

基于随机路径点移动模型的 MANET 容量及延迟分析

王晓菲¹⁾, 蔡英^{1,2)}✉, 范艳芳^{1,2)}

1) 北京信息科技大学网络文化与数字传播北京市重点实验室, 北京 100101

2) 中国科学院信息工程研究所信息安全国家重点实验室, 北京 100093

✉ 通信作者, E-mail: ycai@bistu.edu.cn

摘要 针对已有移动自组网容量、延迟闭解分析在移动模型方面的局限性, 提出了新的概率理论框架, 将无记忆的独立同分布移动模型推广至更为真实的满足特定记忆条件的随机路径点移动模型, 解决了局部移动方式带来的一系列复杂概率描述问题. 对多副本两跳中继算法进行了研究, 得出该中继模式下基于随机路径点移动模型的移动自组网的容量、延迟上限的精确闭解表达式. 仿真实验结果证明了该概率理论框架的有效性及其闭解表达式的准确性.

关键词 移动自组网; 容量; 延迟; 闭解表达式

分类号 TN 929.5

Capacity and delay in MANET under a random waypoint mobility model

WANG Xiao-fei¹⁾, CAI Ying^{1,2)}✉, FAN Yan-fang^{1,2)}

1) Beijing Key Laboratory of Internet Culture and Digital Dissemination Research, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China

2) State Key Laboratory of Information Security, Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

✉ Corresponding author, E-mail: ycai@bistu.edu.cn

ABSTRACT To overcome the limitation of mobility models for the closed-form analysis of capacity and delay in mobile ad hoc networks, the paper introduces a new probability theoretical framework in order to extend a memory-less independent and identically distributed mobility model to a more realistic random waypoint mobility model with certain memory, which solves a series of complex probabilistic problems caused by the way of local move in the random waypoint mobility model. The two-hop relay algorithm with packet redundancy is also investigated and then the accurate closed-form expressions of capacity and delay are obtained. Simulation results demonstrate the efficiency of the proposed probability theoretical framework and prove the accuracy of the closed-form theoretical expressions.

KEY WORDS mobile ad hoc networks; capacity; delay; closed-form expression

移动自组网 (mobile ad hoc networks, 简称 MANETs) 是由一群兼具终端及路由功能的可移动设备通过无线链路形成的无中心、多跳和临时性的自治系统^[1], 在目前的通讯领域具有极其重要的地位和较为广泛的应用.

移动自组网容量、延迟的分析一方面可用于评估网络协议的传输性能, 另一方面通过相关反馈, 也

可为网络协议的优化改进提供依据, 因而得到学术界的广泛关注. Grossglauser 和 Tse^[2] 于 2002 年分析得到单副本传输模式下移动自组网容量 $\Theta(1)$, 证明与包含 n 节点的静态无线网的容量 $O(1/n^{1/2})$ 相比, 若节点具备移动性, 网络容量将从不可扩展变为可扩展.

随后众多学者针对不同移动模型开展了大量研

收稿日期: 2013-08-28

基金项目: 北京市教委科技发展计划面上项目 (KM201311232014); 北京信息科技大学网络文化与数字传播北京市重点实验室开放课题 (ICDD201408); 中国科学院信息工程研究所信息安全国家重点实验室开放课题 (2014-16)

DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2014.10.018; http://journals.ustb.edu.cn

究. Sharma 等^[3]将整体网络范围划分为 $n^\alpha \times n^\alpha$, 研究发现对于随机方向移动模型 (random direction model, 简称 RDM), 当 $0 \leq \alpha < 0.5$ 时两跳中继延迟为 $\Theta(n)$, 当 $\alpha = 0.5$ 时为 $\Theta(n \log n)$. 2010 年, Li 等^[4]进一步细分该网络模型, 设计更为实用的受限随机移动模型, 得到多跳中继方案下网络容量与延迟的渐近关系式, 研究如何通过调控节点移动方式以获取更大的网络容量. 此外, 相关工作^[5]针对一维与二维独立同分布移动模型 (i. i. d. mobility model)^[2]中的快速与慢速移动场景, 权衡出给定延迟条件下的最佳多播或单播容量. 在使用高斯信道模型时, Wang 等^[6]围绕混合随机漫步移动模型 (hybrid random walk model)^[7]分析出平均网络容量及延迟. 2010 年, Huang 等^[8]为移动自组网引入通信基站来提升网络容量, 与慢速移动的单节点吞吐量相比, 在快速移动的通用模型下该吞吐量可以得到提升.

然而, 上述工作均是围绕渐近性结果进行分析, 只能从宏观上描述延迟时间的变化趋势, 而确切的延迟描述方法更能引发网络设计者的强烈兴趣, 通常借助封闭式求解方法加以解决. Neely 和 Modiano 在其 2005 年的工作^[9]中讨论 i. i. d. 模型下的两跳中继算法, 同时以各数据包的平均服务时间和输入泊松流的到达率为参数, 构造出端到端延迟的封闭形式精确解需满足的上限表达式. 2011 年, Liu 等^[10]为方便灵活操控延迟, 设计 f 副本两跳中继算法以支持冗余包传输, 并由此在充分讨论源节点和目的节点的平均服务时间的基础上, 完整指出了基于 i. i. d. 移动模型的网络容量与端到端延迟的封闭形式上限. 闭解表达式往往以函数形式表现各类网络控制参数与容量延迟之间的对应关系, 在度量网络性能方面具有显著优势.

在移动自组网闭解容量延迟的相关分析工作中, 由于 i. i. d. 移动模型是一种全局移动形式, 导致目前已有结论在随机路径点移动模型 (random waypoint mobility model, 简称 RWPM)^[11]、随机漫步移动模型 (random walk model, 简称 RWM)^[12]等局部移动方式下并不适用.

一般认为, 与 i. i. d. 等全局移动模型相比, 局部移动模型相对更为准确地描述了人类、物体等的运动规律. 这是由于前者的无约束大范围移动及均匀概率分布仅存在理论可行性, 而后者却如实地刻画了短期内小范围移动这一节点现实特征. 但是, 网络对各节点移动方式的细节 (特别是其概率分布) 极其敏感, 由此引发了局部移动模型下的一系列复杂概率描述问题, 直接影响移动自组网中继转发机制、

传输调度机制乃至整体通信效率, 主要表现为因移动方式改变而亟需应对的离散型高维概率分布、对未来状态的有效预测和通信双方动态关联捕捉等难题.

近年来, 对局部移动模型的研究主要涵盖以下几个方面. 其一, 在特定移动模型和路由协议下具体分析节点速度、方向等因素在路由协议的能耗方面起到的不同作用^[13]. 其二, 为路由节点的真实移动行为建模. 例如, Bhandari 等^[14]考虑以吸引点来表现真实用户的聚集行为, 使移动节点沿着预先定义的路径接近其目标位置. 该移动模型以降低分组投递率为代价, 有效缩小了端到端延迟. 其三, 鉴于移动模型在网络仿真中的重要地位, 需对其稳定性进行分析. 相关研究^[15]指出逐点遍历性定理是移动模型具有稳定性的充要条件. 诸如此类, 关于局部移动模型的研究虽较为丰富, 但始终关注于单个节点在某一模型下的自有属性, 较少涉及节点间相互关系的描述或具体中继算法下网络性能的分析. 特别地, 针对连续性系统模型, 已有工作^[16]曾多次指出两个节点间的相遇间隔时间 (即两次接连相遇的时间间隔) 近似服从于指数分布, 但在分析封闭式传输延迟时所考虑的网络场景往往相对简单, 一般仅包含一对源节点与目的节点, 且只传送单个数据包, 实用性受限.

关于常见随机移动模型, 分析其各自的移动方式和概率特征, 可发现最初用来模拟粒子布朗运动的随机漫步移动模型本质上是一种完全不可预测的运动方式, 且节点的移动速度与其运动方向无关, 该模型的随机性导致其现实应用价值受限. 而与之相对的随机方向移动模型因其节点移动行为的简易性及相似性早期常见于理论研究中, 后被证明仿真过程存在严重的边界聚集现象. 直至随机路径点移动模型被提出, 该缺陷才最终得以改进. 然而, 该模型下的节点概率分布^[17]多数依旧围绕孤立节点展开讨论, 分析出单个运动节点在某一区间的一维与二维空间概率密度函数, 有助于提高自组网的仿真精度, 但仍难以描述节点移动行为对网络性能造成的影响.

因此, 本文将重点讨论多方节点在移动过程中的位置分布关系, 充分分析随机路径点移动模型下节点记忆条件与相遇行为对网络传输质量的影响形式, 并为之建模. 具体来说, 我们提出一套概率理论框架, 研究关键点在于通过计算任意时刻任意节点在特定小区范围内的相遇概率, 推导出网络各传输阶段的成功完成概率, 结合资源竞争和无线干扰的

要求,构造马尔科夫链描述源节点与目的节点的服务过程.此后,将 i. i. d. 移动模型下的容量、延迟分析方法推广至更为真实的、满足特定记忆条件的随机路径点移动模型.针对移动自组网中广泛应用的多副本两跳中继算法,分析网络容量、延迟上限的闭解表达式.通过仿真实验,证明性能分析结果的准确性及所提出分析方法的有效性.

1 系统模型与中继算法

本节依次详述了本文中所使用的网络模型、流量模型、干扰模型与调度模型.随后对随机路径点移动模型与多副本两跳中继算法进行了简要介绍.

1.1 网络模型和流量模型

n 个移动节点分布于一个有限平方单位中,该平方单位被视作一个边界互通的球面且被平均划分为 $m \times m$ 个小区 (cell). 其中的每个节点既是源节点,又是某些数据包的目的节点,同时也充当其余 $n - 2$ 条数据流的中继节点.网络模型如图 1 所示,3 个移动节点随机分布于 9×9 的小区范围内.

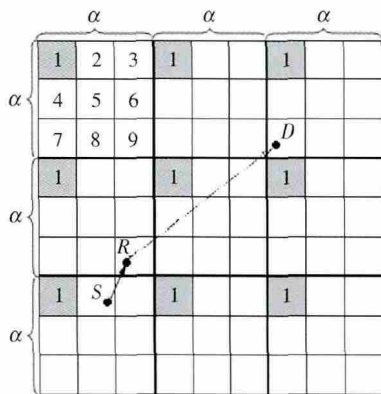


图 1 网络模型、调度模型示例图

Fig. 1 Illustration of the network model and the scheduling model

在该网络环境下,本文选用一种基于时隙且快速移动的网络场景^[18],即假设在每个时隙 (time slot) 仅支持进行一跳传输;每个时隙传输的比特数是固定的且被视作一个包;每个节点在一个时隙期间位于且仅位于唯一的一个小区中.在此,时隙长度定义为节点相遇过程中传送单个数据包的时间消耗,不包含节点移动时间和包的产生时间.

为单播通信方式设计如下流量模型^[19]:将从源节点向目的节点的通信视作一个流;因网络中的每个移动节点均可作为发送者,且其目的节点随机选取,故任意时刻网络中最多共有 n 个不同的流;源于每个节点的通信是一个参数为 λ (包·时隙⁻¹) 的泊松流.换言之,每个源节点生成包的速率为 λ ,且包的到达过程独立于其移动过程.对于每个流的目的

端,目的节点总是按序请求并按序接收.

1.2 干扰模型和调度模型

对于广义的无线网络而言,利用传输范围 r 构建通用干扰模型,以防止节点同时传输时的干扰现象.假定某一时隙 t ,节点 i 试图与节点 j 通信,而节点 k 恰好同时发起传输,则干扰模型指出 i 与 j 间无干扰通信需满足的两项条件:(1) i 与 j 的欧式距离不大于 r ;(2) k 与 j 的欧式距离不小于 $(1 + \Delta)r$,其中 Δ 为保护因子.

具体到移动自组网中继算法的局部传输场景,调度模型规定位于某小区中的节点仅能向其一跳传输范围中的邻居(位于相同小区或其 8 个邻接小区中的节点)传送包,即可得传输范围如下

$$r = \sqrt{8}/m.$$

为有效避免无线传输资源竞争,可引入传输组概念^[10],使得位于相同传输组中的节点可以同时传输而不会发生相互干扰.图 1 中 α 取值为 3,共划分出 9 个传输组,所有标号为 1 的阴影小区被视作一个传输组,即任意两个水平且垂直距离均为 α 整数倍的小区属于相同传输组,因而 α 的取值十分关键^[10]:

$$\alpha = \min\{ \lceil (1 + \Delta) \sqrt{8} \rceil + 2, m \}. \quad (1)$$

网络中共有 α^2 个传输组,每个小区属于一个独立的传输组.本文进一步规定每个传输组(每个小区)每隔 α^2 个时隙将成为活动的,即得到传输机会.随后从中随机选择一个节点作为发送者,并依照两跳中继算法开始进行包传输.

1.3 随机路径点移动模型

移动模型用来处理节点位置、速度、方向和加速度的变化.总体上讲,在每个时隙的开始,每个节点独立且均匀地按照某种移动模型方案的要求选择一个目的小区,并于整个时隙保持在该小区中.此外,1.1 节中网络模型描述的无边界球面通信空间使得节点在有限平方单位实现边界互通性移动,因而移动模型复杂的边界效应可被忽略,即移动节点不存在中心聚集现象.

对于基于时隙且快速移动的有限网络环境,随机路径点移动模型定义如下^[11]:每个节点随机产生一个向量 $v = (v_x, v_y)$,用来代表目的小区相对于当前所处位置的二维位移增量,其中 v_x 和 v_y 的取值范围为 $[1/m, 3/m]$.换言之,每步移动共覆盖了 36 个可能的目的小区,即每个小区被选中的概率为 $1/36$,如图 2 所示.同时,在每次移动结束后,各节点的暂停时间均为一个单位时隙.

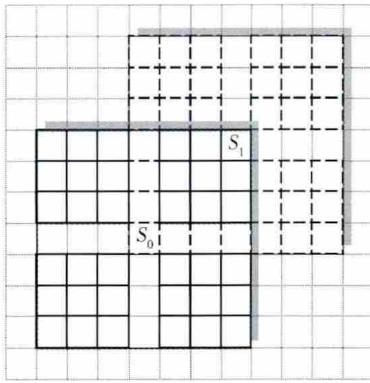


图 2 随机路径点移动模型(其中 S_k 代表节点 S 在时隙 k 所处位置)

Fig. 2 Random waypoint mobility model, where S_k represents the location of Node S at time slot k

1.4 多副本两跳中继算法

为简便起见,本文余下内容分别用标记 S 、 D 和 R 依次代表源节点、目的节点和中继节点。

多副本两跳中继算法^[10]一般规定源自 S 的每个包在到达 D 之前将经历最多两跳传输,且每个包的副本至多被发送给 f 个不同的中继节点,简称为 2HR- f 。图 1 描述了一条可能的传输路径,从中可观察到 S 正在 R 的转发协作下向 D 传送包。

因此,网络中每时每刻仅存在三类传输形式,即一跳传输范围内的 $S-D$ 传输、 $S-R$ 传输和 $R-D$ 传输。只要满足传输条件, $S-D$ 传输就会立即优先进行, $S-R$ 传输和 $R-D$ 传输将会以等概率的形式随机发生。活动小区中的发送者(S 或 R)及其一跳范围内的接收者(R 或 D)均按照均匀概率分布进行选择。

2 概率理论框架

本节针对随机路径点移动模型的节点位置分布特征,提出一套概率理论框架,对满足特定记忆条件的三类节点相遇行为进行建模,从而计算出任意时刻移动节点在指定小区范围内发生相遇的概率。此后利用该结论分析网络传输机会与接收机会的竞争情况,以及各种传输形式的成功发生概率,可作为后续容量与延迟推导的基础。

2.1 移动模型假设

根据随机路径点移动模型的定义,可知任意两个节点在时隙 t 的相对位置与其在时隙 $t-1$ 的特定位置有着十分密切的联系,且此类记忆现象可从图 2 中得到印证。此外,在一跳传输范围内,由于节点相遇是发生传输的先决条件,可知不同移动模型对网络性能的唯一可能影响表现在每对节点间的相遇

概率上。本文用 S_k 和 D_k ($k \geq 0$) 分别代表节点 S 和节点 D 在时隙 k 的即时位置。

Liu 针对无记忆 i. i. d. 移动模型所设计的容量延迟理论模型无法直接应用于满足特定记忆条件的随机路径点移动模型。首先定义节点 S 和节点 D 间的记忆条件和相遇事件。

记忆条件 在时隙 $k-1$ 若 D_{k-1} 属于 S_{k-1} ($k \geq 1$) 的 36 个一跳小区(节点 S 一次移动的可达范围),且经过一次移动后,当且仅当下述三类事件至少发生其一,则称节点 S 和节点 D 在时隙 k 相遇。

事件 X : S_k 和 D_k 属于相同小区;

事件 Y : D_k 属于 S_k 的 8 个邻接小区;

事件 Z : D_k 属于 S_k 的 9 个一跳小区。

相应地,用 P_X 、 P_Y 和 P_Z 分别代表上述事件发生的概率,容易得出 $P_Z = P_X + P_Y$ 。

注 1 Cai 等的研究^[20]已经证明,在严格基于时隙且快速移动的网络模型下,若各节点初始位置均匀分布,各时隙移动方式一致且独立,则采用随机路径点移动模型的节点在任意时隙的位置概率分布呈现出均匀性。因此,从任意时隙起移动一步的相遇事件近似等价于从初始状态起移动一步的相遇事件,可以仅通过对一步移动情景的讨论来描述移动模型的总体相遇行为。此时通常将位置 D_k 视作节点 S 与节点 D 的目标相遇小区(对于事件 X 而言,即假设时隙 k 节点 S 和节点 D 在 D_k 处相遇)。

2.2 概率理论框架

现在开始推导各类相遇事件概率。在边界互通的网络范围内,利用节点目的的小区位置分布的平面对称性,将相遇问题的多种可能情况分类处理,得到各个目标状态下满足随机路径点移动模型记忆条件的相遇概率特征,并按照一定的比例进行整合计算。在后续定理的证明过程中,将举例分析各类典型状态。

首先,由于在初始时刻每个节点均随机地从 $m \times m$ 个小区中选择初始位置,故有

$$P_X = \frac{1}{m^2}, P_Y = \frac{8}{m^2}, P_Z = \frac{9}{m^2}, k = 0.$$

对于 $k \geq 1$ 的情况,有以下分析结论。

定理 1 S_k 和 D_k 属于相同小区的概率为

$$P_X = \frac{1}{4m^2}, m \geq 13. \quad (2)$$

证明:相遇事件的记忆条件如图 3 所示,此时 D_{k-1} 的所有可能位置均属于 S_{k-1} 的 36 个一跳小区,即仅此 36 个 D_{k-1} 位置满足节点 S 的记忆要求。同时以 S_{k-1} 为原点构建二维坐标系,由图形对称性可

将 S_k 的所有可能位置依照等比例划分为四部分, 因每个一跳小区成为 S_k 的概率为 $1/36$, 故划分各部分的概率均为 $9/36$. 下文证明以第 I 象限为例.

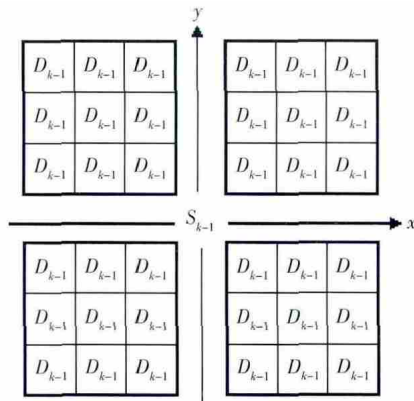


图 3 时隙 $k-1$ 节点 S 与节点 D 位置分布

Fig. 3 Location distribution of Node S and Node D at time slot $k-1$

对于图 3 中编号为①至⑨的每个 S_k 小区位置, 所有可能的位置 D_{k-1} 及其移动路径(从 D_{k-1} 移动到 S_k) 分别如图 4(a) 至图 4(i) 所示. 图中乘式的第一个数字代表满足记忆条件且使得下一时隙节点 D 能够与节点 S 相遇的 D_{k-1} 的个数, 而第二个数字代表经过一次移动后二者实际发生相遇的小区个数(对于事件 X , 该项显然为 1). 图 5 和附录 A 中图 A-1 同.

若以图 4(a) 描述的情况为例, 可知节点 D 一次

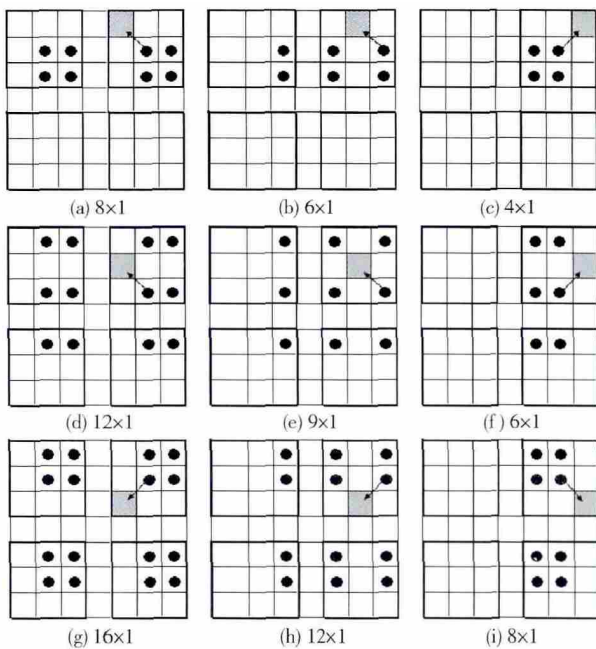


图 4 D_{k-1} 到 D_k 移动过程示例(其中黑点代表可能的 D_{k-1} 位置, 阴影区域代表 S_k , 箭头举例说明了相应的移动路径)

Fig. 4 Illustration of all possible movement process from D_{k-1} to D_k , where the blackspots represent possible D_{k-1} , the shaded areas represent S_k and the arrows take examples for corresponding moving paths

移动的状态总数为 $m^2 \times 36$, 而其中仅有 8×1 个状态满足事件 X 的要求, 故此移动场景相应的发生概率为 $(8 \times 1) / (m^2 \times 36)$. 余下情况同理可证.

由此, 综合图 3 与图 4 中的场景, 有

$$P_X = \frac{1}{m^2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{9} \cdot \left(\frac{8 \times 1}{m^2 \times 36} + \frac{6 \times 1}{m^2 \times 36} + \frac{4 \times 1}{m^2 \times 36} + \frac{12 \times 1}{m^2 \times 36} + \frac{9 \times 1}{m^2 \times 36} + \frac{6 \times 1}{m^2 \times 36} + \frac{16 \times 1}{m^2 \times 36} + \frac{12 \times 1}{m^2 \times 36} + \frac{8 \times 1}{m^2 \times 36} \right) \cdot m^2 \cdot 4 = \frac{1}{4m^2}.$$

则公式(2)得证.

定理 2 D_k 属于 S_k 的 8 个邻接小区的概率为

$$P_Y = \frac{91}{36m^2} \quad m \geq 13. \quad (3)$$

证明: 以①号小区位置为例, 所有可能的位置 D_{k-1} 及其移动路径(从 D_{k-1} 移动到①号 S_k 的 8 个邻接小区) 如图 5 所示, 可知节点 D 一次移动过程中满足事件 Y 要求的状态总数为

$$1 \times 1 + 5 \times 2 + 5 \times 3 + 4 \times 4 + 4 \times 5 + 3 \times 6 + 2 \times 8 = 96.$$

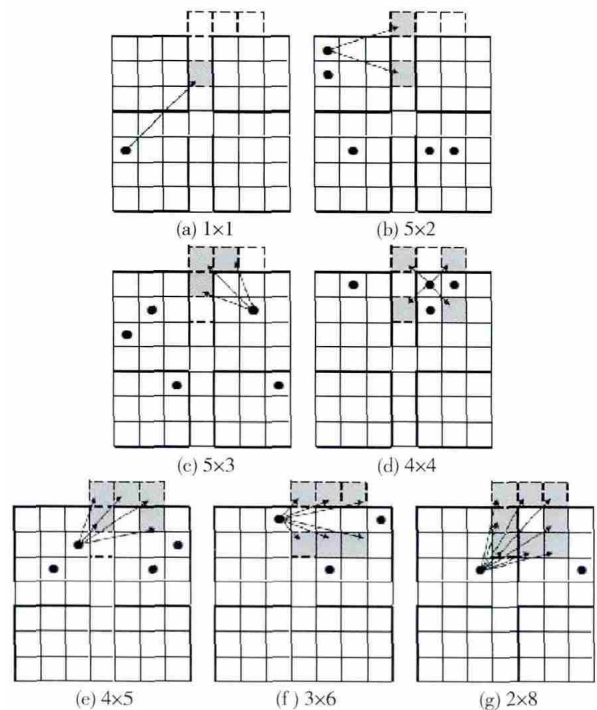


图 5 D_{k-1} 到 D_k 移动过程示例(其中黑点代表可能的 D_{k-1} 位置, 阴影区域代表与①号 S_k 邻接且 D 一步可达的小区, 箭头举例说明了相应的移动路径)

Fig. 5 Illustration of all possible movement processes from D_{k-1} to D_k , where the blackspots represent possible D_{k-1} , the shaded areas represent adjacent cells of the first S_k that D can reach by one-hop and the arrows take examples for corresponding moving paths

有关余下的 8 个 S_k 小区位置及相应的状态总

数, 详见表 1. 表中个乘式的第一个因子代表满足记忆条件且使得下一时隙节点 D 能够与节点 S 相遇的 D_{k-1} 的个数, 而第二个因子代表经过一次移动后二者实际发生相遇的小区个数, 表 4 同.

由此, 依据图 3 的记忆条件, 结合图 5 与表 1 中所描述的场景, 仿照定理 1 的证明过程, 可得

$$P_Y = \frac{1}{m^2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{9} \cdot \left(\frac{96}{m^2 \times 36} + \frac{66}{m^2 \times 36} + \frac{60}{m^2 \times 36} + \frac{105}{m^2 \times 36} + \frac{72}{m^2 \times 36} + \frac{66}{m^2 \times 36} + \frac{153}{m^2 \times 36} + \frac{105}{m^2 \times 36} + \frac{96}{m^2 \times 36} \right) \cdot m^2 \cdot 4 = \frac{91}{36m^2}.$$

则公式 (3) 得证.

注 2 由 $P_Z = P_X + P_Y$, 可知 D_k 属于 S_k 的 9 个一跳小区的概率为

$$P_Z = \frac{1}{4m^2} + \frac{91}{36m^2} = \frac{25}{9m^2}, \quad m \geq 13. \quad (4)$$

使用相似方法对此结论进行验证, 详见附录 A.

表 1 不同 S_k 位置下满足事件 Y 要求的状态总数

Table 1 Total number of the state that meets the requirement of Event Y under different S_k

S_k 编号	满足事件 Y 要求的状态总数	总计
②	$1 \times 1 + 6 \times 2 + 4 \times 3 + 5 \times 4 + 3 \times 5 + 1 \times 6$	66
③	$1 \times 1 + 4 \times 2 + 3 \times 3 + 3 \times 4 + 2 \times 5 + 2 \times 6 + 1 \times 8$	60
④	$1 \times 1 + 7 \times 2 + 8 \times 3 + 6 \times 4 + 6 \times 5 + 2 \times 6$	105
⑤	$1 \times 1 + 8 \times 2 + 9 \times 3 + 7 \times 4$	72
⑥	$1 \times 1 + 6 \times 2 + 4 \times 3 + 5 \times 4 + 3 \times 5 + 1 \times 6$	66
⑦	$1 \times 1 + 6 \times 2 + 8 \times 3 + 5 \times 4 + 8 \times 5 + 4 \times 6 + 4 \times 8$	153
⑧	$1 \times 1 + 7 \times 2 + 8 \times 3 + 6 \times 4 + 6 \times 5 + 2 \times 6$	105
⑨	$1 \times 1 + 5 \times 2 + 5 \times 3 + 4 \times 4 + 4 \times 5 + 3 \times 6 + 2 \times 8$	96

2.3 基础概率性质

传输或接收机会竞争作为影响传输质量的重要因素, 在移动自组网性能分析工作中极易被忽视. 首先利用上述相遇事件的有关结论, 为活动小区定义下述两类机会竞争概率.

引理 1 传输机会竞争概率被定义为活动小区中至少含有两个节点的概率, 即

$$1 - (1 - P_X)^n - C_n^1 P_X (1 - P_X)^{n-1} = 1 - \left(1 - \frac{1}{4n}\right)^{n-1} \left(\frac{5}{4} - \frac{1}{4n}\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 - \frac{5}{4} e^{-1/4}.$$

引理 2 接收机会竞争概率被定义为除发送节点外, 活动小区的一跳传输范围内至少含有两个其他节点的概率, 即

$$1 - (1 - P_X)^n - \sum_{k=1}^2 C_n^k P_X (1 - P_Z)^{n-k} -$$

$$C_n^2 C_2^1 P_X P_Y (1 - P_Z)^{n-2} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 - e^{-1/4} - \frac{263}{288} e^{-25/9}.$$

引理 1 与引理 2 的结果充分证明, 随着网络规模 m ($m^2 = n$) 无限增长并逐渐趋于无穷, 基于随机路径点移动模型的移动自组网发生传输机会竞争或接收机会竞争的概率无法收敛于 0, 故通过研究此类资源竞争问题, 可以提升网络性能分析结果的准确性.

其次, 对于一个给定时隙下的数据流, 分别用 p_1 、 p_2 和 p_3 依次代表其发生一次包传输的概率、发生一次 $S-D$ 传输的概率以及发生一次 $S-R$ 传输或 $R-D$ 传输的概率, 易知 $p_1 = p_2 + p_3$, 具体如下.

对于 p_2 所描述的事件, 当且仅当下述三个子事件同时发生: (1) S 位于活动小区中; (2) D 位于 S 所在小区或 S 的 8 个邻接小区; (3) S 被选作发送者.

综上所述, 有

$$p_2 = \frac{1}{\alpha^2} \left[\sum_{k=0}^{n-2} C_{n-2}^k P_X^k (1 - P_X)^{n-2-k} P_X \frac{1}{k+2} + \sum_{k=0}^{n-2} C_{n-2}^k P_X^k (1 - P_X)^{n-2-k} P_Y \frac{1}{k+1} \right] = \frac{1}{\alpha^2} \left[\frac{n P_Y + n P_X - 1}{n(n-1) P_X} - (1 - P_X)^{n-1} \frac{n P_Y + P_X - 1}{n(n-1) P_X} \right] = \frac{1}{\alpha^2} \left[\frac{100n - 36m^2}{9n(n-1)} - \left(\frac{4m^2 - 1}{4m^2}\right)^{n-1} \frac{91n + 9 - 36m^2}{9n(n-1)} \right].$$

对于 p_3 所描述的事件, 当且仅当下述四个子事件同时发生: (1) S 位于活动小区中; (2) S 一跳传输范围内至少有一个除 S 外的节点; (3) S 被选作发送者; (4) D 不在 S 的一跳传输范围内.

$$p_3 = \frac{1}{\alpha^2} (1 - P_Z) \left[\sum_{k=1}^{n-2} C_{n-2}^k P_X^k (1 - P_X)^{n-2-k} \frac{1}{k+1} + \sum_{k=1}^{n-2} C_{n-2}^k P_Y^k (1 - P_Z)^{n-2-k} \times 1 \right] = \frac{1}{\alpha^2} (1 - P_Z) \left[\frac{1 - (1 - P_X)^{n-1}}{(n-1) P_X} - (1 - P_Z)^{n-2} \right] = \frac{1}{\alpha^2} \left\{ \frac{36m^2 - 100}{9(n-1)} \left[1 - \left(\frac{4m^2 - 1}{4m^2}\right)^{n-1} \right] - \left(\frac{9m^2 - 25}{9m^2}\right)^{n-1} \right\}.$$

类似地, 对于一个给定时隙下的数据流, 假设当前网络中已有包 P 的 j 个副本, 则以 $P_r(j)$ 代表节点 D 在下一时隙成功接收到包 P 的概率, 其中 $1 \leq j \leq f+1$; 以 $P_d(j)$ 代表节点 S 在下一时隙成功发出包 P 的一个新副本的概率, 其中 $1 \leq j \leq f$. 根据充要条件, 可推出^[10]

$$P_i(j) = p_2 + \frac{j-1}{2(n-2)}p_3, \quad (5)$$

$$P_d(j) = \frac{n-j-1}{2(n-2)}p_3. \quad (6)$$

3 网络容量延迟封闭表达式

我们可以利用第 2 节中得到的理论结果推导出随机路径点移动模型下的网络容量和端到端延迟上限.

推导过程首先将公式(5)和公式(6)视作马尔科夫链的转移概率,并由此构建两条有限状态的一维吸收马尔科夫链^[10]分别用来描述 S 端的发送过程和 D 端的接收过程. 定义 S 端平均服务时间 X_s 为源节点 S 开始为某包发送副本到 S 结束为其发送副本的平均时间间隔, D 端平均服务时间 X_d 指目的节点 D 开始请求接收某包到 D 成功收到该包的平均时间间隔. 随后寻找二者间的数值关系,其中一个重要的性质指明存在区域上限 f_0 ,使得当 $1 \leq f \leq f_0$ 时,总有

$$X_s \leq X_d \quad (7)$$

最终由公式(7)推导出网络容量 μ ,即最大接收速率,和端到端延迟上限 T_e 的期望值 $E\{T_e\}$,其中 T_e 代表包从产生到被接收的平均时间间隔,分别如下式^[10]:

$$\mu = p_2 + \frac{f}{2(n-2)}p_3 \quad (8)$$

$$E\{T_e\} \leq \frac{E\{X_s(f+1)\}}{1-\lambda E\{X_s(f+1)\}} + \frac{E\{X_d(f+1)\}}{1-\lambda E\{X_d(f+1)\}} \quad (9)$$

其中 $E\{X_s(f+1)\} = \sum_{i=1}^f \frac{2(n-2)}{(n-i-1)p_3}$ 且 $E\{X_d(f+1)\} = \frac{2(n-2)}{2(n-2)p_2 + f \cdot p_3}$ 分别为 S 与 D 的服务时间函数.

4 仿真结果与分析

依据系统模型的相关要求,在 C++ 环境中构造相应的网络模拟器,对随机路径点移动模型下的多副本两跳中继算法进行了仿真. 模拟程序包含随机数生成模块、输入流控制模块、传输组管理模块、传输机会竞争模块、S-D 传输模块、S-R 传输模块、R-D 传输模块、总传输调度模块以及移动模型等.

通过分析该仿真结果,验证了概率理论框架、容量延迟闭解表达式的正确性. 同时,对 i. i. d. 移动模型、随机路径点移动模型下网络性能的差异进行

讨论.

4.1 网络参数设置

在模拟仿真平台中,约定保护因子 $\Delta = 1$,则公式(1)相应地化简为 $\alpha = \min\{8, m\}$. 同时为方便数据度量,引入系统负载量 $\rho = \lambda/\mu$,通常在稳定的网络环境下,恒有 $\rho < 1$.

仿真实验过程中所涉及的主要网络参数依次设定为 $n = 550, m = 24, f_0 = 21$,其中包副本数上限 f 取值为 12 时,理论网络容量值 $\mu = 2.036 \times 10^{-4}$ 包·时隙⁻¹,当 f 取值为 15 时, $\mu = 2.385 \times 10^{-4}$ 包·时隙⁻¹.

关于使用多副本两跳中继算法的基于记忆条件的随机路径点移动模型,通过计算可得不同负载下端到端延迟的理论上限,如表 2 所列.

表 2 端到端延迟上限理论值($n = 550, m = 24$)

Table 2 Theoretical values of the upper bound of end-to-end delay ($n = 550, m = 24$)

ρ	$E\{T_e\} (f=12)$	$E\{T_e\} (f=15)$
0.2	8201.379	7932.840
0.3	9168.755	8866.235
0.4	10436.731	10076.407
0.5	12181.884	11719.589
0.6	14756.412	14103.994
0.7	18980.501	17940.449
0.75	22325.610	20932.353
0.8	27311.609	25342.380
0.85	35575.723	32571.500
0.9	52028.986	46816.615

4.2 理论结果准确性验证

仿真实验运行总时间达到 10000000 时隙,并重复该模拟过程三次后,汇总不同副本数下仿真实验数值结果及其均值为表 3. 其中,端到端延迟的实验值均严格低于其理论上界,验证了第 2 节中相遇事件概率理论框架的分析结论以及第 3 节中端到端延迟闭解表达式的正确性. 当 $f = 12$ 时,实验值与理论上界比较接近,二者差距分布在 0.87% 与 10.71% 之间;而当 $f = 15$ 时,源节点发出的副本总数增加,使得网络端到端延迟略有改善,但理论延迟上界的约束条件变宽,造成实验数据与理论值之间的差距增大,大致分布在 5.08% 与 16.72% 之间. 因此,从实验结果我们可以进一步推知,在网络参数 n, m 与 f_0 固定的条件下,若降低包副本数上限,则端到端延迟的闭解上界将更加接近于真实时延.

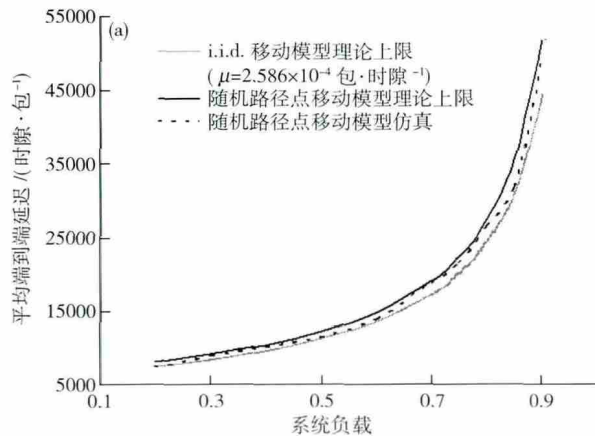
图 6 描述在基于记忆条件的随机路径点移动模

表 3 端到端延迟模拟仿真结果及平均值(95%置信区间)

Table 3 Simulated results and their average values for end-to-end delay (95% confidence intervals)

f	ρ	实验 1	实验 2	实验 3	平均值
12	0.2	7531.2	7225.0	7491.3	7415.8
12	0.3	9017.1	8926.3	9001.2	8981.5
12	0.4	10312.5	10056.3	10110.9	10159.9
12	0.5	11434.4	11302.2	11701.5	11479.4
12	0.6	14332.7	13567.9	13747.5	13882.7
12	0.7	19128.4	18543.2	18777.1	18816.2
12	0.75	22254.1	20934.9	21023	21404.0
12	0.8	27510.4	25873.2	26035.1	26472.9
12	0.85	32359.2	31419.8	31517.5	31765.5
12	0.9	54697.5	45765.6	47008.2	49157.1
15	0.2	6103.4	6674	7042.2	6606.5
15	0.3	7337.1	7489.7	7770.3	7532.4
15	0.4	10005.5	8664.7	9045.4	9238.5
15	0.5	11375.7	10204.6	10797.2	10792.5
15	0.6	12048.3	12434.8	12696.2	12393.1
15	0.7	15647.8	16977.3	17640.8	16755.3
15	0.75	20394.9	19287.6	19509.9	19730.8
15	0.8	24144.7	23013.9	23885.0	23681.2
15	0.85	31860.8	30079.1	30812.4	30917.4
15	0.9	42876.6	40940.5	41404.5	41740.5

型下,随着系统负载量的不断增加,网络延迟理论值与模拟仿真结果的变化趋势。以图 6(a)为例,当 ρ 从 0.2 增大到 0.9,即 λ 值在 0.407×10^{-4} 至 1.832×10^{-4} 间连续变化时,实验结果与理论上界两条曲线呈现出基本相同的变化规律。仿真时延在



7415.8 ~ 49157.1 间连续变化,理论时延由 8201.4 增大到 52029.0,表明实验数据与理论上界紧密匹配。此外,通过观察可知,当系统负载量逐渐向 1 逼近(大于 0.8)时,平均端到端延迟快速增长,网络输入速率逐渐接近其最大吞吐量,从而初步验证了理论网络容量。对于图 6(b)中 f 取值为 15 的情况,同样可以得到相似结论。

进一步对比可以发现,随机路径点移动模型的记忆条件降低了移动节点的相遇概率,使得网络容量小于 i. i. d. 移动模型,而平均时延在 $f = 12$ 时高于 i. i. d. 移动模型(见图 6(a)),却在 $f = 15$ 时低于 i. i. d. 移动模型(见图 6(b))。证明相遇概率不是影响网络延迟的唯一因素,可以在随机路径点移动模型下通过提高包副本数上限来降低端到端延迟,甚至获得优于 i. i. d. 移动模型的时延性能指标,但要以牺牲小部分网络容量为代价。

此外,以 $P_a(f+1)$ 代表某个包在发完 f 个副本后才被目的节点接收的概率。图 7 绘制出伴随系统负载的提升概率 $P_a(f+1)$ 的增长曲线, $\rho = 0.9$ 时 $P_a(f+1)$ 的取值接近于 1。当前传输中几乎全部的数据包均是在源节点发出 f 个副本后才由目的节点接收,即数据输入速率已无限接近网络能够提供的最大吞吐能力,可以证明闭解容量理论分析结果的准确性。

4.3 理论结果定量分析

针对移动自组网中基于记忆条件的随机路径点移动模型,从容量延迟闭解表达式中可以分析出一些实用指标。图 8(a)指出 f 的最佳取值(即 f_0),以及在该值下可达的最大网络容量 μ^* 如图 8(b)所示。

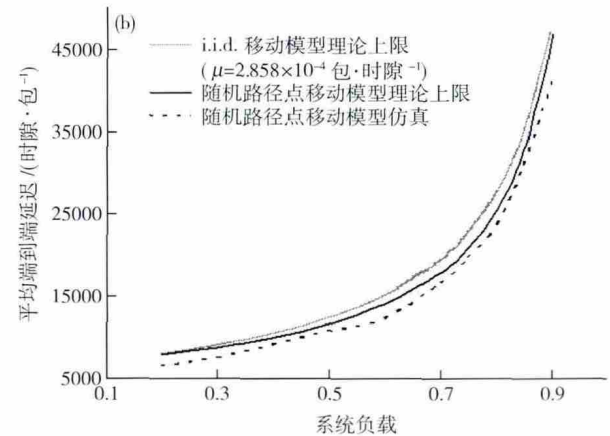


图 6 随机路径点模型下网络延迟理论值与仿真结果对比。(a) 参数 $n = 550, m = 24, f = 12, \mu = 2.036 \times 10^{-4}$ 包·时隙 $^{-1}$; (b) 参数 $n = 550, m = 24, f = 15, \mu = 2.385 \times 10^{-4}$ 包·时隙 $^{-1}$

Fig. 6 Comparison between theoretical and simulated results for network delay validation under the random waypoint mobility model: (a) parameters $n = 550, m = 24, f = 12, \mu = 2.036 \times 10^{-4}$ packets·slot $^{-1}$; (b) parameters $n = 550, m = 24, f = 15, \mu = 2.385 \times 10^{-4}$ packets·slot $^{-1}$

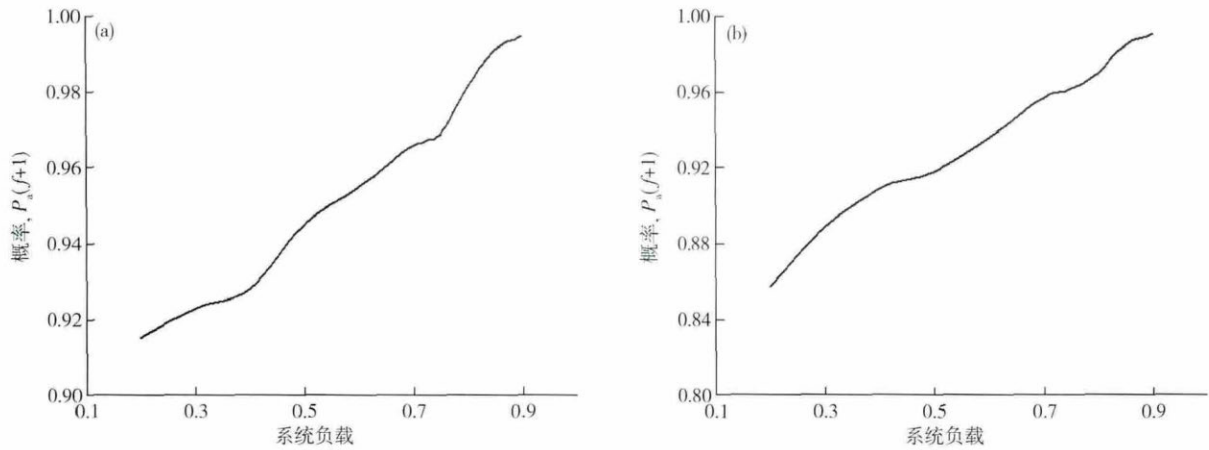


图 7 随机路径点移动模型概率值 $P_a(f+1)$ 仿真结果. (a) 参数 $n=550, m=24, f=12, \mu=2.036 \times 10^{-4}$ 包·时隙⁻¹; (b) 参数 $n=550, m=24, f=15, \mu=2.385 \times 10^{-4}$ 包·时隙⁻¹

Fig. 7 Simulated results for the probability value $P_a(f+1)$ under the random waypoint mobility model: (a) parameters $n=550, m=24, f=12, \mu=2.036 \times 10^{-4}$ packets·slot⁻¹; (b) parameters $n=550, m=24, f=15, \mu=2.385 \times 10^{-4}$ packets·slot⁻¹

在 $n=m^2$ 的约束条件下,当 m 值从 6 逐渐增至 12,即 n 值在 36 至 1024 间连续变化时,图 8(b) 表明随着 n 值的不断增加, μ^* 快速趋近于 0. 若 $n > 250$,则 μ^* 值将会低于 5×10^{-4} 包·时隙⁻¹. 相比 $n=36$ 的情况,最大网络容量缩小了 5 倍以上. 此时,移动节点传输资源竞争带来的负作用远远超过单个数据流所能提供的通信能力,故其最大吞吐量急剧降

低. 此外,图 8(a) 的分段函数表明副本数 f 的最佳取值仅能在小范围的 n 值区间内保持稳定,不存在适用于任意通信场景的最优 f_0 值. 且随着节点数目的增加, f_0 取值的增长速度不断减小,即对于大规模网络环境,单纯增加副本数上限不会为网络容量带来明显提升.

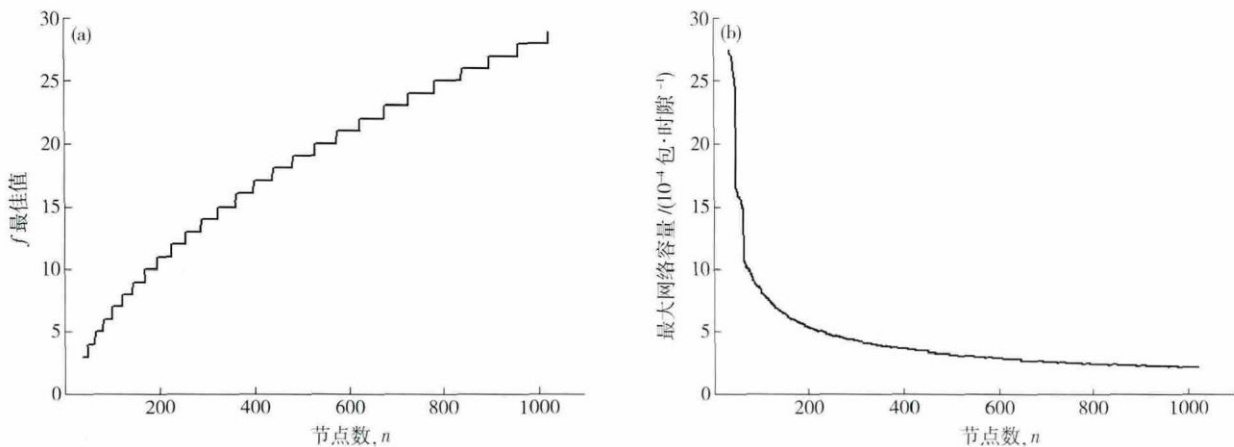


图 8 最大容量及 f 最佳值(其中 $m^2=n$ 且 $36 \leq n \leq 1024$). (a) 不同 n 值下的最佳 f 值; (b) 不同 n 值下的最大网络容量 μ^*

Fig. 8 Maximum capacity and optimal f value, where $m^2=n$ and $36 \leq n \leq 1024$: (a) optimal f value with different n ; (b) maximum capacity with different n

5 结论

本文研究了随机路径点移动模型下移动自组织网的容量与延迟,针对广泛应用的多副本两跳中继算法,推导出封闭的性能表达式.

- (1) 提出了一套概率理论框架,为满足记忆条件的相遇行为建模,并计算移动节点的相遇概率;
- (2) 将移动自组网容量延迟的闭解分析方法从

i. i. d. 移动模型推广至随机路径点移动模型;

(3) 通过仿真实验,证明了该概率理论框架的有效性及闭解表达式的准确性.

附录 A

概率 P_Z 证明: 以①号小区位置为例,所有可能的位置 D_{k-1} 及其移动路径(从 D_{k-1} 移动到①号 S_k 的 9 个一跳小区)如图 A-1 所示,可知节点 D 一次移

动过程中满足事件 Z 要求的状态总数为

$$1 \times 1 + 5 \times 2 + 3 \times 3 + 6 \times 4 + 7 \times 6 + 2 \times 9 = 104.$$

有关余下的 8 个 S_k 小区位置及相应的状态总数, 详见表 A-1.

表 A-1 不同 S_k 位置下满足事件 Z 要求的状态总数

Table A-1 Total number of the state that meets the requirement of Event Z under different S_k

S_k 编号	满足事件 Z 要求的状态总数	总计
②	$1 \times 1 + 6 \times 2 + 1 \times 3 + 8 \times 4 + 4 \times 6$	72
③	$1 \times 1 + 4 \times 2 + 2 \times 3 + 4 \times 4 + 4 \times 6 + 1 \times 9$	64
④	$1 \times 1 + 7 \times 2 + 2 \times 3 + 12 \times 4 + 8 \times 6$	117
⑤	$1 \times 1 + 8 \times 2 + 16 \times 4$	81
⑥	$1 \times 1 + 6 \times 2 + 1 \times 3 + 8 \times 4 + 4 \times 6$	72
⑦	$1 \times 1 + 6 \times 2 + 4 \times 3 + 9 \times 4 + 12 \times 6 + 4 \times 9$	169
⑧	$1 \times 1 + 7 \times 2 + 2 \times 3 + 12 \times 4 + 8 \times 6$	117
⑨	$1 \times 1 + 5 \times 2 + 3 \times 3 + 6 \times 4 + 7 \times 6 + 2 \times 9$	104

由此, 依据图 3 的记忆条件, 结合图 A-1 与表 A-1 中所描述的场景, 仿照定理 1 的证明过程, 可得

$$P_z = \frac{1}{m^2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{9} \cdot \left(\frac{104}{m^2 \times 36} + \frac{72}{m^2 \times 36} + \frac{64}{m^2 \times 36} + \frac{117}{m^2 \times 36} + \frac{81}{m^2 \times 36} + \frac{72}{m^2 \times 36} + \frac{169}{m^2 \times 36} + \frac{117}{m^2 \times 36} + \frac{104}{m^2 \times 36} \right) \cdot m^2 \cdot 4 = \frac{25}{9m^2}.$$

则公式(4)得证.

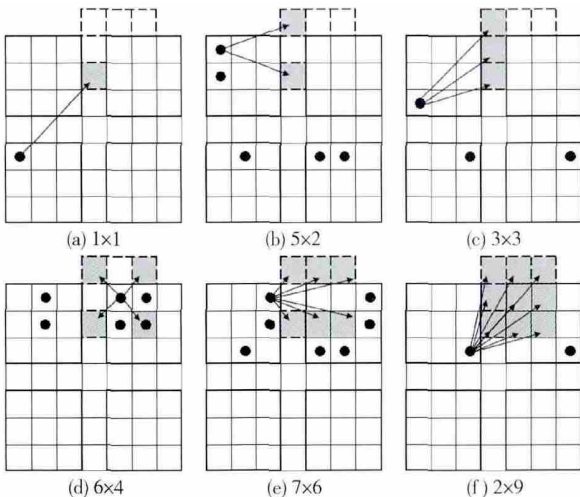


图 A-1 D_{k-1} 到 D_k 移动过程示例(其中黑点代表可能的 D_{k-1} 位置, 阴影区域代表在①号 S_k 一跳范围且 D 一步可达的小区, 箭头举例说明了相应的移动路径)

Fig. A-1 Illustration of all possible movement processes from D_{k-1} to D_k , where the blackspots represent possible D_{k-1} , the shaded areas represent one-hop cells of the first S_k that D can reach by one-hop and the arrows take examples for corresponding moving paths

附录 B

现归纳本文使用符号及具体含义如表 B-1 所示.

表 B-1 符号与参数汇总

Table B-1 Summary of notations and parameters

符号	含义
$E\{T_e\}$	端到端延迟上限
Δ	干扰模型保护因子
α	传输组小区间隔数
λ	源节点生成包速率
P_X	S 和 D 属于相同小区的概率
P_Y	D 属于 S 的 8 个邻接小区的概率
P_Z	D 属于 S 的 9 个一跳小区的概率
p_1	发生一次包传输的概率
p_2	发生一次 $S-D$ 传输的概率
p_3	发生一次 $S-R$ 传输或 $R-D$ 传输的概率
$P_r(j)$	D 在下一时隙收到包 P 的概率
$P_d(j)$	S 在下一时隙发出包 P 新副本的概率
$P_a(f+1)$	包 P 发完 f 个副本后才被 D 接收的概率
X_S	S 端平均服务时间
μ	网络容量
m	网络规模
r	通信范围
S	源节点
R	中继节点
D	目的节点
f_0	f 值上限
ρ	系统负载
n	移动节点总数
f	包副本数上限
μ^*	最大网络容量
S_k	S 在时隙 k 的位置
D_k	D 在时隙 k 的位置
X_D	D 端平均服务时间

参 考 文 献

- [1] Ma Y Z, Jamalipour A. A cooperative cache-based content delivery framework for intermittently connected mobile ad hoc networks. *IEEE Trans Wireless Commun.*, 2010, 9(1): 366
- [2] Grossglauser M, Tse D N. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *IEEE/ACM Trans Networking*, 2002, 10(4): 477
- [3] Sharma G, Mazumdar R, Shroff N. Delay and capacity trade-offs in mobile ad hoc networks: a global perspective. *IEEE/ACM*

- Trans Networking*, 2007, 15(5): 981
- [4] Li P, Fang Y G, Li J. Throughput, delay and mobility in wireless ad-hoc networks // *Proceedings of INFOCOM*. San Diego, CA, 2010: 1
- [5] Wang Y, Chu X Y, Wang X B, et al. Optimal multicast capacity and delay tradeoffs in MANETs: a global perspective // *Proceedings of INFOCOM*. Shanghai, 2011: 640
- [6] Wang C, Li X Y, Tang S J, et al. Capacity and delay in mobile ad hoc networks under Gaussian channel model. *ACM Mobile Comput Commun*, 2010, 14(3): 22
- [7] La R J. Distributional convergence of intermeeting times under the generalized hybrid random walk mobility model. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(9): 1201
- [8] Huang W T, Wang X B, Zhang Q. Capacity scaling in mobile wireless ad hoc network with infrastructure support // *Proceedings of ICDCS*. Genoa, 2010: 848
- [9] Neely M J, Modiano E. Capacity and delay tradeoffs for ad-hoc mobile networks. *IEEE Trans Inf Theory*, 2005, 51(6): 1917
- [10] Liu J J, Jiang X H, Nishiyama H, et al. Delay and capacity in ad hoc mobile networks with f -cast relay algorithms. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2011, 10(8): 2738
- [11] Zhou S, Ying L. On delay constrained multicast capacity of large-scale mobile ad-hoc networks // *Proceedings of INFOCOM*. San Diego, CA, 2010: 131
- [12] Madania A, Moussa N. Self-organized behavior based mobility models for ad hoc networks. *J Theor Appl Inf Technol*, 2012, 39(2): 197
- [13] Gowrishankar S, Basavaraju T G, Subirkumar S. Mobility based energy analysis of five mobility models in MANET using five routing protocols. *Int J Comput Sci Network Secur*, 2010, 10(5): 64
- [14] Bhandari S R, Lee G M, Crespi N. Mobility model for user's realistic behavior in mobile ad hoc network // *Proceedings of CNSR*. Montreal, QC, 2010: 102
- [15] Timo R, Blackmore K, Hanlen L. Strong stochastic stability for MANET mobility models // *Proceedings of ICON*. Adelaide, SA, 2007: 13
- [16] Hanbali A A, Kherani A A, Nain P. Simple models for the performance evaluation of a class of two-hop relay protocols // *Proceedings of IFIP Networking*. Berlin, 2007: 189
- [17] Shi R, Yang X Z. Research on the node spatial probabilistic distribution of the random waypoint mobility model for ad hoc network. *J Comput Res Dev*, 2005, 42(12): 2056
(时锐, 杨孝宗. 自组网 Random Waypoint 移动模型节点空间概率分布的研究. *计算机研究与发展*, 2005, 42(12): 2056)
- [18] Ciullo D, Martina V, Garetto M, et al. Impact of correlated mobility on delay-throughput performance in mobile ad-hoc networks. *IEEE Trans Networking*, 2011, 19(6): 1745
- [19] Garetto M, Giaccone P, Leonardi E. Capacity scaling in ad hoc networks with heterogeneous mobile nodes: the subcritical regime. *IEEE/ACM Trans Networking*, 2009, 17(6): 1888
- [20] Cai Y, Wang X F, Zhang Y Q. The analysis of mobility models in MANETs with two-hop relay algorithm // *Proceedings of INCoS*. Bucharest, 2012: 229