

基于游牧团体移动模型的网络性能研究

刘建明 林道炜

(桂林电子科技大学计算机与信息安全学院 桂林 541004)

摘要 针对节点之间相互独立的网络移动模型不能反映真实应用场景下移动自组网特性的问题,使用在军事领域和车载网中更具适用性的游牧团体移动模型。在构造了相应的系统模型后,提出一种群组间多副本中继算法,得出该中继模式下基于游牧团体移动模型的网络容量、时延的上限和下限,并依此求得相应的折中率。对节点运动的仿真验证了该模型具备很好的移动特性;绘制出的有关参数的函数曲线证明了在这种移动模型下可以获得更好的网络性能。

关键词 移动自组网,游牧团体移动模型,容量,时延,折中率

中图分类号 TP393.02 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.02.021

Research on Network Performance Based on Nomadic Group Mobility Model

LIU Jian-ming LIN Dao-wei

(School of Computer Science and Information Security, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract In view of the fact that the independent network mobility model between nodes can't reflect the mobile ad hoc network features under the real application scenario, nomadic group mobility model which is applicable in the military field and vehicle network is utilized. After constructing the corresponding system model, a multi-copy relaying algorithm between groups was put forward and the upper and lower bounds of network capacity and delay based on nomadic group mobility model under relaying mode can be deduced from which the corresponding rate of compromise is obtained. The simulation of the node mobility shows that the model possesses good mobility characteristics. The function curves of the relevant parameters prove that the better performance of the network can be obtained under this kind of mobility model.

Keywords Mobile ad hoc networks, Nomadic group mobility model, Throughput, Delay, Tradeoff

移动自组网(MANET)适用于没有固定基础设施环境下的网络通信,是由一组相互协作的移动节点(Mobile Node, MN)组成的、无中心控制节点且不依赖于任何固定网络设备的特殊网络^[1]。由于移动自组网可以广泛地应用于战场通信、指挥控制、抢险救灾、传感网络、课题教育等众多领域,其战略意义非常重要。

在移动自组网的相关研究中,人们比较关注其协议性能的分析 and 算法的评价,关于网络容量、时延等性能参数的分析是目前研究的热点。在 Gupta 和 Kumar 关于无线自组网容量研究的开创性工作^[2]中,他们证明随机 Ad hoc 网络的单节点容量达到了 $\Theta(\frac{1}{\sqrt{n \log n}})$ 。之后, Grossglauser 和 Tse^[3]介绍了在独立恒等分布模型(i. i. d model)下网络的容量可提高到 $\Theta(n \log n)$ 。其他学者分别证明了在随机漫步移动模型^[4]、布朗运动模型^[5]等个体移动模型下也可获得 $\Theta(1)$ 大小的网络容量。

在网络的其他重要性能参数中,容量-时延的折中率也是

时下研究的热点, Gamal 等人^[4]研究了随机游走模型下以 $\Theta(n \log n)$ 的平均时延的代价获得 $\Theta(1)$ 的网络容量。Lin 等人^[5]得出布朗运动中相应的时延为 $\Omega(\log n / \sigma_a^2)$, σ_a^2 是布朗运动的方差参数。Neely 等^[6]证明了在独立恒等分布模型(i. i. d model)下,折中率 $\frac{\text{delay}}{\text{capacity}} \geq O(n)$ 。

在上述所有的研究工作中^[4-7], MANET 中节点的移动过程是相互独立且均匀的,无法反映出节点间的相关性。可是在现实应用场景中,诸如战场中士兵们的移动、发生自然灾害时大规模的救援行动、展览会中参会者群体的移动等情形,节点的移动不仅要求在一定的受限空间中,而且要求节点的移动之间具有相关性。

目前,已有不少学者参与到此类研究。Li^[8]将一个密度网络分割为 $n^{2\alpha}$ 个单元格,并且每个单元被均匀细分为 $n^{-2\beta}$ 个区域,节点在单元格中依据随机漫步模型的特征进行移动,从而得出了网络的移动模式 (α, β) 决定了网络的折中率的结论。Ciullo 等人^[9]研究的移动自组网中,群组内所有的节点都在

到稿日期:2016-01-26 返修日期:2016-05-22 本文受国家自然科学基金(61262074),广西可信软件重点实验室开放课题(kx201101),广西自然科学基金回国基金(2012GXNSFCA053009),广西信息科学实验中心项目,桂林电子科技大学计算机软件创新团队资助。

刘建明(1975—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络性能分析及 QoS 机制;林道炜(1990—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络性能分析, E-mail: 545703506@qq.com。

这个群组的簇状域内进行运动,而这个群组域中心在网络中的移动过程参考独立恒等分布模型进行。上述两种网络实际代表了真实网络中的两种极端情况,即群组中心的移动速度要么是0要么是 ∞ 。故他们都没有得到当群组中心的移动速度为一般值时网络各项性能参数的表现情况,没有为实际的应用场景提供有效的理论结果。同时注意到,在这两篇文献中只提及了容量的最大值和延迟的最小值,值域的数值不够准确。除此外,在设定了组内和组外传输过程节点的传输距离之后,没有精确反应出此参数是如何影响网络传输的。

故在本文中清晰地给出了相关网络参数与节点移动速度、节点传输距离的关系,得出了在相应最优传输距离的设定下获得的吞吐容量、时延的上下限范围,并据此绘制出折中率的变化曲线。最终,可以看出使用游牧团体移动模型的网络性能的表现要好于独立恒等分布模型。

1 系统模型

移动模型的使用有助于人们的研究,它们用于近似地描述网络节点在现实应用场景中的移动模式,包括位置、方向、速度及变化。选择切合实际的移动模型能够保证后续分析结果的准确性和可信性。本节首先介绍网络参数的相关定义,之后依次详述本文中所使用的网络模型、干扰模型和通信流量模型。

1.1 基本概念及定义

本节主要介绍相关参数的基本概念及定义。在 Gupta 等人^[2]的工作中,有如下定义。

可行吞吐量(Feasible Throughput):在 n 节点网络中,在一定的限制条件下(比如采取一般传输距离限制或一般传输功率限制),按照一定的调度策略和路由算法,在 $T \rightarrow \infty$ 时,网络中每个节点的发送速率和接收速率都为 $\lambda(n)$ bit,那么称该网络的可行吞吐容量为 $\lambda(n)$ bit/s。

无线自组网的吞吐容量的阶(Order of The Throughput Capacity):参照 knuth 标记法^[14],假定 $\lambda(n)$ 为无线自组网的可行吞吐量,若存在常数 $c > 0, c' < +\infty$ 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\{\lambda(n) = cf(n)\} = 1$, 同时 $\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\{\lambda(n) = c'f(n)\} < 1$, 则称该网络的吞吐容量为 $\Theta(f(n))$ 。

参考 Gupta 的工作^[2],定义时延为某数据包从源节点交付至目的节点所花费的时间。故平均时延 $D(n)$ 由平均所有数据包的交付时间得出。

1.2 网络模型

因主要对网络进行相关性分析,故设定一个由 n 个移动节点及其相关区域组成的圆环型移动自组网,它的上界与下界相连,左边界与右边界相连,这样可以很好地忽略边界效应带来的影响。同时,假定将所有 n 个节点均分成 m 的群组,则 $m = \Theta(n^\alpha), \alpha \in [0, 1]$ 。

在传输过程中,所有节点均可以充当发送者、中继者或者接受者。对于源节点-目标节点对,源节点 S 和目的节点 D 在同一群组的概率 $p_1 = \Theta(n^{-\alpha})$,由此可见,因 $0 < \alpha \leq 1$,当 n 的规模逐渐增大时, p_1 将无限接近于 0。即,源节点和目的节点在不同群组的概率将接近 1。因此,在本文研究中,忽视源节点 S 和目的节点 D 在同一群组的情形将不会对研究的结

果产生影响,故只考虑源节点 S 和目的节点 D 在不同群组的情况。

为了方便将节点间的相关性加入到研究中,假定在任意时隙一个群组的所有节点将被约束在一片固定的圆形区域内,把这片区域叫做群组域,它的半径定义为 R 。图 1 为群组 and 群组域的示意图。

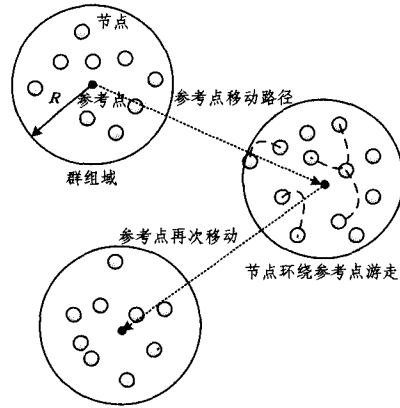


图1 游牧团体移动模型运动过程

为清晰地阐述群组域,假定在每个群组域中的节点密度为 n ,故在每个群组域中有 $\Theta(n/n^\alpha) = \Theta(n^{1-\alpha})$ 个节点,可以得到群组域的半径 $R = \Theta(\sqrt{n^{1-\alpha} * n^{-1}}) = \Theta(n^{-\alpha/2})$ 。

1.3 传输模型

对于广义的无线传感网而言,需要利用传输范围 r 构建通用的传输模型,以防止在节点同时进行传输时产生的干扰现象。在之前的相关研究中,大多采用文献^[2,5]中的通用协议模型。即假定某一时隙 t 中节点 i 试图与节点 j 通信,而节点 k 恰好同时发起传输,则干扰模型指出若要节点 i 与节点 j 间的通信不受干扰,需满足两个前提:1) 节点 i 与节点 j 的欧氏距离不大于传输半径 r ; 2) 节点 k 与节点 j 的欧氏距离不小于 $(1+\Delta)r$,其中 Δ 为保护因子。

在本文研究中,为保证两个目标节点对 $i-j$ 和 $k-l$ 的同时传输没有相互影响,必须保证:

$$\begin{aligned} d(k,j) &\geq (1+\Delta)d(i,j) \\ d(i,l) &\geq (1+\Delta)d(k,l) \\ d(l,j) &\geq d(i,l) - d(i,j) \\ d(j,l) &\geq d(k,j) - d(k,l) \end{aligned}$$

由上述 4 个式子可得:

$$d(j,l) \geq \frac{\Delta}{2}(d(i,j) + d(k,l))$$

该表达式表示对于所有的同步传输过程,在协议干扰模型的要求下,每个接收节点附近 $\frac{\Delta}{2}$ 倍传输距离的区域都必须相互分割开。

1.4 通信模型

在这里采用单播通信方式,使用文献^[10]中的通信流量模型: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,故任意时刻对于一个节点,网络中最多共有 n 个不同的流。

本文选用一种基于时隙且快速移动的网络场景^[9],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一个单元格中。在这种场景中,时隙的长度被定义为节点相遇过程中传送单个数据包的时间消耗,不包含节点的移动时间和生成数据包的时间。并且,设定在单个时隙中用一个数字信道完成 W 个比特字节的传输。

2 游牧团体移动模型及其中继算法

2.1 游牧团体移动模型

目前,国内外学者对移动模型的研究,主要按照其节点移动方式的不同进行分类^[7,11],个体移动模型研究独立节点的移动状态,节点的移动不影响其他节点的移动状态,主要包括随机漫步移动模型、随机方向移动模型等。但是,这种类型的模型不能很好地模拟出真实的场景,因而受到一定的限制。相对于个体移动模型而言,群组移动模型将群组内部节点之间的影响加入研究,着重于研究节点间的空间相关性,具有较为实际的应用前景。

游牧团体移动模型(Nomadic Community Mobility Model, NCMM)就是一种群组移动模型^[7,11],主要描述节点像古代游牧民族那样进行狩猎时的移动过程,群组内部的各个节点都围绕一个参考点进行相应移动,这一参考点就像行军或狩猎时的指挥官,它的移动决定了整个群组的移动趋势。群组内其他节点围绕参考点在一定的范围内运动,这就与现实场景中军队作战以及多用户车载网的运动非常类似,具备很好的应用前景。

游牧团体移动模型^[11-12]的运动过程:每个群组有一个参考点,群组内的其他节点围绕着它进行无明确方向的游走,当参考点发生位移时,群组中的所有移动节点随着它运动到一个新的位置,然后再围绕着新的参考点进行游走。参考点的移动方式主要依据个体移动模型进行。图1给出了游牧团体移动模型的运动过程。

如图1所示,与柱状移动模型的单个参考点不同,游牧团体移动模型的群组内节点共享一个参考点,这就使得节点在群组中的运动受到更少的限制。比如,类似柱状移动模型的群组在完成一次整体移动之后,只允许群组内部节点围绕参考点运动5秒左右的时间,参考点就将再一次改变方向和速度来引导群组进行下一次的整体现运动。而游牧团体移动模型可以运行60秒左右的时间,给群组内节点更少的限制的同时也体现了该模型更现实的应用前景。不仅如此,游牧团体移动模型的群组内节点的移动方式主要依据随机漫步移动模型进行,在下文的仿真中证明了在足够长的移动步数之后,参考此种方式运行的节点将保持其开始状态的分布特征,这种特点将更好地保持群组内网络的网络拓扑,提供更好的数据服务。

结合上述多种特点,游牧团体移动模型具备现实意义上的可操作性,应用前景广泛。

2.2 多副本中继算法

2011年,Liu等^[13]为了方便操控延迟,设计了支持冗余包传输的多副本两跳中继算法,并在此基础上充分讨论了节点的平均服务时间,推导出了基于独立恒等分布移动模型(i.i.d model)的网络容量与端到端延迟的封闭形式上限。在这

类算法的调度方案中,一般规定从源节点 S 发出的每个包在到达目的节点 D 之前最多经历两跳传输,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 算法。但是,在我们的研究中,因为群组移动模型中有着更复杂的移动状态,特别是当群组进行移动时,仅仅通过节点间的两跳中继可能无法成功交付数据包,故在本文中设计一种群组间的两跳中继方案,即将节点间两跳中继的概念置换到群组上,定义源群组、中继群组、目的群组的概念。最多通过“源群组-中继群组”和“中继群组-目的群组”两跳完成数据包的传输。但在实际的模拟过程中,一个数据包的交付过程可能经由群组间多个节点的多跳传输完成。具体过程将在下文详述。

如图2所示,基于时分复用的调度方案^[4],将移动自组网分割成以 α 为边长的方形单元格,并且设定单元格中的节点可以与相同单元格或8个毗邻单元格中的节点传输数据,因而可以得到节点的传输半径 $r = \sqrt{8}\alpha$ 。图中深色阴影的单元格为当前活动的单元格,可以在不被干扰的情况下同时传输数据。

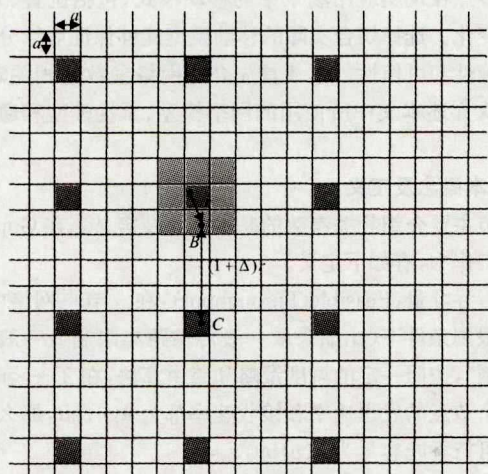


图2 基于时分复用的单元格划分方案

如图2所示,深色直线划分的每个 5×5 的方块即为一个群组。在群组 G 中,用 C_G 标记群组 G 的群组域全部覆盖或者部分覆盖的所有单元格的集合。进一步,它包括边界单元格和内部单元格两类。边界单元格 C_B 就是在群组域的边界且可以与其他单元格传输的单元格。同理,内部单元格 C_I 就是在群组域的内部且只可以与属于相同群组的其他单元格进行通信的单元格。

下面先给出群组间多跳中继算法的调度方案。

在某时隙,若发送节点 i 位于群组 $G(i)$ 中一个活动单元格 C 内,则:

情形1 若单元格 C 是一个内部单元格 C_I ,存在与节点 i 属于相同群组的接收节点 j (即 $G(i) = G(j)$) 且节点 j 在节点 i 的单跳传输范围之内,则接收节点 j 以等概率执行下述两种事件中的一种:1)发送节点 i 将数据包发送给接收节点 j ,节点 j 将作为中继节点将此包继续发送给另一个群组中的节点。2)若接收节点 j 正好是数据包的目的节点,则节点 i 将此包发送给节点 j 。若无此包,则节点 i 在这个时隙保持闲置。

情形2 若单元格 C 是一个边界单元格,存在与节点 i 属于不同群组的接收节点 j (即 $G(i) \neq G(j)$) 且节点 j 在节点 i 的单跳传输范围之内,则接收节点 j 以等概率执行下述两种事件中的一种:1)发送节点 i 作为中继节点将数据包发送给接收节点 j 。2)若接收节点 j 正好是数据包的目的节点,则节点 i 将此包发送给节点 j 。若无此包,则节点 i 在这个时隙保持闲置。

图3所示为上述群组间多跳中继算法的传输过程,演示了从源群组中的源节点发送出的数据包 P 经由多个中继群组到达目的群组中的目的节点的全过程。

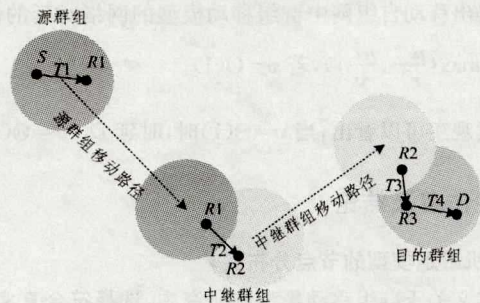


图3 多跳中继算法的传输过程

为方便研究,将本文中用到的参数汇总于表1。

表1 相关参数定义

参数	定义
W	在固定时间间隔中节点向外发送的字节数
$h(b)$	传送 b bit 数据所需的跳数
L	端到端传输时单字节传输移动的平均距离
$L(b, h)$	在传送 b bit 数据的 h 跳时节点移动的距离
P_I	内部单元格中节点向同群组节点发送数据的概率
P_B	边界单元格中节点向其他群组节点发送数据的概率

3 网络性能研究

因游牧团体群组模型的移动特性,将其分成两个阶段,即用参考点的速度来划分,参考点的速度 $v > 0$ 代表群组进行整体移动的阶段,同理, $v = 0$ 则代表群组暂停移动,且群组内节点围绕参考点进行随机漫步的阶段。而在群组研究层面,后者可以看作是前者的特殊阶段。

3.1 网络容量

首先进行网络吞吐容量的研究。参照 Gupta 和 Kumar 的研究方法,在研究网络容量方面,分别求得单节点吞吐量的上界和下界,继而得出群组下多跳中继算法中网络的吞吐量区间和吞吐容量大小。

在足够长的时间长度 $[0, T]$ 内,端到端可以进行传输的数据比特总数为 $n\lambda(n)T$,而由表1中关于 $h(b)$, $l(b, h)$ 和 L 的定义可得:

$$\sum_{b=1}^{n\lambda(n)T} \sum_{h=1}^{h(b)} l(b, h) = n\lambda(n)T * L \quad (1)$$

定义 c_1 为从源节点至目的节点传输的每个数据比特至少需历经的跳数,故由式(1)有:

$$\sum_{b=1}^{n\lambda(n)T} \sum_{h=1}^{h(b)} l(b, h) \geq n\lambda(n)T * c_1 r \quad (2)$$

而对于每个接收节点,它相关圆形区域必须至少有 $1/4$ 位于网络中,因此可得:

$$\sum_{b=1}^{n\lambda(n)T} \sum_{h=1}^{h(b)} \frac{\pi}{4} \left(\frac{\Delta l(b, h)}{2} \right)^2 \leq W * T \quad (3)$$

结合 Cauchy-Schwarz 不等式,由式(3)可以推导出:

$$\left(\sum_{b=1}^{n\lambda(n)T} \sum_{h=1}^{h(b)} l(b, h) \right)^2 \leq \frac{8nW^2 T^2}{\pi \Delta^2} \quad (4)$$

结合式(2)和式(4),可得单节点吞吐量 $\lambda(n)$ 的上界为:

$$\lambda(n) \leq \sqrt{\frac{8W^2}{n\pi \Delta^2 c_1^2 r^2}} = O\left(\frac{n^{-\frac{1}{2}}}{r}\right) \quad (5)$$

下面研究单节点吞吐量 $\lambda(n)$ 的下界。根据群组多跳中继算法,可以看出从源节点发出的数据包将经过至多4跳传输至目的节点,结合边界单元格和内部单元格的相关定义得到:

$$\frac{W}{c_1} * \left(\sum_{|C_I|} P_I + \sum_{|C_B|} P_B \right) \leq 4n * \lambda(n) \quad (6)$$

式(6)左侧表示单时隙中网络可以传输的数据总数,右侧表示获得路由方案中单节点吞吐量至少需要传输的数据总数。

根据独立恒等分布模型(i. i. d model)的特点,网络中所有群组中心将保持均质稳态分布。节点在群组中的分布是基于随机漫步移动模型的特性,在第4节的仿真实验中证明了节点在群组中的分布也服从均质稳态分布。所以,在任意时间内有:

$$|C_I| + |C_B| = \Theta\left(\frac{1}{\alpha^2}\right) \quad (7)$$

结合式(6)和式(7)得到:

$$\lambda(n) \geq \frac{c_2 W}{4n} = \Omega\left(\frac{n^{-1}}{r^2}\right) \quad (8)$$

结合式(6)和式(8),得出移动自组网中群组移动模型的网络容量的值域:

$$\lambda(n) = \begin{cases} O\left(\frac{n^{-\frac{1}{2}}}{r}\right) \\ \Omega\left(\frac{n^{-1}}{r^2}\right) \end{cases}$$

其中, $r = O(n^{-\frac{\alpha}{2}})$, $\alpha \in [0, 1]$ 且 $r \leq \Omega\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)$

由上式可以看出,当 $r = \Omega\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)$ 时,单节点的吞吐量 $\lambda(n) = \Theta(1)$ 。这一结论与独立恒等分布模型^[3-5]所得出的吞吐容量一致,验证了本文结果的正确性。

3.2 网络时延

根据网络时延的定义,即时延是指一个报文或分组从一个网络的一端传送到另一端所需要的时间。在我们的研究中,将数据包从源节点传送到目的节点的全过程分成不同的阶段,分别求得这些阶段的网络时延后得到总时延。

在图3中,可以看出一个数据包从源节点经由4跳发送至目的节点。使用下述符号标记:

T_1 :在源群组中,数据包从源节点发送至中继节点所花费的时间。

T_2 :数据包从源群组中继节点发送至中继群组中的中继节点所花费的时间。

T_3 :数据包从中继群组中的中继节点发送至目的群组中的中继节点所花费的时间。

T_4 :在目的群组中,数据包从中继节点发送至目的节点所花费的时间。

用 $E\{T_n\}$ 表示第 n 个传输阶段的期望时延的均值。故端到端的平均时延 $D(n)$ 的表达式应为:

$$D(n) = \sum_{i=1}^n E\{T_i\} = E\{T_1\} + E\{T_2\} + E\{T_3\} + E\{T_4\} \quad (9)$$

下面分别求得 $E\{T_n\}$ 。首先, T_1 阶段的过程可以看作群组内部节点直接的传输过程,与群组的整体移动速度 v 无关,所以只需讨论群组内部节点的移动特性。因群组内节点的移动方式服从随机游走移动模型,而在 Gamel 的工作^[4-5]中已经证明了在该模型中源节点向某固定节点发送数据包的时延是常量 $\Theta(1)$,故:

$$E\{T_1\} = \Theta(1)$$

下面求 $E\{T_2\}$,即从位于源群组的边界单元格的中继节点 R_1 发送至它传输范围内的另一个位于中继群组边界单元格中的中继节点 R_2 的时延。按照时延的定义:

$$E\{T_2\} = (\text{节点位于边界单元格的概率} * \text{节点向外发送数据的概率})^{-1}$$

由网络的分布特性可知,节点位于边界单元格中的概率为 $\Theta(\frac{\alpha}{R})$ 。

下面讨论节点向外发送一个数据包的概率。按照所提的中继路由算法,由于节点等概率地执行传输任务,此概率应该等于数据包位于边界单元格的概率 P_B 的一半。根据独立恒等分布模型(i. i. d model),Neely 的工作证明了 $P_B = P_I = 1 - e^{-d}$ 。故:

$$E\{T_2\} = \Theta(\frac{1}{P_B * \frac{\alpha}{R}}) = \Theta(\frac{2R}{\alpha P_B}) = \Theta(\frac{R}{\alpha})$$

接下来讨论 T_3 ,即位于中继群组 R_2 边界单元格的中继节点向位于目的群组的中继节点发送数据包。 T_3 并不能像 T_2 那样保证接受数据包的节点在发送节点的传输范围内,因为 T_2 中的发送节点和接受节点位于两个相邻的边界单元格中,而 T_3 的接收节点并不一定在目的群组的边界单元格中,而是在目的群组的群组域的任意位置。

为满足 T_3 的发送条件,如图 4 所示,中继群组和目的群组中心的距离 d 应满足 $d \leq 2R + r$,即当两个节点的距离小于 d 时,它们可以在进行一定速度的运动后达成握手,继而完成数据包的发送过程。结合群组运动的速度 v ,得出相遇概率 $P_{meet} = \frac{\pi}{dv}$ 。故 $E\{T_3\} = \Theta(\frac{\pi}{dv}) = \Theta(\frac{1}{Rv})$ 。

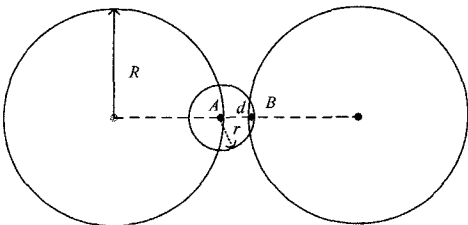


图 4 保证数据传输的两群组中心距离

最后讨论 T_4 阶段。 T_4 阶段就是位于目的群组内的中继节点 R_3 向目的节点发送数据的过程,故这个阶段的运动过

程在目的群组的群组域内。如图 4 所示,在目的群组的群组域中,任意节点的密度为 $\frac{1}{R^2}$,而相遇概率和密度成反比,所以得到:

$$E\{T_4\} = \Theta(\frac{R^2}{r^2})$$

综上所述:

$$D(n) = \Theta(1) + \Theta(\frac{R}{\alpha}) + \Theta(\frac{1}{Rv}) + \Theta(\frac{R^2}{r^2}) \\ = \Theta(\max\{\frac{n^{-\alpha}}{r^2}, \frac{n^{\frac{\alpha}{2}}}{v}\}) \quad (10)$$

故得出移动自组网中群组移动模型的网络时延的值域:

$$D(n) = (\max\{\frac{n^{-\alpha}}{r^2}, \frac{n^{\frac{\alpha}{2}}}{v}\}), \text{若 } v = O(1)。$$

继续观察可以看出,当 $v = \Theta(1)$ 时,时延 $D(n) = \Theta(\frac{1}{r^2})$ 。

4 相关仿真及结论

4.1 随机游走模型的节点分布实验

在本文关于群组移动模型的研究中,选择符合真实应用场景、可行性较大的移动模型是首要问题。依据不同的移动模型,规划节点的移动轨迹,仿真模拟出其移动特性,通过仿真的结果可以获得不同移动模型的节点分布特性。

在仿真实验中,随机游走模型工作在有边界区域时,由于边界效应的存在,节点趋于均匀分布。这种移动特性刚好符合本文对移动模型的要求。在足够长的步数之后,群组内的节点均匀地分布在群组域中,保证了数据传输的稳定性。

在本次实验中,选用 MATLAB 仿真软件。如图 5(a)所示,在初始时刻固定的区域内均匀分布着若干网络节点。仿真开始后,节点按照有边界区域的随机游走规则以固定步长进行移动,实验记录了每段移动轨迹。图 5(b)给出了 1000 步之后的节点位置,综合分析可知这些移动节点在不同时刻均匀分布于该区域之中。刘宴涛等人^[16]也用数学的方式证明了这个结论。

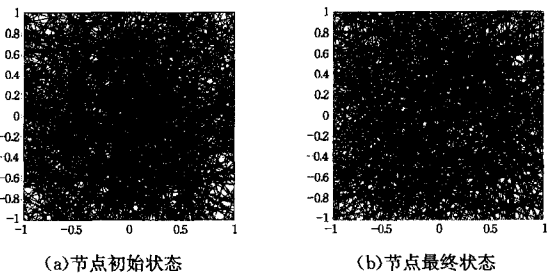


图 5

基于此类特性,进一步应用此类移动模型的无线自组网研究,在进行协议开发与评估以及网络连通性、覆盖性、网络容量和时延分析等方面时就更加简单。所以选择相应的群组移动模型——游牧团体移动模型。

4.2 网络性能的讨论

在分别求得网络容量和平均时延后,依据折中率的定义: $\text{tradeoff} = D(n)/\lambda(n)$,可以得到游牧团体移动模型网络的折中率,由于网络的吞吐量和时延将随着群组移动速度 v 和

节点传输半径 r 的值进行相应变化,因此绘制此类网络参数的函数曲线图不失为研究它的好方法。

在本文定义的网络中,为保有一般性,定义群组移动速度 v 和节点传输半径为相同数量级,即 $v = \Theta(r)$ 。根据前文中得出的有关结论,绘制出了表示网络吞吐量域、时延区域和折中率的函数图。

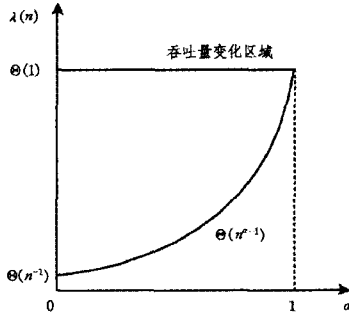


图6 网络吞吐量变化区域

从图6不难看出,随着节点传输半径 r 从 $\Omega(n^{-\frac{1}{2}})$ 变化至 $\Omega(n^{-\frac{\alpha}{2}})$, $\alpha \in [0, 1]$ 。网络的吞吐量区域也从上界 $\Theta(1)$ 变化至下界 $\Theta(n^{-\alpha})$ 。仔细观察可以发现:当设定 $r = \Theta(n^{-\frac{1}{2}})$ 时,可以获得单节点的吞吐量 $\lambda(n) = \Theta(1)$ 。

图7所示为网络的平均时延的变化区域。从图中可以看出,网络平均时延的上界在 $\alpha \in [0, \frac{1}{3}]$ 的区间内以 $\Theta(n^{1-\alpha})$ 的比例变化;而在 $\alpha \in [\frac{1}{3}, 1]$ 的区间内,网络平均时延的上界以 $\Theta(n^{\frac{\alpha+1}{2}})$ 的比例变化。同时可以看出:网络时延的下界在整个区域内以 $\Theta(n^{\alpha})$ 的比例增长,与吞吐量的结论相比,在移动场景下,平均时延也有了 $\Theta(n^{\frac{\alpha}{2}})$ 倍的增长。结合上文可以看出:“网络的吞吐量的变化比例应与网络时延的变化比例一致”这一条结论不仅仅适用于独立恒等分布模型^[6],在本文研究的游牧团体移动模型的移动自组网中同样适用。

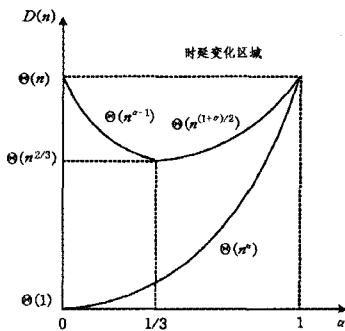


图7 网络时延的变化区域

图8所示为网络折中率的变化区间。可以看出当 $\alpha \in [0, \frac{1}{3}]$ 时,网络折中率的区间为 $\Theta(n^{1-\alpha})$ 和 $\Theta(n)$ 。当 $\alpha \in [\frac{1}{3}, 1]$ 时,网络折中率的区间为 $\Theta(n^{\frac{\alpha+1}{2}})$ 和 $\Theta(n)$ 。从这些参数值可以看出,使用游牧团体移动模型时,此类的相关性模型的网络折中率的性能表现要好于独立恒等分布模型的折中率 $\frac{\text{delay}}{\text{capacity}} \geq \Theta(n)$ 。

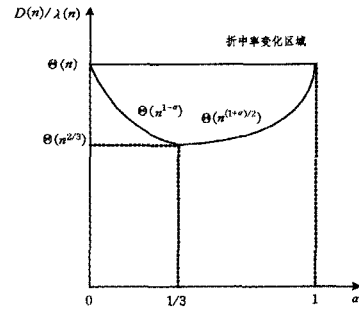


图8 网络折中率的变化区间

结束语 对于研究的游牧团体移动模型,首先构造相应的系统模型,接着提出一种群组间多副本中继算法以保证节点的传输,最终得出该中继模式下基于游牧团体移动模型的移动自组网的参数的值域,结果证明了在这种网络模型下可以获得更好的网络性能。对群组内节点移动方式的仿真也证明了该模型具有更好的应用前景。下一步可以在节点能量的控制、数据包传输率等方面进行更深入的研究。

参考文献

- [1] CHLAMTAC I, CONTI M, LIU J N. Mobile ad hoc networking: imperatives and challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2003, 1(3): 13-64.
- [2] GUPTA P, KUMAR P R. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404.
- [3] GROSSGLASUER M, TSE D N C. Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(4): 477-486.
- [4] GAMAL A E, MAMMEN J, PRABHAKAR B, et al. Optimal Throughput-Delay Scaling in Wireless Networks—Part II: Constant-Size Packets[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(11): 5111-5116.
- [5] GAMAL A E, MAMMEN J, PRABHAKAR B, et al. Throughput-delay trade-off in energy constrained wireless networks[C]// International Symposium on Information Theory, 2004 (ISIT 2004). IEEE, 2004: 439.
- [6] NEELY M J, MODIANO E. Capacity and delay tradeoffs for ad hoc mobile networks[C]// First International Conference on Broadband Networks, 2004. IEEE, 2004: 3687-3687.
- [7] CAMP T, BOLENG J, DAVIES V. A survey of mobility models for ad hoc network research[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2002, 2(5): 483-502.
- [8] LI P, FANG Y, LI J, et al. Smooth Trade-Offs between Throughput and Delay in Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(3): 427-438.
- [9] CIULLO D, MARTINA V, GARETTO M, et al. Impact of Correlated Mobility on Delay-Throughput Performance in Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 19(6): 1745-1758.
- [10] GARETTO M, GIACCONE P, LEONARDI E. Capacity scaling in ad hoc networks with heterogeneous mobile nodes: the supercritical regime[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(5): 1522-1535.
- [11] SÁNCHEZ M. Mobility models[OL]. <http://www.disca.upv>.

es/misan/mobmodel.html.

- [12] SÁNCHEZ M, MANZONI P, ANEJOS, a Java based simulator for ad hoc networks[J]. Future Generation Computer Systems, 2001, 17(5): 573-583.
- [13] LIU J, JIANG X, NISHIYAMA H, et al. Delay and Capacity in Ad Hoc Mobile Networks with f-cast Relay Algorithms[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8): 2738-2751.
- [14] KNUTH D E. Big Omicron and big Omega and big Theta[J].

Acm Sigact News, 1976, 8(2): 18-24.

- [15] NEELY M J, MODIANO E. Capacity and delay tradeoffs for ad-hoc mobile networks[C] // First International Conference on Broadband Networks, 2004. IEEE, 2004: 3687-3687.
- [16] LIU Y T, AN J P. Asymptotic node distribution of self-organizing Network random walk model[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 35(5): 573-577. (in Chinese)
刘宴涛, 安建平. 自组织网络随机游走模型的渐近节点分布[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(5): 573-577.

(上接第 128 页)

成空洞修复, 节能、高效地提高了网络覆盖率, 修补效果较好, 有效延长了网络生存期。

文中只验证了二维平面覆盖环境下 FSHP 算法的性能, 下一步将本算法进行进一步拓展, 使其适合于三维水下无线传感器网络。

参 考 文 献

- [1] WANG L, GUO Y, ZHAN Y. Security topology control method for wireless sensor networks with node-failure tolerance based on self-regeneration[J]. Eurasip Journal of Wireless Communications and Networking, 2010(1): 1-11.
- [2] LIU M, CAO J N, ZHENG Y, et al. Analysis for multi-coverage problem in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2007, 18(1): 127-136. (in Chinese)
刘明, 曹建农, 郑源, 等. 无线传感器网络多重覆盖问题分析[J]. 软件学报, 2007, 18(1): 127-136.
- [3] BEJERANP Y. Simple and efficient k-coverage verification without location information [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications, Phoenix, 2008: 291-295.
- [4] KUMAR S, LAI T H, BALOGH J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network[C] // Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Philadelphia, PA, USA, 2004: 144-158.
- [5] NITIN K, DIMITRIOS G. Sensor network coverage restoration [J]. CITESEER, 2008, 10(12): 21-24.
- [6] LI X, DAVID H. Distributed coordinate-free hole recovery [C] // Proc. of GLOBECOM, Beijing, 2006: 189-194.
- [7] XU P F, CHEN Z G. Distributed voronoi coverage algorithm in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(8): 25-34. (in Chinese)
徐鹏飞, 陈志刚. 无线传感器网络中的分布式 Voronoi 覆盖控制算法[J]. 通信学报, 2010, 31(8): 25-34.
- [8] WANG G, CAO G, PORTA T. Movement-assisted sensor deployment[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2006, 5(6): 640-652.
- [9] YANG K, LIU Q, ZHANG S K, et al. Holerecovery algorithm based on mobile inner nodes in wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2012, 33(9): 116-117. (in Chinese)
杨凯, 刘全, 张书奎, 等. 利用移动内点来修复传感器网络空洞的算法[J]. 通信学报, 2012, 33(9): 116-117.
- [10] WANG G, CAO G, BERMAN P, et al. Bidding protocols for deploying mobile sensors [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(5): 563-576.
- [11] WANG L M, LI F, QIN Y. Resilient method for recovering coverage holes of wireless sensor networks by using mobile nodes [J]. Journal on Communications, 2011, 32(4): 1-8. (in Chinese)
王良民, 李菲, 秦颖. 基于移动节点的无线传感器网络覆盖洞修复方法[J]. 通信学报, 2011, 32(4): 1-8.
- [12] SU H, WANG Y. A self-healing algorithm without location in sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(10): 1957-1970. (in Chinese)
苏瀚, 汪芸. 传感器网络中无需地理信息的空洞填补算法[J]. 计算机学报, 2009, 32(10): 1957-1970.
- [13] JIANG D. Research on the discovery and restoration of blind spots in wireless sensor networks[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese)
蒋丹. 无线传感器网络覆盖盲区的发现与修复方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [14] YAN F, MARTINS P, DECREUSEFOND L. Accuracy of homology based coverage hole detection for wireless sensor networks on sphere [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(7): 3583-3595.
- [15] DAI G Y, CHEN L Y, ZHOU B B, et al. Coverage hole detection algorithm based on Voronoi diagram in wireless sensor work [J]. Journal of Computer Application, 2015, 35(3): 620-623. (in Chinese)
戴国勇, 陈麓屹, 周斌彬, 等. 基于 Voronoi 图的无线传感器网络覆盖空洞检测算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(3): 620-623.
- [16] WANG R, LIU G Z. Wireless sensor network deployment based on fish-swarm optimization algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(2): 8-11. (in Chinese)
王蕊, 刘国枝. 基于鱼群优化算法的无线传感网络部署[J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 8-11.
- [17] ZOU Y, CHAKRABARTY K. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks [J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2004, 3(1): 61-91.
- [18] HONG H H. Research on solving method of coverage area in wireless sensor networks [D]. Haibin: Haibin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
洪浩瀚. 无线传感器网络覆盖面积求解方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [19] LI X L, SHAO Z J, QIAN J X. An optimizing method based on autonomous animates; fish-swarm algorithm [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2002(11): 32-38. (in Chinese)
李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2002(11): 32-38.
- [20] 江铭炎, 袁东风. 人工鱼群算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.