

基于多目标优化的固定中继节点唤醒策略

马学彬, 李爱丽, 张晓娟

(内蒙古大学计算机学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘 要: 针对城市中人们移动规律的“潮汐效应”以及机会网络中固定中继节点运行时能耗较高的问题, 提出基于固定中继节点消息转发能力和能量消耗的多目标固定中继节点唤醒策略。该策略将能量有效性作为固定中继节点唤醒的指标并利用网络收益—能量消耗模型来解决能量消耗和转发能力之间的矛盾。固定中继节点唤醒选择问题是一个 NP 难问题, 提出采用遗传算法选择合适的中继节点进入唤醒状态, 在此过程中改进了选择算子使算法更快地收敛于解空间。仿真结果表明, 该唤醒策略能够在保证消息传输性能的同时提高每个固定中继节点单位能耗的平均转发效率。

关键词: 机会网络; 潮汐效应; 遗传算法; 多目标优化; 能量有效性

中图分类号: TP302

文献标识码: A

Wakeup strategy based on multi-objective optimization for fixed relay nodes

MA Xue-bin, LI Ai-li, ZHANG Xiao-juan

(College Department of Computer Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: In order to deal with the “tidal effect” when people move in the city and solve the problem of high energy consumption of fixed relay nodes in opportunistic networks, a wakeup strategy of multi-objective optimization was proposed, which made use of the message forward ability and energy consumption of fixed relay nodes. This strategy used energy efficiency as the indicator to make the nodes awake, and deployed a network revenue-energy consumption model to resolve the contradiction between energy consumption and message forward ability. As the selection problem of awake relay nodes was a NP-hard problem, genetic algorithm was used to select proper fixed relay nodes to keep awake. In this process, selection operator was improved to make the algorithm converge to solution space quickly. Experiments show that the proposed wakeup strategy can guarantee the successful rate of message transmission and improve the average message forwarding capabilities of fixed relay nodes by consuming a unit energy.

Key words: opportunistic network, tidal effect, GA algorithm, multi-objective optimization, energy efficiency

1 引言

机会网络 (opportunistic network)^[1]作为延迟容忍网络的一个至关重要的分支, 受到了研究学者的广泛关注。在机会网络中, 移动设备通常受到通信距离、活动范围、设备电量、存储能力、节点间接触频率、节点移动规律未知等诸多因素的限制。针对机会网络的拓扑结构变化无规律的特点, 机会

网络通常使用“存储—携带—转发”^[2]的方式完成消息的传递。然而, 在很多的应用场景中, 节点稀疏导致节点间的接触频率较少, 造成消息交付率低、传递延迟高的问题。为了满足网络性能的要求, 研究者将基础设施引入到机会网络中, 称之为“基础设施辅助的机会网络”^[3]。基础设施引入的目的是增加网络中节点的接触频率。

对于基础设施辅助的机会网络, 根据基础设施

收稿日期: 2016-12-12; 修回日期: 2017-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.121142); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (No.2014MS0605)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.121142), The Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region of China (No.2014MS0605)

的移动性可以将机会网络分为固定基础设施辅助的机会网络和移动基础设施辅助的机会网络。固定基础设施的优点是体积小、采用电池供电、价格低廉、拥有无线网络接口、通信范围大以及大量的存储空间；缺点是能量受限、引入基础设施需要花费代价^[4]。因此，在大范围的环境中放置大量的固定基础设施将会遇到能量消耗大的问题。移动基础设施的优点是扩大基础设施移动范围、避免网络分割现象的出现、保证消息时效和节约移动节点的能量；缺点是路径规划困难、移动基础设施传输距离短、存储空间有限、运行周期和规律无法确定^[5,6]。因此，在大范围的网络环境中，研究者通常使用固定基础设施辅助的机会网络作为网络模型，并针对移动节点的运动规律设计合适的唤醒策略以减少能量的消耗。例如，在大城市中大多数上班族在工作时间去市中心工作，这时留在生活区的人数较少；在工作时间之外，市中心的人数较少而生活区的人数较多，这种现象被称为“潮汐效应”。在机会网络部署过程中，可以通过减少唤醒的固定中继节点在人数较少区域的数量及增加其在人数较多区域的数量达到节能的目的，而且还可以提高消息传输的成功率。

本文的研究内容是在大范围的机会网络中选择唤醒的固定中继节点的策略，使网络的传输效益最大化和网络能量消耗最小化。基于此目标，本文提出了基于能量消耗的多目标优化模型，该模型结合了固定中继节点能量消耗指标和固定中继节点转发能力指标，它不仅考虑了节点传输能力最大化和节点能量消耗最小化，即最值指标，而且考虑了消耗 1 单位能量时固定中继节点转发消息的能力，即效率指标。相对于最值指标，效率指标更适合作为性能指标。在固定中继节点数量较多的环境下，选择哪些节点保持唤醒状态是一个 NP 难问题，本文使用遗传算法在候选集合上实现满足多目标优化要求的固定中继节点唤醒策略，并对选择算子进行了改进以加快运行效率。最后，本文详细介绍遗传算法的实现细节，选取符合多目标优化的个体作为最终唤醒的固定中继节点。

2 相关工作

对于资源受限的机会网络而言，固定基础设施的数量、位置及其状态（唤醒或休眠）成为影响网络性能的关键因素。在固定基础设施辅助的机会网

络中，研究者通常选择抛掷盒（throwbox）^[7]作为固定基础设施，本文称其为固定中继节点。文献[7]证明，既允许固定中继节点和移动节点进行通信，又允许移动节点间进行通信的工作方式能改善网络性能。本文研究的关键问题是唤醒的固定中继节点的选择问题。

唤醒的固定中继节点选择问题定义为：给定一组固定中继节点的位置坐标以及固定中继节点的数目，找到一组唤醒的固定中继节点的集合使网络的性能最大化。文献[7]通过选择固定中继节点达到最大化网络吞吐量的目的，使用贪心算法将固定中继节点放置在某一备选位置后，计算此时的网络流量，如果网络流量满足最大化要求，就将该位置加入满足条件的位置序列中并将该位置标记为“1”，迭代这一过程，直到选取 m 个位置，此时计算网络的总体流量。经过这一过程，选出满足性能要求的 m 个位置。该策略的缺点是虽然选出了满足条件的位置，但是对于大范围的机会网络而言， m 的确定是个极其困难的问题，在现实中很难求得。

在机会网络中，基于移动设备的携带者具有较强社会属性的特点，文献[8]提出了 5 种基于社会属性的固定中继节点部署策略，分别是最流行位置部署方案、最重要位置部署方案、重要用户最流行位置部署方案、核心用户最核心位置部署方案以及关键用户最核心位置部署方案。这些方法选用的社会属性包括用户的度中心度、用户的介数中心度、位置的度中心度和位置的介数中心度。相对于之前部署策略仅仅考虑平均网络性能的缺点，该类方法考虑移动节点的社会属性并将其应用于网络性能优化。由于网络拓扑结构是时刻变化的，并且用户所获取的接触信息也并非是全球信息，因此，该类方法在机会网络中的应用受到了限制。

在文献[9]中，研究者将固定中继节点部署在无线传感器网络中。然而，机会网络不同于无线传感器网络。基于机会网络中节点时变的特点，文献[10]提出了基于时变 DTN 的固定中继节点部署策略。该策略将 DTN 形式化为有权时空图，研究者根据历史轨迹在预测到的网络拓扑结构上加入一定数量的固定中继节点使网络的可靠性达到最大化。然而，对于时变 DTN 而言，时隙的确定是一个难点，因此，基于时变 DTN 的固定中继节点部署策略有待进一步研究。

为了实现低延迟、高递送率的目标，文献[11]

提出了均匀摆放策略、中继剪枝策略、基于概率的中继分布策略和基于遗传算法的优化策略。均匀摆放策略中的优点是可操作性强，缺点是开销巨大。中继剪枝策略以一个确定的概率阈值删除不活跃的固定中继节点，直到剩下满足网络中所要求数量的固定中继节点。该方法虽然降低了网络开销，但剩余的固定中继节点的位置并未发生改变，也并未考虑中继节点转发消息的能力。基于概率的中继分布策略根据节点密度对固定中继节点的进行重定位，固定中继节点偏向于消息密集、节点活动频繁的地区。基于遗传算法的优化策略能够最小化平均延迟与消息递送率的比值，与之前的 3 种算法相比，该部署策略具有更好的通用性。

文献[12]中提出一种基于树形拓扑的水下传感器网络节点唤醒休眠算法 UWSP，该算法克服了水下网络通信能力弱的特点，通过降低节点唤醒频率，从而延长节点的休眠时间。文献[13]中提出了一种基于机会网络节点间弱连通性的节点唤醒调度策略 ONWPM，该策略以节点的带宽为网络性能的下界，对唤醒机制中的关键参数进行分析研究，并对节点的休眠周期长度和唤醒周期次数进行动态调整，使数据发送率与节点消耗能量之间有较好的平衡。文献[14]在文献[13]的基础上提出了一种机会网络蓝牙设备的唤醒调度策略 BWM，该策略不仅能降低蓝牙设备的能耗，同时还能保证有效传输数据。它是通过分析蓝牙设备电池能耗的问题，建立与蓝牙能耗相关的数据传输模型，并研究唤醒调度机制中关键参数及其关系，从而控制唤醒周期间隔的长度。文献[15]引入模糊控制算法，使节点根据自身的能量变化及其变化的速度来调整节点的唤醒与休眠，从而延长整个网络的运行时间。文献[16]提出通过适当地切换无线射频频率运行模式不仅可以有效地节省节点能量而且可以延长节点的生命周期。文献[17~19]是在文献[16]研究的基础上的改进与拓展，如在一些不适用的场景内采用禁止无线射频 (disable-radio) 进入休眠模式的技术，或根据不同应用场景采用不同优先级调度模式等。

上述固定中继节点部署策略均是针对某一目标最大化 (最小化)，然而在现实的生活中，唤醒的固定中继节点的数量和位置的选择需要考虑建设开销、覆盖范围等多个目标，并且网络中所需唤醒的固定中继节点的数量预先是无法知晓的。因此，本文提出满足多目标要求，并且可以确定唤醒

的固定中继节点位置和数量的部署策略。类似于证券市场中的价格与收益，该策略同时考虑固定中继节点的效益和能量消耗这 2 个因素，构建效益—能量消耗模型。从经济角度考虑，固定中继节点的效益—能量消耗的比值越大，表明消耗 1 单位的能量能够获得的网络经济效益越高。此外，针对贪心算法需要在算法初始时给出选址数量的缺点，该策略采用遗传算法在给定候选地址集合和目标函数的基础上能同时确定固定中继节点的数量和位置。

3 模型设计

3.1 固定中继节点

本文采用的固定中继节点的通信方式分为上传和下载。在上传过程中，移动节点将自己拥有的消息复制给固定节点；在下载过程中，固定节点将自己拥有的消息复制给移动节点。当移动节点未遇到任何固定节点时，移动节点将自己拥有的消息复制给相遇的移动节点，并且假设固定中继节点之间不进行通信，从而减少固定中继节点的能量消耗。

3.2 网络模型

本文假设网络中有 N 个移动节点和 M 个固定中继节点，其中，固定中继节点能够作为消息的源节点和目的节点，但不会生成消息。所有的移动节点和固定中继节点均采用无线接口进行通信，固定中继节点的存储空间和能量远大于移动节点的存储空间和能量，并且固定中继节点可以及时补充能量，不会出现能量耗尽的现象。

本文将节点活动区域的边界表示为 X_{\min} 、 X_{\max} 、 Y_{\min} 和 Y_{\max} ，并且满足 $0 \leq X_{\min} \leq X_{\max}$ ， $0 \leq Y_{\min} \leq Y_{\max}$ 。为了简化计算，假设固定中继节点之间的距离为 d ，固定中继节点的坐标表示为 $(X_{\min} + i \times d, Y_{\min} + j \times d)$ ，其中， $i = 0, 1, 2, \dots$ ， $j = 0, 1, 2, \dots$ 。因此，固定中继节点的数量为 $M = \left(\left\lfloor \frac{X_{\max} - X_{\min}}{d} \right\rfloor + 1 \right) \cdot$

$\left(\left\lfloor \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{d} \right\rfloor + 1 \right)$ 。此时，节点的活动区域被定义为网格区域，并且在每个网格的中心处部署固定中继节点。本文假设固定中继节点的覆盖范围是圆形区域，并且其通信范围覆盖它所在的网格。对于网格区域而言，网格中心位置的确定是通过固定中继节点间的距离计算得到的，即 d 的值。以计算网格中心横坐标为例，本文对固定中继节点的数量进行解

释。在确定网格中心点的横坐标时，需用到整个活动区域的宽度，即 $X_{\max} - X_{\min}$ 的值，由于固定中继节点可摆放的位置包括区域的起点和终点，当活动区域的宽度能整除 d 时，横向所需摆放的固定中继节点数量需要加 1；此外，整除结果是向下进行取整的，当活动区域的宽度不能整除时，本文只保留整数部分，此时横向所需摆放的固定中继节点数量需要在整除的结果上加 1，纵坐标的计算方式相同。因此，该网络模型作为仿真实验的初始化模型。

4 唤醒策略

4.1 能量约束

固定中继节点的工作状态分为传输状态、接收状态、扫描状态和休眠状态。固定节点可以在各种工作状态间进行切换。传输状态是指固定中继节点与其通信范围内的移动节点建立连接，并将固定中继节点拥有的消息发送给移动节点；接收状态是指移动节点将自己拥有的消息转发给固定中继节点；扫描状态是指固定中继节点周期性地扫描其通信范围内能够通信的移动节点；休眠状态是指固定中继节点无数据传输任务时仅维持设备基础运行的操作。

假设固定中继节点单位时间内处于传输状态时的能量消耗为 P_{send} ，接收状态时的能量消耗为 P_{receive} ，扫描状态时的能量消耗为 P_{scan} ，休眠状态时的能量消耗也被称为基础能耗，记为 P_{base} 。则四者之间的关系^[20]为

$$P_{\text{send}} = a_1 \times 10^n \times P_{\text{base}} \quad (1)$$

$$P_{\text{receive}} = a_2 \times 10^n \times P_{\text{base}} \quad (2)$$

$$P_{\text{scan}} = a_3 \times 10^n \times P_{\text{base}} \quad (3)$$

其中， a_1 、 a_2 、 a_3 是 0~10 的值， n 是大于或等于 1 的整数。由式(1)~式(3)可知，固定中继节点在传输状态、接收状态、扫描状态时的耗能属于同一数量级，均是休眠状态时耗能的 10^n 倍。由此可见，固定中继节点在唤醒时应当尽可能地使固定节点处于有效工作模式上，即传输模式和接收模式。

4.2 多目标性能优化指标

在现实场景中，唤醒的固定中继节点的选择需要考虑网络的性能要求，即唤醒中继节点选择时所完成的指标。本文在部署唤醒中继节点时同时考虑中继节点转发消息的能力和能量消耗 2 个指标。

4.3 效益—能量消耗模型

本文引用经济学中的成本—收益模型^[21]描述固

定中继节点选择策略，其中，成本是指网络中能量的消耗，收益是指网络中固定中继节点传输消息的数量，因此，本文称该模型为固定中继节点效益—能量消耗模型，并给出效益和能量消耗的计算式表示形式。

网络中的效益 (message revenue): 当部署一个唤醒的中继节点时，该中继节点从移动节点处接收消息的数量与将消息转发给移动节点的数量之和，表示为

$$M_{\text{Total}} = \sum_{i \in M} a_i \times (M_i^{\text{send}} + M_i^{\text{receive}}) \quad (4)$$

其中， M 表示网络初始时中继节点的集合， a_i 表示编号为 i 的固定中继节点是否被唤醒， M_i^{send} 表示中继节点转发给移动节点的消息的数量， M_i^{receive} 表示移动节点转发给固定中继节点消息的数量。 a_i 表示为

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{编号为 } i \text{ 的固定中继节点被部署在网络中} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

网络中的能量消耗 (energy consumption): 当唤醒一个固定中继节点时，该固定中继节点在 4 种工作状态时的能量消耗的总和，表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{Total}} &= P_{\text{send}} + P_{\text{receive}} + P_{\text{scan}} + P_{\text{sleep}} \\ &= \sum_{i \in M} b_i \times (p^{\text{send}} \times M_i^{\text{send}} + p^{\text{receive}} \times M_i^{\text{receive}} + \\ &\quad p^{\text{scan}} \times s_i + p^{\text{sleep}} \times t_i) \end{aligned} \quad (6)$$

其中， M 表示网络中初始时固定中继节点的集合， b_i 表示编号为 i 的固定中继节点是否被唤醒， P_{send} 、 P_{receive} 、 P_{scan} 、 P_{sleep} 分别表示所有固定中继节点在传输状态、接收状态、扫描状态、休眠状态时的总能量消耗， p^{send} 、 p^{receive} 、 p^{scan} 、 p^{sleep} 分别表示固定中继节点在传输状态、接收状态、扫描状态、休眠状态时的基础能量消耗值， M_i^{send} 和 M_i^{receive} 的意义同式(4)， s_i 表示在整个生命周期内编号为 i 的固定中继节点扫描邻居节点的次数， t_i 表示在整个生命周期内编号为 i 的固定中继节点无处理任务时的时长。 b_i 表示为

$$b_i = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个固定中继节点被部署在网络中} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

那么，结合式(4)和式(6)，可以得到满足网络效益和能量消耗双目标的目标函数，表示为

$$E = \max \left(\frac{\text{MessageRevenue}}{\text{EnergyConsumption}} \right) = \max \left(\frac{M_{\text{Total}}}{P_{\text{Total}}} \right) \quad (8)$$

因此，式(8)是最终的效益—能量消耗模型。由模型可知，当网络中转发的消息一定时，网络整体的能

量消耗越小，则目标函数值越大；当网络整体的能量消耗一定时，网络转发的消息数越多则该目标函数值越大。一般来说，为了使能量消耗减少，可以通过使固定节点休眠来实现。因此，式(8)的目标是在网络中选择一定数量的唤醒中继节点时，最大化每个中继节点单位能量消耗时传递消息的数量。

5 基于遗传算法的固定中继节点唤醒算法

在众多可选的固定节点位置选择若干位置部署唤醒中继节点使目标函数值最大，这本质是个 NP 难问题。解决这类问题可以使用蚁群算法、模拟退火算法、禁忌搜索、神经网络等算法。本文使用遗传算法 (genetic algorithm) [22] 实现唤醒中继节点选择，因为遗传算法在全局搜索方面更有优势，可以快速在解空间内搜索到近似最优解，而不会陷入局部最优解的陷阱；并且，遗传算法可以利用其内在的并行性，方便进行分布式计算，加快求解的速度。中继节点的唤醒算法每隔一段时间就会执行一次，以唤醒合适的中继节点达到节能的目的。

5.1 染色体编码方法和种群初始化

由于固定中继节点选择能够转换为二进制字符串，本文将二进制字符串作为遗传算法的染色体。初始时，网络模型中共均匀摆放 m 个固定中继节点，固定节点的编号为 $1, 2, \dots, m$ 。当采用二进制字符串进行遗传编码时，编码长度取决于 m 的值，遗传编码表示为

$$g = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_m]$$

其中， x_i 的取值是 0 或 1。当 $x_i = 0$ 时，表示在第 i 个位置上未摆放固定中继节点；当 $x_i = 1$ 时，表示在第 i 个位置上的固定中继节点被唤醒。因此，固定中继节点摆放策略可以表示为一个由 0 和 1 值构成的序列，执行遗传算法后，这个序列中 1 的个数表示网络中最终被唤醒的固定中继节点的数目，1 所在的位置编号表示网络中唤醒的固定中继节点的位置。因此，遗传算法能够解决固定中继节点的数量问题和位置问题。

初始时，种群的生成采用计算机随机产生规定数目的染色体，一个染色体代表一组固定中继节点唤醒方案。种群的数目会影响遗传算法的求解速度，通常种群数量是 (0, 100] 之间的整数。根据文献[11]的经验，种群数量为 100 时，算法的执行效果最佳。

5.2 个体适应度评估

本文将目标函数用于个体适应度的评价函数。

5.3 选择算子的设计

本文采用确定性和随机性相结合的选择算子——随机最佳个体保留选择 (random tournament selection)。首先，给出竞争规模 (elite size)，然后，利用随机抽样的方法选择一部分染色体，并从中选出适应度较优的个体直接遗传到下一代，本文称这一部分染色体是精英染色体 (elite count)。如果精英染色体的数量大于等于竞争规模，则直接将这一部分染色体遗传到下一代，不做其他操作。如果精英染色体的数量小于竞争规模，则满足条件的精英染色体直接遗传到下一代，剩余的精英染色体从非精英染色体中产生。对于非精英染色体，本文需对这些染色体进行交叉和变异操作，用其子代中适应度高的染色体进行替代，直到达到种群规模数量。这种随机精英方法通过引入随机性因素避免搜索陷入局部优化。

5.4 交叉算子和变异算子的选择

本文使用均匀交叉 (uniform crossover) 作为交叉算子，文献[23]中指出，相对于单点交叉算子和两点交叉算子而言，均匀交叉算子更适用于简单遗传算法，其对算法敏感度低，对于解空间的搜索能力更强，避免出现汉明悬崖现象。文献[11]通过实验证明，交叉概率设置为 0.8 时遗传算法的性能最优，因此，本文选用 0.8 作为算法的交叉概率。

对于二进制字符串编码而言，本文将位翻转变异 [24] 作为变异算子。经过大量的研究证实， P_m 的取值范围是 [0.001, 0.1]。相对于单点变异而言，位翻转变异允许一个染色体的多个基因位同时发生位翻转变异。由于变异算子的操作概率通常很低，染色体变异发生情况较少，有利于维持种群的稳定，增加种群的多样性，是一种有效的辅助算子。本文依据文献[11]的结论将变异概率设置为 0.01。

5.5 算法描述

输入参数：候选固定中继节点集合 $StationNodeSet = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ ，固定中继节点效益集合 $MessageNumberSet = \{M_1^{Total}, M_2^{Total}, \dots, M_m^{Total}\}$ ，其中， $M_i^{Total} = M_i^{send} + M_i^{receive}$ ， $i \in StationNodeSet$ ， $M_i^{send} \in MessageSendNumber = \{M_1^{send}, M_2^{send}, \dots, M_m^{send}\}$ ， $M_i^{receive} \in MessageReceiveNumber = \{M_1^{receive}, M_2^{receive}, \dots, M_m^{receive}\}$ ；固定中继节点能量消耗集合 $PowerNumberSet = \{P_1^{Total}, P_2^{Total}, \dots, P_m^{Total}\}$ ，其中， $P_i^{Total} = P_i^{send} + P_i^{receive} + P_i^{scan} + P_i^{sleep}$ ， $i \in StationNodeSet$ ，固定中继节点扫描次数集合 $ScanNumber =$

$\{Scan_1, Scan_2, \dots, Scan_m\}$, 固定中继节点睡眠时间集合 $Time = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 。

输出参数: 满足要求的二进制字符串, 其中, “1” 所在的基因位表示唤醒的固定中继节点的位置编号, 字符串中 “1” 的数量表示网络中唤醒的固定中继节点的数量。

利用遗传算法实现固定中继节点唤醒策略(GA placement)时, 具体步骤如下。

步骤 1 给定种群规模 $PopSize = 100$, 设迭代次数最大值 $t_{max} = 100$, 初始时种群进化次数 $t = 0$, 精英种群的数量 $EliteSize = 20$, 交叉概率为 $P_{crossover} = 0.8$, 变异概率为 $P_{mutation} = 0.01$ 。

步骤 2 利用随机法生成满足种群规模要求的初始种群, 并采用二进制字符串编码方案对种群进行编码, 每种染色体编码方案代表一种候选固定中继节点选择方案。

步骤 3 计算每一代中各染色体的个体适应度。本文选取目标函数作为个体适应度函数, 即采用式(8)。通过计算, 个体适应度越高的染色体, 将会有机会直接参与到下一代的进化中。

步骤 4 依据染色体适应度的值筛选父代的染色体。在每一代的计算中记录适应度的最大值 E_{max} , 把 $0.9E_{max}$ 作为选择精英染色体的标准。对父代染色体 $Pop(t)$ 而言, 满足要求的父代染色体 $P'(t)$ 直接选入精英染色体集合 $EliteSet(t)$ 。若此时精英染色体的数量大于 $EliteSize$, 则 $EliteSet(t)$ 中的染色体均参与到下一代的进化中, 进行步骤 7 的操作; 否则, 对 $Pop(t) - P'(t)$ 中的染色体进行步骤 5 和步骤 6 的操作, 直到选出满足要求的精英染色体群体。

步骤 5 交叉操作。本文选用均匀交叉方法作为染色体对之间的交叉操作, 其中, 交叉概率为 $P_{crossover} = 0.8$ 。

步骤 6 变异操作。本文选用位翻转方法作为染色体基因位的变异操作, 其中, 变异概率为 $P_{mutation} = 0.01$ 。

步骤 7 判断算法是否终止。此时, $t = t + 1$, 若 $t < t_{max}$, 算法转到步骤 3, 即对 $Pop(t + 1)$ 中的染色体进行进化操作; 若 $t = t_{max}$, 遗传算法终止并输出满足要求的个体染色体, 并对染色体进行解编码, 获取固定中继节点选择方案。

在上述步骤的基础上, 本文对遗传算法进行了改进。

1) 遗传算法在进行搜索选择时容易陷入局部

优化, 为了避免这一问题, 本文在遗传算法选择阶段加入随机性, 通过择优机制和随机性结合的方法防止算法陷入局部优化。在图 1 中给出了本文提出的改进后的遗传算法与传统遗传算法的比较结果, 从图可以看出虽然 2 种算法都随着迭代次数的增加适应度也在不断增加, 但是当迭代次数达到 60 以后, 2 种算法都出现平均适应度增加缓慢的现象。另外, 改进后的算法的平均适应度要高于使用传统算法时的平均适应度, 这是因为在选择阶段加入了随机性, 避免算法陷入局部最优。

2) 遗传算法的执行时间会随着所研究问题复杂性的上升而增加, 为了避免这一问题, 本文根据之前的经验对算法执行过程进行了设定: 当第 $n+1$ 代和第 n 代的输出结果相同时, 算法结束; 否则, 继续执行该算法。

3) 遗传算法的迭代次数会影响到其性能, 如图 1 所示, 本文通过实验证明, 迭代次数设置为 100 时, 改进后的遗传算法达到较好的效果。

4) 本算法的时间复杂度主要取决于选择算子算法, 其是确定性和随机性相结合的选择算法, 因此其时间复杂度为 $O(\lg n)$, 其中, n 为种群规模。

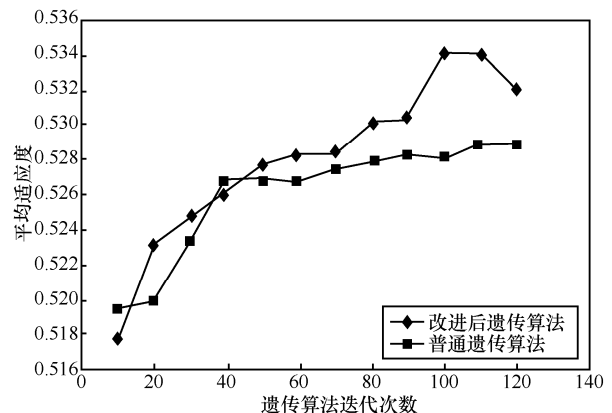


图 1 遗传算法迭代次数结果

6 仿真实验

6.1 实验参数、性能指标和仿真参数设置

1) 实验参数

本文主要考虑消息的生成间隔时间、移动节点数量和节点移动速度对唤醒策略性能的影响。其中, 消息的生成间隔时间和节点移动速度会影响固定中继节点转发消息的能力和能量的消耗; 移动节点的数量会影响网络中节点的密度。以上 3 个参数均会影响唤醒的中继节点数量和位置的选择。

2) 性能评价指标

本文选取的性能评价指标包括消息成功递送率、平均的端到端的延迟，除此之外，本文将平均的传输能力—能量消耗效率作为评估固定中继节点转发消息能力的指标。计算方法为

$$e = \frac{F_{total}}{E_{total}} = \frac{\sum_{i=1}^{SN} messageNumber}{\sum_i energyConsumption} \quad (9)$$

3) 仿真参数设置

本文采用机会网络仿真平台（ONE^[25], opportunistic network environment simulator），选取 Epidemic^[26]路由和 Spray-and-Wait^[27]路由作为消息传输算法，并分别在随机路点移动模型^[28]（RWP）和工作日移动模型^[29]（WDM）中加入固定中继节点模型，将基于多目标优化的固定中继节点唤醒策略（GAP, GA placement）与随机固定中继节点选择策略^[11]（RP, random placement）进行对比，主要仿真参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 RWP 实验仿真参数

参数名称	参数值
仿真时长/s	43 200
场景大小	4 500 m×4 500 m
移动节点编号范围	0~34
节点移动模型	RandomPointModel
移动节点缓存大小/MB	20
固定节点数量 SN	0, 4, 9, 16, 25, 36
固定节点缓存大小/MB	500
固定节点传输范围/m	200
移动节点传输速率/(kbit·s ⁻¹)	250
消息大小/kB	200

表 2 WDM 实验仿真参数

参数名称	参数值
仿真时长/s	43 200
场景大小	4 500 m×4 500 m
移动节点编号范围	0~34
节点移动模型	WorkingDayModel
移动节点缓存大小/MB	20
固定节点数量 SN	0, 4, 9, 16, 25, 36
固定节点缓存大小/MB	500
固定节点传输范围/m	200
移动节点传输速率/(kbit·s ⁻¹)	250
移动节点移动速率/(m·s ⁻¹)	2, 4, 6, 8, 10, 12
移动节点数量	10, 20, 30, 40, 50, 60
消息大小/kB	200
发送消息能耗/(J·bit ⁻¹)	3
接收消息能耗/(J·bit ⁻¹)	1
单次扫描能耗/J	1
基础能耗/(J·s ⁻¹)	0.5

6.2 不同移动模型下引入不同数量的唤醒中继节点时的性能比较

1) 在 Epidemic 路由下唤醒不同数量固定中继节点时的性能

由图 2(a)和图 2(b)可知，在 RWP 和 WDM 中选择不同数量的固定中继节点时，消息递送率随着消息生成间隔时间增大而增大并逐步趋于平稳。此外，随着唤醒的固定中继节点的数量增加，消息递送率也在增加，当固定中继节点的数量增加到 36 个时，由于网络中中继节点密度增大，移动节点频繁地与中继节点相接触并更新消息，这个过程会造成即使有其他移动节点与该移动节点接触也不能获取消息，因此图 2(a)和图 2(b)均出现了消息递送

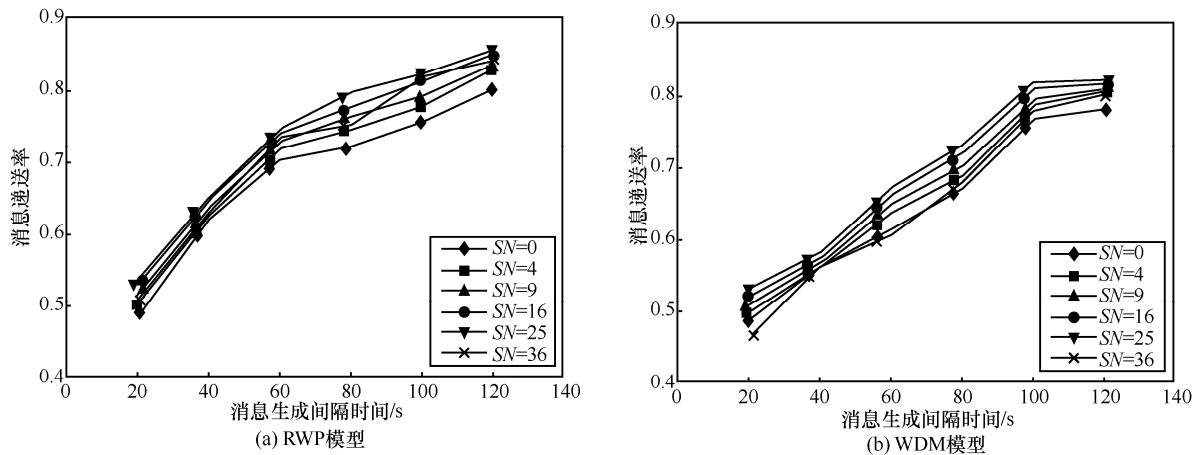


图 2 Epidemic 下不同消息生成间隔时间的消息递送率

率降低的现象。在 RWP 中，由于节点不规律的运动，唤醒的固定中继节点被访问的次数比较均匀，固定中继节点中的消息大量冗余，固定中继节点缓存空间丰富的优势不能得到利用。同理，在 WDM 中也存在类似的情况。在 RWP 中，当唤醒的固定中继节点的数量由 0 增加到 25 个时，消息递送率提升了 5%~10%。在 WDM 中，当固定中继节点的数量由 0 增加到 25 个时，消息递送率提升了 7%~11%。由此可见，当唤醒的固定中继节点的数量增加时，消息传输的性能在提升，但由于消息的传输采用洪泛机制，消息传输的性能逐步趋于稳定。

由图 3(a)和图 3(b)可知，在 RWP 和 WDM 中唤醒不同数量的固定中继节点时平均端到端的延迟随着消息生成间隔时间的增大而减小，并且 RWP 场景的性能更好。在 RWP 中，由于固定中继节点上分布的消息较为均匀，并且随着节点的随机移动，消息能够更快地到达目的节点，平均端到端的延迟显著下降。而在 WDM 中，由于节点的规律运动，唤醒的固定中继节点上的消息分布并不均匀，只有处于节点密度较高区域的固定中继节点能够

获得更多转发消息和传输消息的机会，从而造成某些处于“边远地区”的节点得不到转发消息的机会，消息的平均端到端的延迟不会显著降低。

2) 在 Spray-and-Wait 路由下选择不同数量固定中继节点时的性能

由图 4(a)和图 4(b)可知，在 RWP 和 WDM 中唤醒不同数量的固定中继节点时消息递送率随着消息生成间隔时间的增大而增大，并逐步趋于平稳。并且，有唤醒的固定中继节点选择场景的消息递送率明显优于无固定中继节点唤醒场景的消息递送率。相对于 Epidemic 而言，采用 Spray-and-Wait 路由传递消息时，消息递送率提升了 30%~50%。与采用 Epidemic 作为消息传输方式相同，当固定中继节点的数量增加到 36 个时，消息递送率出现下降。在 RWP 加入唤醒中继节点时，消息递送率均在 90%以上。而在 WDM 中加入唤醒中继节点时，消息递送率均在 94%以上。由于 Spray-and-Wait 限制了消息的副本数量，固定中继节点的缓存空间利用率相对于采用 Epidemic 时的空间利用率更高，因此，当固定中继节点被唤醒时，节点间消息的传输采用 Spray-and-Wait 更为适合。

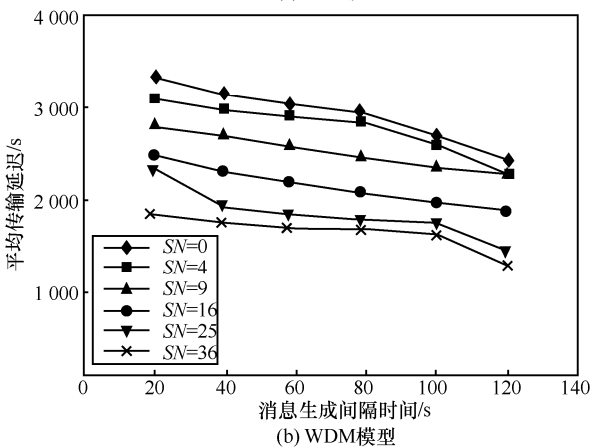
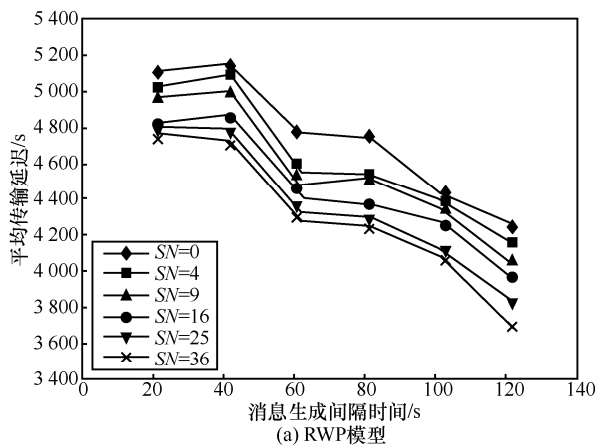


图 3 Epidemic 下不同消息生成间隔时间的平均端到端延迟

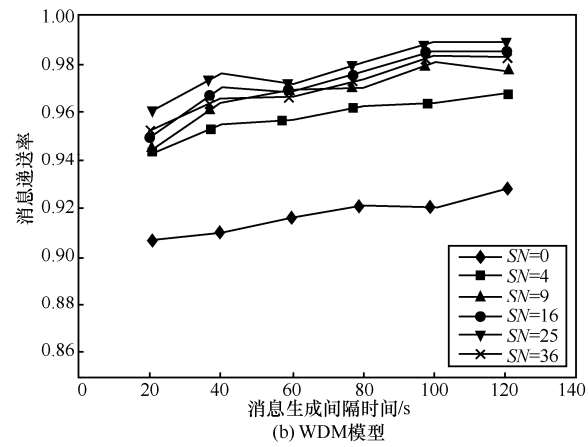
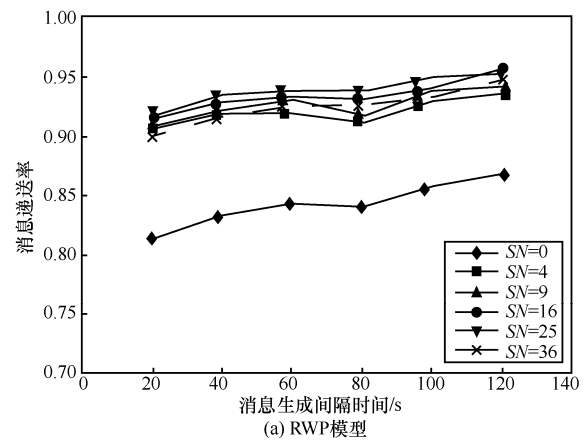
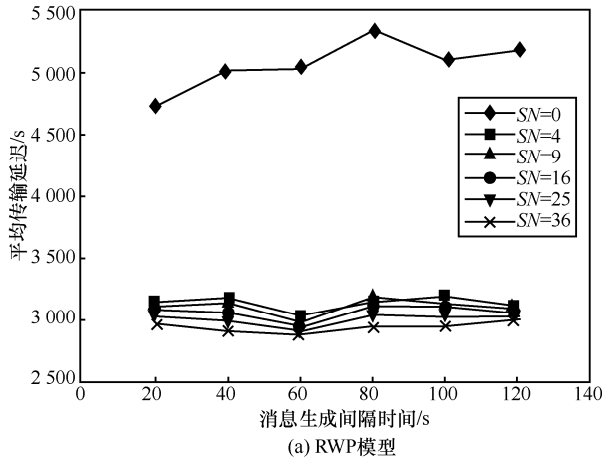
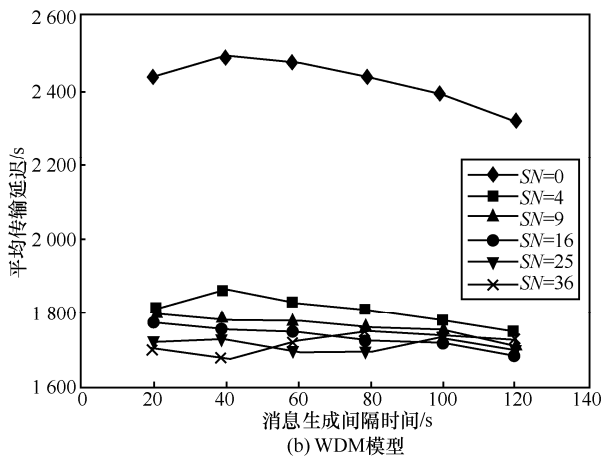


图 4 Spray-and-Wait 下不同消息生成间隔时间的消息递送率

由图 5(a)和图 5(b)可知，在 RWP 和 WDM 中唤醒不同数量的固定中继节点时平均端到端的延迟随着消息生成间隔时间的增大而减小。由于在 WDM 中，节点的移动轨迹稳定，WDM 场景的性能更好。



(a) RWP模型



(b) WDM模型

图 5 Spray-and-Wait 下不同消息生成间隔时间的唤醒固定中继节点时的平均端到端延迟

通过以上 2 组实验的对比，本文发现，固定中继节点唤醒方案更适合于 WDM 场景中，该移动模型符合人们在日常生活中存在的“潮汐效应”移动规律，因此说明本唤醒方案是合理、有效的。为了更好地利用固定中继节点的缓存优势，可以选择 Spray-and-Wait 路由，它更利于消息的传递。因此，在下面的仿真实验中，本文将路由算法设置为 Spray-and-Wait，节点的移动模型设置为 WDM。

6.3 不同消息生成间隔时间下不同固定中继节点唤醒策略性能的比较

由图 6 可知，GAP 和 RP 在消息生成间隔时间较小时，消息未送达至目的节点就被丢弃，

造成消息递送率较低。随着消息生成间隔时间的增大，节点缓存空间中的消息趋于稳定有利于消息抵达目的节点，使消息递送率不断上升。并且，GAP 的消息递送率比 RP 的消息递送率平均高出 2%~4%。

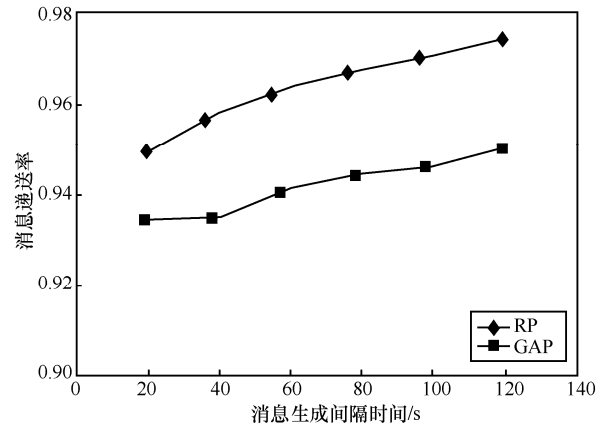


图 6 不同消息生成间隔时间下的消息递送率

由图 7 可知，GAP 和 RP 在消息生成间隔时间较小的时候，2 种唤醒策略平均端到端的延迟性能相似，变化较为平稳；当消息生成间隔时间大于 60 s 时，2 种唤醒策略的延迟急剧上升，并在数值方面更加相近，并且 GAP 的延迟比 RP 的延迟平均高 50 s。

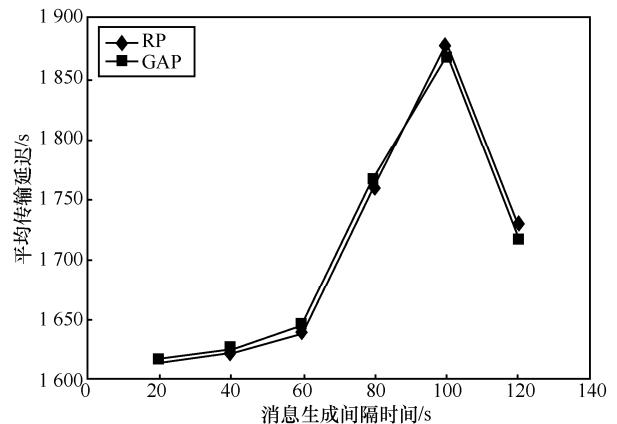


图 7 不同消息生成间隔时间下的平均端到端延迟

由图 8 可知，GAP 和 RP 下的平均转发一能量效率随着消息生成间隔时间的增大而减小。当消息生成间隔时间较小的时候，网络中传输的消息较多，固定中继节点会有更多的机会将更多的能量用于消息的转发；当消息生成间隔时间较大的时候，网络中传输的消息开始减少，固定中继节点转发消息的机会减少，固定中继节点多处于休眠模式，虽

然消耗的能量减少了，但是转发消息的数量下降得更快，因此转发—能量效率变小。由于 GAP 倾向于将唤醒的固定中继节点放置于转发—能量效率高的位置上，所以 GAP 的性能优于 RP。

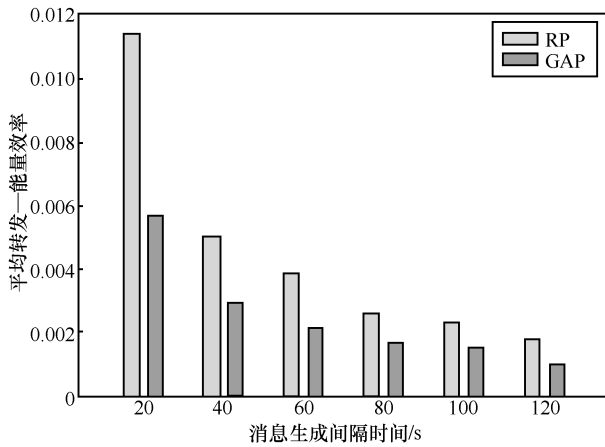


图 8 不同消息生成间隔时间下的平均转发—能量效率

6.4 不同移动节点数量下引入不同数量的唤醒中继节点时的性能比较

由图 9 可知，随着移动节点数量的增加，消息递送率呈现上升趋势。当网络中移动节点稀疏（移动节点数量为 10 和 20）时，增加唤醒中继节点的数量能够有效提升消息成功率；当网络中移动节点较为稀疏（移动节点数量为 30、40、50）时，增加唤醒中继节点的数量，消息递送率无明显提高；当网络中节点密集（移动节点数量为 60）时，在网络中添加唤醒中继节点时消息递送率呈现下降趋势。因此，网络中移动节点的密度影响初始时唤醒中继节点数量的选择，并且在移动节点稀疏的网络场景中，唤醒中继节点的作用明显高于网络中节点密集时的情况。

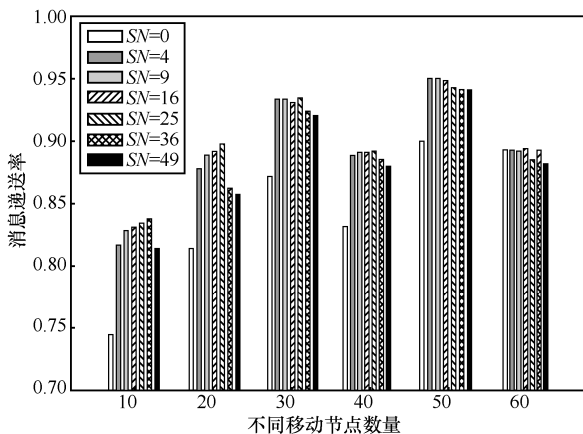


图 9 不同数量移动节点下的消息递送率

由图 10 可知，当网络中移动节点稀疏时，平均端到端的延迟随着移动节点数量增加在不断地下降；当网络中移动节点较为稀疏时，平均端到端的延迟先降低后增加；当网络中移动节点密集时，平均端到端的延迟随着移动节点数量的增加而不断地增加。因此，唤醒固定中继节点时需考虑网络中移动节点的数量。

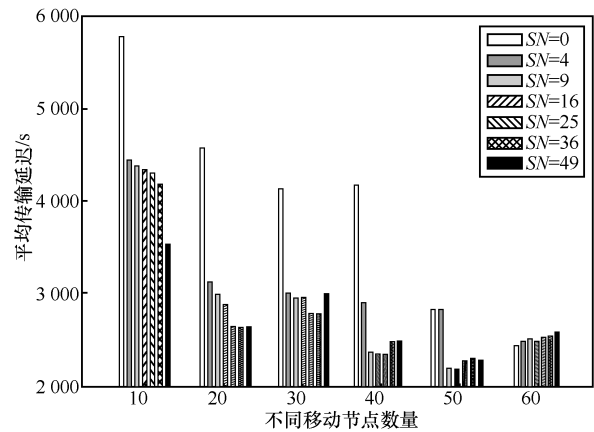


图 10 不同数量移动节点下的平均端到端的延迟

6.5 不同移动节点数量下不同固定中继节点唤醒策略性能的比较

由图 11 可知，在不同数量移动节点时的 GAP 和 RP 下的消息递送率随着移动节点数量的增加呈现先上升后降低的趋势。由于受到缓存空间的限制，当网络中移动节点分布稀疏时，加入唤醒中继节点能够有效地提升消息递送率；当网络中移动节点分布密集时，唤醒的固定中继节点的作用降低。

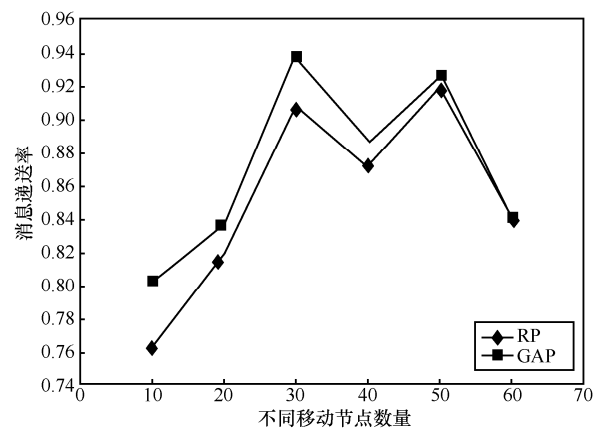


图 11 不同数量移动节点下的消息递送率

由图 12 可知，在不同数量移动节点时的 GAP 和 RP 下的平均端到端的延迟随着移动节点数量的增加先下降后上升。

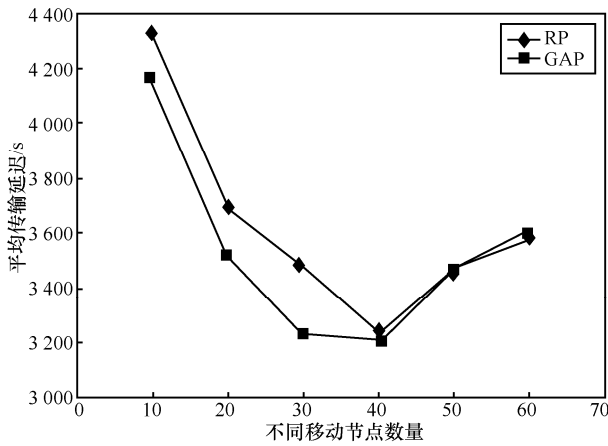


图 12 不同数量移动节点下的平均端到端的延迟

由图 13 可知，在不同数量移动节点时的 GAP 和 RP 下的平均的转发—能量效率随着移动节点数量的增加而减小。由于 GAP 在唤醒固定中继节点时结合了固定中继节点的位置和节点的消息转发信息，当网络中移动节点数量特别稀疏时，固定中继节点的位置对固定中继节点的转发效率影响较大，因此，GAP 的性能略优于 RP；当网络中移动节点数量较为稀疏时，节点在转发消息时并不完全依赖唤醒的固定中继节点，因此，GAP 的性能并不优于 RP；而当网络中移动节点密集时，网络中允许唤醒的固定中继节点的数量减少，并且消息的转发依赖于移动节点，因此，GAP 的性能与 RP 的性能持平，消息的转发不受固定中继节点唤醒策略的影响。由此可见，唤醒的中继节点更适用于移动节点稀疏的网络场景。

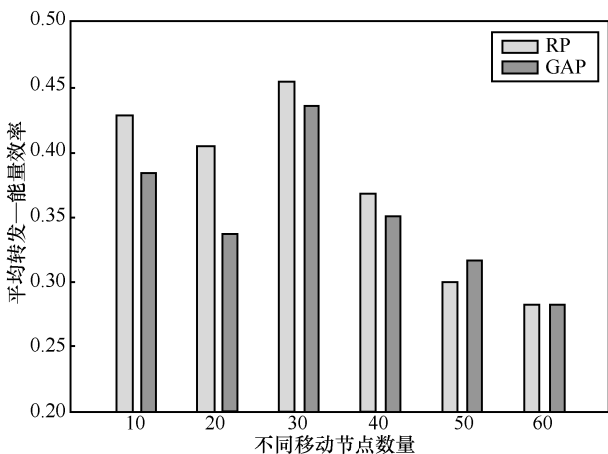


图 13 不同数量移动节点下的平均转发—能量效率

6.6 不同移动节点速度下引入不同数量的唤醒中继节点时的性能比较

由图 14 可知，不同移动速度下唤醒不同数量

固定中继节点时的消息递送率随着移动节点速度的增加呈现上升趋势。但是，随着固定中继节点速度的增加，移动节点间的接触频率增多，消息递送率呈现波动趋势，并且当固定中继节点数量取值为 16 时，网络性能较好。

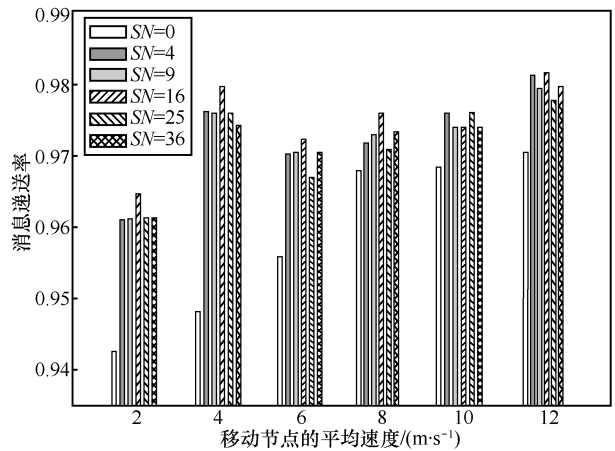


图 14 不同移动节点速度下的消息递送率

由图 15 可知，不同移动速度下唤醒不同数量固定中继节点时的平均端到端延迟随着移动节点速度的加快呈现下降趋势。由于固定中继节点缓存资源的限制，平均端到端延迟呈现上升趋势，并且当移动节点的速度逐渐加快时，平均端到端延迟几乎不变。

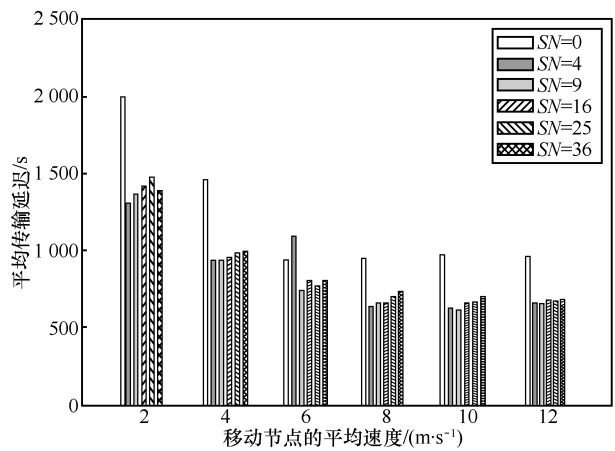


图 15 不同移动节点速度下的平均端到端延迟

6.7 不同移动节点速度下不同固定中继节点唤醒策略性能的比较

由图 16 可知，在不同移动节点速度时的 GAP 和 RP 下的消息递送率随着移动节点速度的增加呈现上升趋势。并且当移动节点移动速度很快时，GAP 的消息递送率略微好于 RP 的传输成功率。

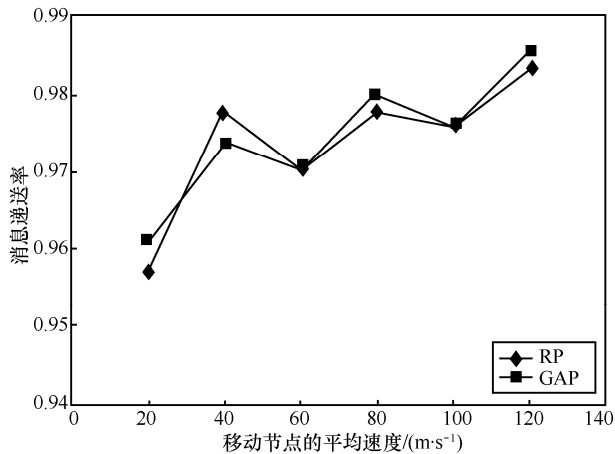


图 16 不同移动速度节点下的消息递送率

由图 17 可知, 在不同移动节点速度时的 GAP 和 RP 下的平均端到端的延迟随着移动节点速度增加而下降, 并且两者性能基本相同。

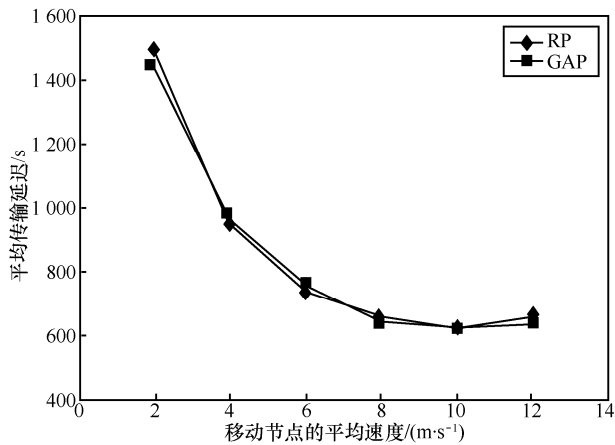


图 17 不同移动速度下的平均端到端延迟

由图 18 可知, 在不同移动节点速度时的 GAP 和 RP 下的平均的转发—能量效率随着移动节点

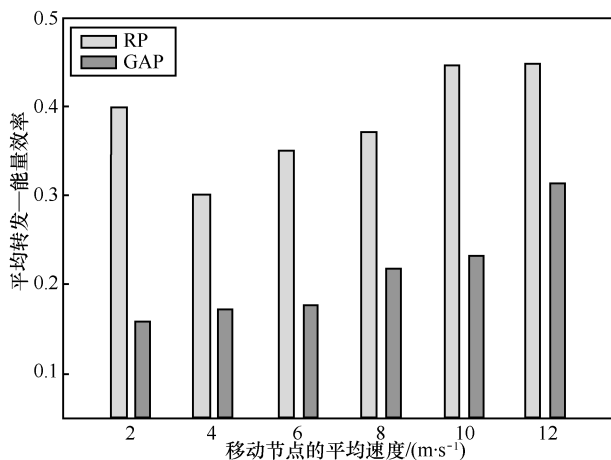


图 18 不同移动节点速度下的平均转发—能量效率

速度的增加而增加。由于 GAP 在选择固定中继节点的位置时, 综合考虑了节点的转发能力和能量消耗, 因此, GAP 的平均转发效率好于 RP 的平均转发效率。

7 结束语

本文针对城市中人们移动规律的“潮汐效应”现象以及机会网络中固定中继节点传输性能和能量消耗间的矛盾, 提出采用基于多目标优化的固定中继节点唤醒策略加以解决, 该策略综合考虑了固定中继节点转发消息的能力和固定中继节点的能量消耗 2 个方面的因素。针对贪心算法的受限性, 本文提出采用遗传算法选取唤醒的固定中继节点的位置并改进选择算子使算法更快地收敛于解空间。仿真结果表明, 消息的生成间隔时间和移动节点的密度直接影响着初始时唤醒的固定中继节点位置和数量的确定; 该策略更适合部署于有规律运动的实验场景中; 路由算法选择副本受限的路由算法更有利于消息的传递。并且 GAP 和 RP 相比, 由于 GAP 在唤醒固定中继节点时, 结合了固定中继节点转发消息的数量和固定中继节点的能量消耗 2 个方面的参数, GAP 能够在保证消息传输成功率的基础上, 提高平均每个固定中继节点消耗单位能量时能够转发消息的数量 (平均的消息转发能力—能量消耗效率)。在未来的研究中, 固定中继节点唤醒时需要考虑更多的指标, 并且可以将节点的接触信息加入到唤醒策略的设计中, 从而使唤醒策略更加贴近现实。

参考文献:

- [1] KARAMSHUK D, BOLDRINI C, CONTI M, et al. Human mobility models for opportunistic networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(12): 157-165.
- [2] LEE C H, EUN D Y. Exploiting heterogeneity for improving forwarding performance in mobile opportunistic networks: an analytic approach[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(1): 150-162.
- [3] ABDELMOUMEN M, ARFAOUI I, FRIKHA M, et al. On the performance of MANETs under different mobility patterns and routing protocols and its improvement based on fixed relay nodes[C]// 2012 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). 2012: 1-5.
- [4] MAWAD Y, FISCHER S. Infrastructure-based delay tolerant network communication[C]//2016 International Conference on Information Networking (ICOIN). 2016: 161-165.
- [5] LI Y, WENG B, LIU Q, et al. Multiple ferry routing for the opportu-

- nistic networks[C]//Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011). 2011: 1-5.
- [6] YASMEEN F, HUDA M, HAQUE M, et al. Using ferry access points to improve the performance of message ferrying in delay-tolerant networks[C]//ICCNMC. 2011: 173-179.
- [7] ZHAO W, CHEN Y, AMMA M, et al. Capacity enhancement using throwboxes in DTNs[C]//IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS). 2006: 31-40.
- [8] YING Z, ZHANG C, WANG Y. Social based throwbox placement in large-scale throwbox-assisted delay tolerant networks[C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2014: 2472-2477.
- [9] LLOYD E L, XUE G. Relay node placement in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(1): 134-138.
- [10] LI F, YIN Z, TANG S, et al. k -throwbox placement problem in throwbox-assisted delay tolerant networks[C]//Global Communications Conference (GLOBECOM). 2014: 253-258.
- [11] SHAHBAZI S, KARUNASEKERA S, Harwood A. Improving performance in delay/disruption tolerant networks through passive relay points[J]. Wireless Networks, 2012, 18(1): 9-31.
- [12] 洪璐, 洪锋. UWSP: 水下无线传感器网络节点休眠协议[J]. 通信学报, 2013, 34(S1): 162-269.
HONG L, HONG F. UWSP: sleeping algorithms for underwater sensor network[J]. Journal on Communications, 2013, 34(S1): 162-269.
- [13] 唐飞岳, 叶晖, 赵明. 机会网络节点唤醒调度机制研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(26): 95-97.
TANG Y F, YE H, ZHAO M. Node wake-up scheduling mechanism for opportunistic networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(26): 95-97.
- [14] 叶晖, 潘怡, 何文德, 等. 机会网络蓝牙设备唤醒调度机制研究[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(17): 1290-1295.
YE H, PAN Y, HE W D, et al. A bluetooth node wake-up scheduling mechanism for opportunistic networks[J]. 2014, 36(17): 1290-1295.
- [15] LI H S, LIU S M, HU B. Research on node sleep/wake-up mechanism in WSN based on fuzzy energy control[C]//ICINIS. 2009.
- [16] FEENEY L M, NILSSON M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an Ad Hoc network[C]//The Conference on INFOCOM. 2001.
- [17] SORBER J, BANERJEE N, CORNER M D, et al. Turducken: hierarchical power management for mobile devices[C]//The Conference on Mobisys. 2005.
- [18] JUN H, AMMAR M, CORNER M, et al. Hierarchical power management in disruption tolerant networks with traffic-aware optimization[C]//ACM Sigcomm Workshop on Challenged Networks (CHANTS). 2006.
- [19] JUN H, AMMAR M H, ZEGURA E W. Power management in delay tolerant networks: a framework and knowledge-based mechanisms[C]//IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON). 2005.
- [20] FENG Y, BAI X, DANG N, et al. A sleep scheduling mechanism based on power law distribution for mobile delay tolerate networks[C]//2015 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC). 2015: 481-490.
- [21] HSU C C, CHANG J M, CHOU Z T, et al. Optimizing spectrum-energy efficiency in downlink cellular networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing. 2014, 13(9): 2100-2112.
- [22] VOSE M D. The simple genetic algorithm: foundations and theory[M]. MIT Press, 1999.
- [23] 熊军, 高敦堂, 沈庆宏, 等. 遗传算法交叉算子性能对比研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2004, 40(4): 432-437.
XIONG J, GAO D T, SHEN Q H, et al. Comparison of crossover operators in genetic algorithm[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2004, 40(4): 432-437.
- [24] 文诗华, 郑金华, 李密青. 多目标进化算法中变异算子的比较与研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(2): 74-78.
WEN S H, ZHENG J H, LI M Q. A comparative study of operator of multi-objective evolutionary algorithm mutation[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(2): 74-78.
- [25] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKKÄINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[C]//2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. 2009.
- [26] D'SOUZA R J, JOSE J. Routing approaches in delay tolerant networks: a survey[J]. International Journal of Computer Applications, 2010, 1(17): 8-14.
- [27] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[C]//The 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. 2005: 252-259.
- [28] CHAINTREAU A, HUI P, CROWCROFT J, et al. Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(6): 606-620.
- [29] EKMAN F, KERÄNEN A, KARVO J, et al. Working day movement model[C]//1st ACM SIGMOBILE Workshop on Mobility Models. 2008.

作者简介:



马学彬 (1981-), 男, 内蒙古赤峰人, 内蒙古大学副教授, 主要研究方向为无线网络、移动 IP、延迟容忍网络、信息安全。

李爱丽 (1990-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 内蒙古大学硕士生, 主要研究方向为无线网络与移动计算。

张晓娟 (1990-), 女, 山西临汾人, 内蒙古大学硕士生, 主要研究方向为移动无线传感器网络。