比,将突发消息插入发送序列,减少冗余计算.

2) 拓扑组合及更新模型

合理控制网络拓扑可以有效提高网络覆盖率, 增强网络连通性^[14]. Hao 等^[15]提出基于马尔可夫寿命预测模型的分布式拓扑控制博弈算法, 该算法仅考虑了节点功率, 并没有考虑节点所在位置和速率等对拓扑的影响. 刘等^[16]提出一种基于节点度的调整方法, 构建节点可靠度模型, 进行拓扑控制, 仅考虑了节点度对节点性能的影响, 忽略了对节点其他维度的衡量. 通过多维度衡量节点属性, 对拓扑进行规划更新, 达到对网络的感知反馈, 以提高网络性能. 可从节点的目的性、能量、速率3个方面分别进行权值分配. 节点目的不同会导致无效传输, 还增加了网络开销和传输时延, 因此, 首先对节点的目的性进行判断.

定义2 节点的目的权值为 G , 为节点所带消息的目的性进行区域划分, 如图1所示.

对位于图1中每个区域内的节点进行节点目的权值 G 的分配, 有

$$G = \begin{cases} G_1 > 1, & 0 \leq R \leq R_1 \\ G_2 = 1, & R_1 < R \leq R_2 \\ G_3 < 1, & R_2 < R \leq R_3 \end{cases} \quad (1)$$

将目的地址位于 $R_1 < R \leq R_2$ 区域的权重设为1, 即 $G_2 = 1$.

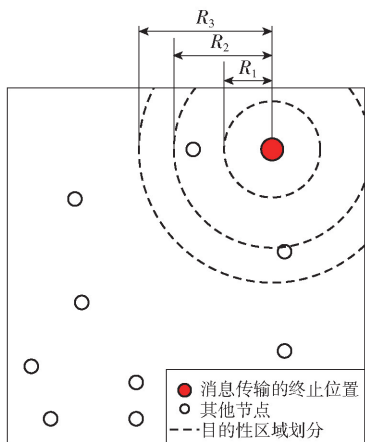


图1 节点目的性区域划分

当 $0 \leq R \leq R_1$ 时,

$$G_1 = 1 + \frac{\pi R_2^2}{\iint_D dx dy} = 1 + \frac{\pi R_2^2}{\pi R^2} \quad (2)$$

即目的性 G_1 的取值大于1, 并且当 R 减小时 G_1 增大, R 越小, 目的节点地址越准确.

当 $R_2 < R \leq R_3$ 时,

$$G_3 = \frac{\pi R_2^2}{\iint_{D'} dx dy} = \frac{\pi R_2^2}{\pi R^2} \quad (3)$$

即 G_3 的取值小于1, 当 R 增大时, G_3 减小, 表示其目的性越弱.

其次, 节点能量是决定有效投递的关键^[14]. 为保证传输的可靠性, 需对节点能量做出衡量 [见式(4)].

定义3 节点的能量函数为

$$E_i(l) = l\varepsilon \quad (4)$$

其中: ε 为单位传输距离所消耗的平均能量, 节点 i 的能量传输距离为 l . 传输距离 l 越大, 表示节点能量越高, 作为网络中备选中继节点的可能性越大.

最后, 由于机坪网络中感知节点类型的差异, 机坪静态感知与动目标感知节点共存, 使得拓扑动态时变, 特别是远机位区域 (不连通网络特征明显区域). 节点速率相差较大, 会使拓扑形变剧烈, 从而加速最优拓扑状态解体. 故设计判定如式(5)~式(7).

节点 i, j, k 之间的速率差为

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_{ij} &= |V_i - V_j| \\ \Delta V_{jk} &= |V_j - V_k| \\ \Delta V_{ki} &= |V_k - V_i| \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

为保持最优拓扑需要满足

$$\left. \begin{aligned} \lim_{V_i \rightarrow V_j} \Delta V_{ij} &= 0 \\ \lim_{V_j \rightarrow V_k} \Delta V_{jk} &= 0 \\ \lim_{V_k \rightarrow V_i} \Delta V_{ki} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

定义4 速率函数为 $V = \Delta V_{ij} + \Delta V_{jk} + \Delta V_{ki}$, 则有

$$\lim_{V_i \rightarrow V_j \rightarrow V_k} V = 0 \quad (7)$$

即节点 i, j, k 之间的速率渐进一致.

为选取高质量的关键节点, 对节点的目的权值 G 、能量 $E_i(l)$ 以及速率 V 判断后定义节点效用函数为

$$U\{G, E, V\} = \alpha G + \beta E + \gamma V \quad (8)$$

其中 α 和 β 的值满足等式:

$$\alpha = \frac{E_i(l)}{V} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{G}{\alpha + 1} \quad (10)$$

由于 $\lim_{V_i \rightarrow V_j \rightarrow V_k} V = 0$, 所以 V 对此效用函数的影响最小, 取 $\gamma = 1$.

为保证消息可以准确传输到目的节点,使其传输过程总处于最优拓扑中进行,首先选择最基础的平面拓扑组合——三角形. 假设其余2个节点分别为 A 和 B ,最终可确定的拓扑为 $\Gamma\{L,A,B\}$.

由于节点的移动特性,拓扑本身是时变的. 在其传输消息的过程中,节点移动带来的传输机会使得拓扑需要在传输过程中进行更新,即用具有更高效用 $U\{G,E,V\}$ 的新节点代替原有 $\Gamma\{L,A,B\}$ 中的节点,使拓扑时刻保持在最优状态,其更新

规则见式(8).

消息传输如图2所示,图2(a)表示首传节点对传输顺序进行规划为 n_1,n_2,\cdots,n_N ,此时首传节点 L 即为 n_1 ; 博弈选择节点 A 和 B 组成拓扑组合 $\Gamma\{n_1,A,B\}$,如图2(b)所示;在传输过程中遇到新节点 A' ,计算其效用函数 $U_{A'}$, $U_{A'} > U_B > U_A$,此时使用 A' 代替 A 形成新的拓扑组合 Γ' ,继续进行消息传输,如图2(c)所示;传输至目的节点 D 的通信范围内,如图2(d)所示,此次传输结束.

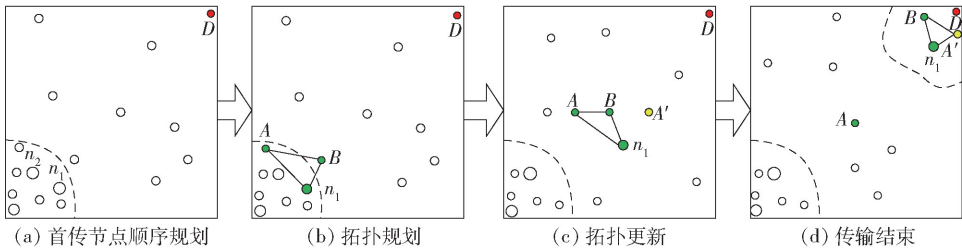


图2 传输示意图

2 机坪感知网络机会传输控制算法 (OTCM)

OTCM 算法主要包括以下4个步骤.

第1步 对消息的重要程度以及消息的大小进行评估,选取首传节点 L ,并进一步确定当前网络中消息的传输顺序 n_1,n_2,\cdots,n_N ,当有新消息加入序列时,计算新消息的竞争收益,并将其收益值与原有顺序相比较,进行队列插入.

第2步 将中继节点的目的性 G 、节点能量 E 、节点移动速率 V 这3个指标进行公式化,计算其效用函数: $U\{G,E,V\} = \alpha G + \beta E + \gamma V$.

第3步 根据效用函数的大小选取构成基本拓扑——三角形的其余2个节点 A,B ,与首传节点 L 共同构成拓扑组合 $\Gamma\{L,A,B\}$;传输过程中遇到新节点时需要对其进行效用计算,考虑是否更新当前的 $\Gamma\{L,A,B\}$,在新节点与 A 和 B 节点中选择效用值较大的2个节点组成新的拓扑 Γ' .

第4步 当消息传输至目的节点,此次传输结束.

3 仿真分析

针对首传节点模型进行验证,分别建立2、3个不连通子域和1个目的节点子域. 考虑机坪运行过程中存在不同运动状态的资源,故在仿真场景各子域中随机分布了动态节点和静态节点. 机坪运行管

理模式下,在仿真过程中连接不同子域的是具备强大处理存储的移动智能体 (MA, M-agent) 节点,即特种车辆等机坪移动目标.

机会网络仿真器 (ONE, opportunistic network environment) 场景中的参数设置如表2所示.

表2 首传节点模型的仿真环境配置

参数	取值
仿真时间/h	12
仿真区域/m ²	800 × 600
消息大小/kB	50 ~ 150
TTL/h	1
传输速率/(kbit · s ⁻¹)	250
消息间隔/s	30
MA 速率/(km · h ⁻¹)	≤25
MA 数量/个	5

根据机坪工况,仿真时间取白天的作业时间12 h,按照机坪安全运行管理条例,以特种车辆为代表的 MA 节点的移动速率不可超过 25 km/h,设计 MA 数量为 5.

将 OTCM 与直接传输路由 (DDR, direct delivery router)、传染病路由 (ER, epidemic router) 和喷洒等待路由 (SAWR, spray and wait router) 这几种常用于相似领域的 ON 路由算法进行对比验证. DDR、ER、SWAR 中的节点都是采用了基于地图的最短路径移动模型,该移动模型使用 Dijkstra 寻找消息传输的

最短路径,路由信息如表 3 所示.

表 3 首传节点移动模型的路由信息

传输控制	策略	消息副本数
DDR	—	$C = 1$
ER	Dijkstra	$1 \leq C \leq \text{节点总数}$
SAWR	—	$C = 10$
OTCM	首传节点模型	$C = 3$

OTCM在传输过程中虽然仅存 3 个消息副本,但其传输过程一直处于拓扑结构中,因此可保证其传输的可靠性.

仿真结果如图 3、图 4 所示.

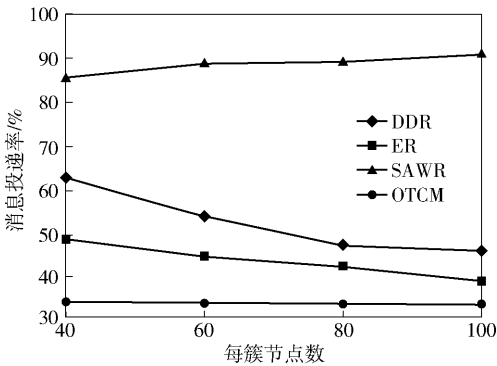


图 3 网络中有 2 个不连通子域时的消息投递率

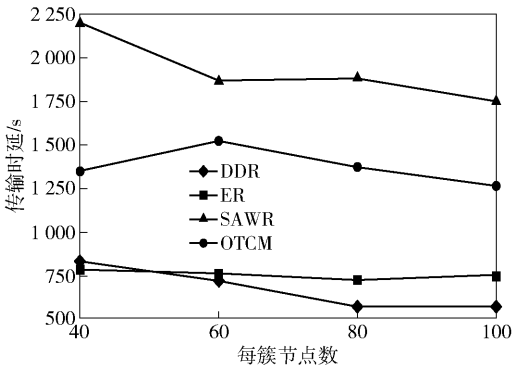


图 4 网络中有 2 个不连通子域时的消息传输时延

每个子域节点数依次增加 40、60、80、100. 节点数目增多时,DDR、ER、SAWR 的投递率均下降,OTCM 的投递率缓慢上升且维持最高水平.

从 ON 理论中重要的参数消息投递率考虑,定义消息投递率为

$$d = \frac{N_d}{N_c} \tag{11}$$

其中: N_d 为成功投递的消息数, N_c 为创建的消息总数.

在 ON 传输过程中,DDR 在消息遇到目的节点时开始传输;ER 以传染病式地复制多个副本,直至传输到目的节点停止,完成传输;SAWR 针对 ER 进行改进,在复制的过程中对消息副本数进行限制.上述 3 个策略的投递率下降.

对于 OTCM,其首传节点模型对消息传输始端的传输顺序进行规划,且后期不需要重复计算,在相同时间(12 h)内 N_d 要大于其他路由策略,故投递率高于其他路由.随着节点数目增多, N_c 增加,但由于 OTCM 组合拓扑的传输方式使消息投递的有效性及效率增加,而 DDR、ER、SAWR 无法保证副本所至节点的有效性,OTCM 虽然牺牲了一定的传输时延,但保证了传输的有效性,即 N_d 随节点数的增多而增大.因此,其投递率随节点数的递增呈现增长趋势.

在传输时延方面,OTCM 算法的复杂性高于 ER 及其变体 SAWR,在 2 个不连通子域情况下,OTCM 计算的迭代次数高于 ER 和 SAWR,且受仿真缓存值的制约,其延时增加;但如果 OTCM 与 ER 和 SAWR 需处理的节点集同步增多,如进入 3 个不连通子域,则 ER 和 SAWR 的计算负载增长在一定程度上高于 OTCM,此时他们在延时方面的差距会减少,OTCM 甚至会低于 ER.

从图 5、图 6 中可知,当不连通子域增加至 3 时,即网络节点规模增加时,首传节点模型的优势使 OTCM 在投递率等主要性能方面明显优于 DDR、ER、SAWR. 传输时延方面也验证了上述推论.

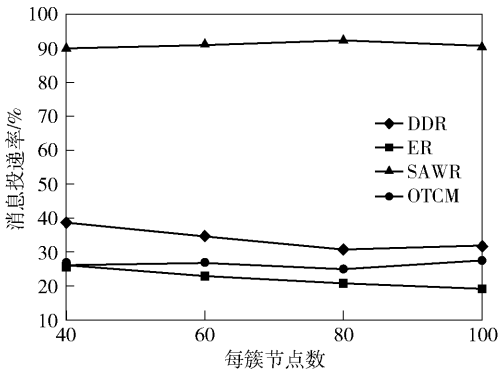


图 5 网络中有 3 个不连通子域时的消息投递率

为对比机坪网络环境下 DDR、ER、SAWR、OTCM 的特性,设置如表 4 所示的机坪感知网络仿真环境. 仿真结果如图 7、图 8 所示.

由图 7、图 8 可知,相对 ER,消息副本数较少的 SAWR 和 DDR 的投递率较低,这是由于机坪面积

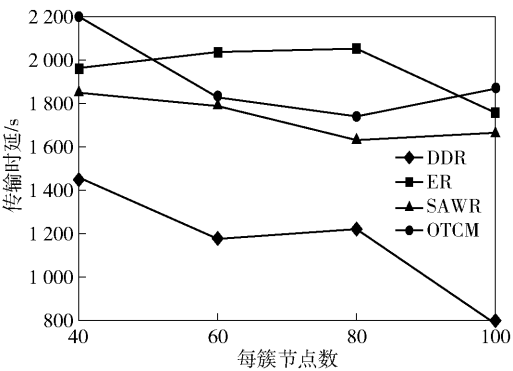


图 6 网络中有 3 个不连通子域时的消息传输时延

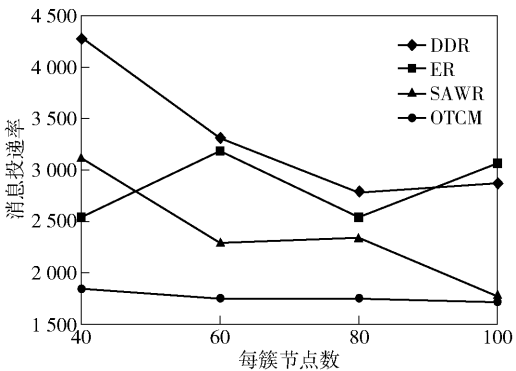


图 8 机坪环境中消息传输时延

表 4 机坪场景仿真环境的参数配置

参数	取值
仿真时间/h	12
仿真区域/m ²	4 000 × 3 000
消息大小/KB	50 ~ 150
TTL/h	1
传输速率/(kbit·s ⁻¹)	250
消息间隔/s	30
MA 速率/(km·h ⁻¹)	≤25
MA 数量/个	20

知网络环境中,DDR、ER、SAWR 的传输时延高于 OTCM,这是由于机坪感知网络中的节点距离大,并且节点数量增多,使得这 3 个路由方案的计算量增加,同时受到节点资源约束,使传输时延高于 OTCM.

4 结束语

针对机坪网络感知能力下降即网络不连通子域的问题,使用 ON 传输策略,提出基于博弈的机坪感知机会控制传输方法. 通过博弈策略进行首传节点选择,并再次使用博弈选择关键节点进行拓扑控制,以提高网络覆盖率,增强网络性能. 实验结果证明,在机坪感知网络中,OTCM 的平均投递率可以达到 52.50%,平均传输时延基本控制在 1 773 s,在投递率和传输时延方面优于其他路由算法. 所提方法对分布式物联研究具有积极的指导作用,今后将进一步研究网络路由的稳定性,裁剪算法体积,减少算法自身对延迟的影响.

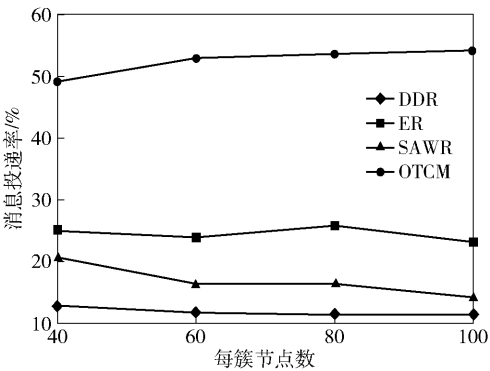


图 7 机坪环境中消息传输投递率

大,若没有拓扑结构的可靠传输,需要通过副本数量来保证消息投递的可靠性. ER 使用了大量消息副本来保证其投递率,OTCM 的投递率低于 2 个和 3 个不连通子域,但仍然明显优于其他路由策略,进一步验证了其拓扑传输的有效性.

节点数目增多,遇到目的节点的机会增大,传输时延整体为下降趋势. OTCM 拓扑结构中的主要延迟在于计算首传节点传输顺序,因此在节点数不变的情况下无论是在 2 ~ 3 个不连通子域还是在更广阔的机坪场景中,传输延迟相差不大. 但在机坪感

参考文献:

[1] 陈维兴, 张天娇, 林家泉, 等. 基于移动 agent 的机坪机会传输控制方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 309-315.
Chen Weixing, Zhang Tianjiao, Lin Jiaquan, et al. Opportunistic transmission control method based on mobile agent of apron network [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 309-315.
[2] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 124-137.
Xiong Yongping, Sun Limin, Niu Jianwei, et al. Opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(1): 124-137.
[3] 马华东, 袁培燕, 赵东. 移动机会网络路由问题研究进展[J]. 软件学报, 2015, 26(3): 600-616.

- Ma Huadong, Yuan Peiyan, Zhao Dong. Research progress on routing problem in mobile opportunistic networks [J]. *Journal of Software*, 2015, 26(3): 600-616.
- [4] Xiao Mingjun, Wu Jie, Huang Liusheng. Community-aware opportunistic routing in mobile social networks[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2014, 63: 1682-1695.
- [5] 皇甫伟, 杨心竹, 王欢, 等. 基于出租车轨迹数据的车联网通信机会间隔模型[J]. *北京邮电大学学报*, 2019, 42(3): 91-97.
- Huangfu Wei, Yang Xinzhu, Wang Huan, et al. Modeling the statistical distribution of the inter-contact times for communication opportunities in vehicle networks [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2019, 42(3): 91-97.
- [6] So J, Byun H. Load-balanced opportunistic routing for duty-cycled wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2017, 16(7): 1940-1955.
- [7] Song Ling, Song Qidong, Ye Jin, et al. A hierarchical topology control algorithm for WSN, considering node residual energy and lightening cluster head burden based on affinity propagation[J]. *Sensors*, 2019, 19: 13.
- [8] Sara K, Jaafar G, Pascal L. Game theory based distributed clustering approach to maximize wireless sensors network lifetime[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, 123: 80-88.
- [9] Zhao Ruonan, Zhang Lichen, Wang Xiaoming, et al. A novel energy-efficient probabilistic routing method for mobile opportunistic networks [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018(1): 263-278.
- [10] 田克, 张宝贤, 马建, 等. 无线多跳网络中的机会路由[J]. *软件学报*, 2010, 21(10): 2542-2553.
- Tian Ke, Zhang Baoxian, Ma Jian, et al. Opportunistic routing protocols for wireless multihop networks [J]. *Journal of Software*, 2010, 21(10): 2542-2553.
- [11] Jiang J R, Huang H W, Liao J H, et al. Extending Dijkstra's shortest path algorithm for software defined networking[C]//The 16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium. Hsinchu: IEEE, 2014: 1-4.
- [12] Liu H, Stoll N, Junginger S, et al. A Floyd-Dijkstra hybrid application for mobile robot path planning in life science automation[C]//2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Seoul: IEEE, 2012: 279-284.
- [13] 陈炳才, 孙少玮, 宁芊. 基于节点速度和能量的MPR节点集选择[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(6): 902-907.
- Chen Bingcai, Sun Shaowei, Ning Qian. Selection of MPR set based on node speed and energy[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(6): 902-907.
- [14] 刘浩然, 赵赫瑶, 邓玉静, 等. 基于非合作博弈的无线传感器网络覆盖控制算法[J]. *通信学报*, 2019, 40(1): 71-78.
- Liu Haoran, Zhao Heyao, Deng Yujing, et al. Converge control algorithm for wireless sensor networks based on non-cooperative game[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(1): 71-78.
- [15] Hao Xiaochen, Wang Liyuan, Yao Ning, et al. Topology control game algorithm based on Markov lifetime prediction model for wireless sensor network[J]. *Ad Hoc Networks*, 2018, 78: 13-23.
- [16] 刘洲洲, 彭寒. 基于节点可靠度的无线传感器网络拓扑控制算法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2018, 48(2): 571-577.
- Liu Zhouzhou, Peng Han. Topology control algorithm based on node reliability in WSN[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2018, 48(2): 571-577.