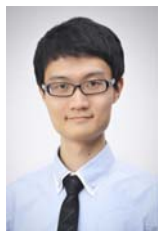


无线传感器网络中多移动代理分组优化算法

蔡 玮^{1,2}, 陈志军^{2,3}, 冯新龙⁴, 曾文华¹

(1. 厦门大学软件学院, 厦门 361005; 2. 首尔国立大学工学院, 韩国 151-742;

3. 科学技术部火炬高技术产业开发中心, 北京 100045; 4. 新疆大学数学与系统科学学院, 乌鲁木齐 830046)



摘要: 在基于多移动代理的无线传感器网络中, 源节点的编组方法是区别于单移动代理系统的核心研究问题。本文基于跳数的最小生成树原理, 提出一种基于最小生成树算法的规划编组方式, 通过对无向全连通图中边权值的测量和选取, 简单而有效地控制网络中能量消耗与任务延迟间的平衡, 从而获得高效的综合性能。最后通过大量的 OPNET 仿真实验验证了算法的可靠性。

关键词: 移动代理; 行程规划; 最小生成树; 无线传感器网络

中图分类号: TP393.01; TP393.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2010) 12-

Multi-Agent Grouping Algorithm in Wireless Sensor Networks

CAI Wei^{1,2}, CHEN Zhi-jun^{2,3}, FENG Xin-long⁴, ZENG Wen-hua¹

(1. Software School, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. College of Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea;

3. Torch High Technology Industry Development Center, Ministry of Science & Technology, Beijing 100045, China;

4. College of Mathematics and System Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: In contrary to the single mobile agent system, the grouping methodology for source nodes is the key issue in multi-agent itinerary planning for wireless sensor networks. A novel approach was proposed based on hop-oriented minimum spanning tree. The scheme achieves flexible trade-off control between energy cost and task duration by dynamically selecting edge weights in the total connected graph. Extensive simulations have shown that the approach outperforms the existing works.

Key words: mobile agent; itinerary planning; minimum spanning tree; wireless sensor networks

引言

无线传感器网络^[1]是一种将传感器、无线通讯等多种技术交叉融合产生的新型应用网络。在无线传感器网络应用中, 大量的无线传感器被设置在特地的检测区域, 用于获取所需的数据信息。这些无线传感器通过自组网的方式相互连接成为一个结构相对稳定的网络, 并通过这个多跳网络将数据信息传输给处理中心。在传统的无线传感器网络中, 源节点侦测到所需信息后主动向信息处理中心发送数据信号, 从而实现信息的传递。但是, 随着源节点数目的增多, 传感器网络中需要传递的无线通讯流的数量也随之增加。不同通讯流之间的干扰和竞争让网络的性能显著下降, 同时也消耗了更多节点能量, 导致网络寿命的减少。为了解决这些问题, 一些研究论文提出了基于移动代理的无线传感器网络。

基于移动代理的无线传感器网络^[2-3]改变了信息在网络中的传播方式。与源节点主动式向数据中心发送数据包不同的是, 数据中心通过对具体应用的分析, 定制出专门的移动代理(Mobile Agent)软件包。移动代理中包括了针对特定应

用的执行程序代码以及预定义完成的移动代理的行程规划。移动代理软件包以点对点传播的方式从数据中心出发, 按照行程规划通过中间节点的多跳传递后, 逐个访问源节点。当传感器节点接收到移动代理后, 将执行移动代理中的特定软件代码, 对侦测到的数据中的有效信息部分进行提取, 并将这些信息附加在移动代理后, 再转发移动代理软件包。移动代理软件包在访问完所有的源节点之后将返回数据中心, 将采集所得的信息报告给数据中心进行下一步的处理工作。移动代理的采用对于实现无线传感器应用的灵活配置和网络能耗的降低具有非常重要的意义^[2]。

但是移动代理也引入了新的缺点: 任务延迟问题。由于移动代理需要在各个源节点之间迁移并最终返回数据中心报告所采集的数据, 整个过程就需要一定的任务时间。相对于源节点受到触发直接向数据中心报告来看, 大部分情况下移动代理会造成更大的端对端延迟。此外, 源节点可能随机设置在网络的各个方位, 而移动代理数据包的大小随着采集数据的增大而逐渐增大, 移动代理在距离较远的源节点之间(可能横跨网络的两端)迁移就存在着多余能量耗散的问题。为了解决这些问题, [4]提出了基于多移动代理的无线传感器网络。本文通过使用跳数最小生成树算法对无线传感器网络中的源节点进行合理编组, 从而达到提升网络寿命的目的。我们采用 OPNET 仿真平台^[5]进行仿真, 结果表明新方案可以有效降低网络中能量的消耗。

本文章节安排如下: 第一部分介绍了目前相关的研究工

收稿日期: 2010-04-08

修回日期: 2010-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(10901131)

作者简介: 蔡玮(1985-), 男, 福建漳州人, 研究生, 研究方向为移动计算、无线网络等; 陈志军(1977-), 男, 福建漳州人, 硕士, 工程师, 研究方向为技术经济与政策、财务管理和国际通信与信息; 冯新龙(1976-), 男, 江苏如皋人, 博士, 副教授, 研究方向为计算数学与科学与工程计算; 曾文华(1964-), 男, 江苏兴化人, 博士, 教授, 副院长, 研究方向为人工智能、神经网络、进化计算、智能控制和计算机先进控制等。

作进展以及存在的不足之处。第二部分给出了研究问题的描述和定义。我们在第三部分描述基于跳数最小生成树分组的移动代理行程规划算法 (MST-MIP)。第四部分是关于仿真和模拟结果分析。第五部分总结全文, 提出下一步的研究工作计划。

1 相关的工作

目前针对基于移动代理的无线传感器研究大多数集中在单移动代理行程规划方向。在LCF算法^[6]中, 移动代理从地理位置上选择距离自己最近的源节点作为下一跳访问, 而GCF算法^[6]则选择地理位置上距离数据中心最近的源节点。文献[7]提出用遗传算法来解决移动代理行程问题的方法, 但是其性能的提升却并不显著。鉴于这些算法都不能有效地降低能量的消耗, 文献[8]提出一种基于能量预测的行程规划算法, 简称IEMF²。IEMF首先对移动节点数据包大小增大以及行程距离进行估算, 得到一个预测的消耗能量, 然后通过遍历的方法贪心选择最优的下一跳源节点, 从而实现行程能量的优化。然而, 正如前文提及, 单移动代理在延迟方面的性能稍有缺陷, 而且也包含有不必要的能量耗散。文献[4]针对这些问题, 提出了多移动代理行程规划算法(CL-MIP), 从而将多移动代理无线传感器网络的问题划分为以下四个步骤: 1) 计算网络中源节点的密度中心; 2) 以密度中心为圆心, 预定义的半径为圆划定编组范围, 将该圆所覆盖的源节点归为一个编组; 3) 计算每个移动代理访问组内源节点的顺序; 4) 持续迭代直到网络中没有未编组节点, 并行发送多个移动代理数据包。

CL-MIP 为多移动代理行程规划的研究提供了系统结构。作者认为在多个移动代理的行程规划中, 首先需要考虑的是网络中源节点的编组问题。合理而有效的编组可以将多移动代理问题转化为并行的多个单移动代理问题。在CL-MIP 中, 作者模仿了物理学中的重力模型计算源节点的密集程度, 并充分考虑了源节点之间的地理位置关系, 以此作为依据进行编组, 可以有效提高每个移动代理迁移中的融合率。但是在具体的编组步骤中, 关于如何选择合适的编组半径的问题却仍然没有给出完美的方案, 这就导致了编组这一多移动代理中的核心问题的有效性需要更多的验证。本文采用了基于跳数的最小生成树来解决这个问题, 并与CL-MIP 进行比较, 试验结果表明最小生成树可以更有效地编组源节点。

2 问题的描述和定义

如图 1 所示, 我们标记位于中心位置的红色星型节点为数据处理中心, 并认为其拥有无限的能源提供和计算能力。蓝色节点为无线传感器网络中的源节点, 这些节点探测并存储了数据中心所需要的环境信息, 但它们由电池驱动, 计算

能力也十分有限。其它节点为普通的中继传感器节点, 主要用于中继传输移动代理软件包。源节点和中继节点在不同的任务中所扮演的角色是可变的。在一次的任务中, 一到多个移动代理软件包从数据中心被发送到网络中, 然后通过多跳的方法各自访问一部分的源节点, 提取并收集其中的信息, 最后反馈给数据中心。我们研究的目标是 1) 根据源节点的分配情况选择合理的移动代理数量; 2) 从能量的有效性和任务延时方面综合规划移动代理在网络中的行程。

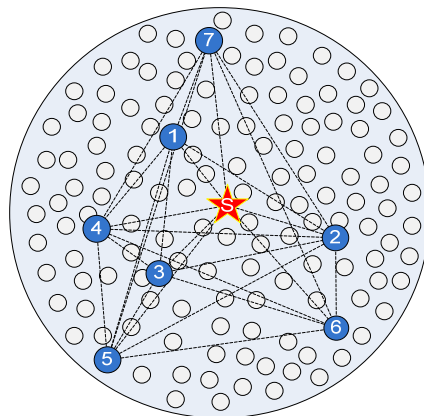


图 1 无线传感器网络中的拓扑结构

我们采用文献[4,8,9-10]研究中相同的假设条件, 即数据中心拥有网络中所有节点的地理信息, 并且已知网络中源节点的数量和位置。图中的虚线部分代表了通过各个源节点的地理路由信息, 以及计算出的各个源节点与数据中心节点之间相互配对的距离。

3 行程规划算法描述

在移动代理系统中, 源节点之间的距离以及它们与数据中心的距离是十分重要的参数, 因为它们与移动代理在各个源节点间迁移时的数据融合率直接相关。此外, 源节点分布的拓扑结构对于行程规划问题而言, 也是至关重要的。因此, 我们以源节点间的距离为出发点, 利用最小生成树的相关性质, 提出了一种有效的无线传感器源节点编组算法(MST-MIP)。

3.1 跳数的预测函数

在自组网中, 由于节点发送数据包时能量的消耗与两个源节点之间的跳数(hops)直接相关, 因此相对于离散量的数值距离而言, 源节点之间的预测跳数可以更精确地反映网络中能量的变化情况。预测跳数可以使用距离与节点无线传播信号半径进行计算, 具体公式如下:

$$H = \frac{D}{R \times \varepsilon}$$

其中, H 为系统预测的两个源节点之间的跳数, D 为两个源节点之间的距离, R 为传感器节点无线信号发射器的最大发送半径, $\varepsilon \in [0,1]$ 为传感器节点无线信号发射的能量控制

² 以及其迭代版本 IEMA

因子。

根据这个公式,我们可以计算出两个源节点之间的预测跳数。预测跳数的集合反映了整个网络中各个源节点之间的相互关系,是多移动代理行程规划编组的重要依据。

3.2 无向全连通图的构建

为了从总体上把握网络的信息,我们由预测跳数的集合构建出一张无向全连通图。如图 2 所示,在这张无向全连通图中,图的顶点集合为网络中的数据中心与各个源节点,而它们之间跳数的预测值则作为全连通图中边的权值。由此,无线传感器网络中的拓扑结构被抽象成具体的数学模型。

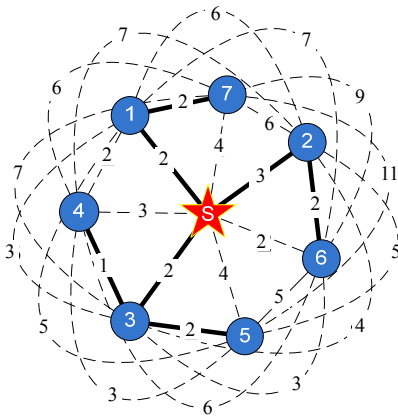


图 2 跳数无向全连通图及其构建的最小生成树

3.3 最小生成树

3.3.1 最小生成树的定义

在一给定的无向图 $G=(V,E)$ 中, (u,v) 代表连接顶点 u 与顶点 v 的边 (即 $(u,v) \in E$), 而 $w(u,v)$ 代表此边的权重, 若存在 T 为 E 的子集 (即 $T \subseteq E$) 且为无循环图, 使得 $\sum w(u,v)$ 的值最小, 则此 T 为 G 的最小生成树^[11]。

3.3.2 最小生成树伪代码

在无向全连通图中有多种构建最小生成树的方法。我们在仿真实验中采用了经典的 Prim 算法来获得最小生成树 (结果如图 2 中黑色实线部分所示), 其伪代码如下:

算法 1 Prim 最小生成树算法

```

1   $T = \emptyset$ 
2   $V = \{\text{Sink}\}$ 
3  while  $\exists (v \notin V)$ 
4  do 找出可以将  $v$  连接到  $T$  的最短边  $(v,u)$ 
5   $T = T \cup (v,u)$ 
6   $V = V \cup v$ 
7  return  $T$ 

```

3.3.3 基于跳数最小生成树的多移动代理编组

如图 3, 跳数全连通图构建的最小生成树 (图 2) 可以用于多移动代理的编组。其中, 移动代理的个数取决于生成

树中数据中心节点向外扩展的边。在图 3 所示的例子中, 3 个移动代理软件包将被同时发往无线传感器网络中提取并收集对应枝干上的源节点数据。其中第一个移动代理将访问源节点 1、7, 第二个移动代理将访问源节点 3、4、5, 而第三个移动代理将访问源节点 2、6。至此, 我们得到了源节点的一种编组方案。

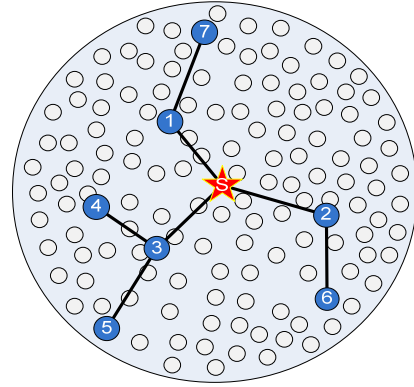


图 3 基于跳数最小生成树的多移动代理编组

3.4 最小生成树编组的优化

按照现有的生成树编组策略,我们可以根据源节点之间跳数的多少进行能量的移动代理分配。但是,由于最小生成树算法采用了简单的贪心策略,在源节点密度较大的情况下,编组结果容易生成一棵单枝树,即所有的源节点都被编入同一个组,此时将多移动代理问题转化为了单移动代理问题,又带来了较大的端对端延迟。与之相反的是,一些距离数据中心相对较近的源节点在最小生成树的构建中很容易与数据中心相连接,从而导致移动代理个数的剧增。因此,在考虑能量和任务延迟权衡时,源节点与数据中心的跳数应当被计算在内。

为了实现这一目标,我们在计算全连通图权值的过程中采取了优化算法。

具体如下: 假设两个源网络节点 i,j 的相距跳数为 d_{ij}^j , 它们与数据中心的跳数分别为 d_s^i 和 d_s^j 。则有

$$w = \alpha \times d_{ij}^j + (1 - \alpha) \times (d_s^i + d_s^j)$$

其中 w 为全连通图中的权值, $\alpha \in [0,1]$ 为权衡因子。由于权衡因子 α 可以调整两源节点之间跳数与它们到数据中心跳数的比例,从而影响最小生成树的分支情况,编组算法系统可以借此平衡能量消耗与任务延迟之间的关系。这种通过灵活可控的手段生成的全连通图的权值使得算法对于任务目标具有更强的适应性。

3.5 源节点的访问顺序

经过上节的编组之后,每个最小生成树的分支所对应的源节点将由相对应的一个移动代理进行访问。此时,多移动代理的行程规划问题就转化为了多个独立的单移动代理问题。为了在之后的仿真中更好地与之前的工作^[4]进行分组性能对比,我们在实现中同样采用了 IEMF^[8]为单移动代理提

供源节点访问顺序的规划。

4 仿真与结果分析

4.1 仿真配置

我们采用文献[4,8-10]中的仿真模型,在 OPNET Modeler 中配置环境并进行实验来验证算法的有效性。

我们创建一个大小为 1000m×500m 的检测区域并在该区域中布置 800 个无线传感器节点以保障覆盖密度。所有的传感器节点一律采用 802.11b 标准收发无线信号。数据中心节点位于场景的正中央,拥有无限的电力和计算能力,其他无线传感器节点则配有电容量为 5 Joules 的电池,且设定其发送、接受以及空闲状态时的功率分别为 0.66w, 0.395w 和 0.035w。

在每次仿真中,不同的随机种子任意选择制定数量的传感器节点作为取得侦测数据的源节点,数据中心节点根据行程规划算法发送移动代理数据包,并通过多跳的方式依次访问网络中的各个源节点,对源节点中侦测的数据进行提取压缩、数据融合后并入移动代理数据包,从而将无线传感器网络侦测所得的数据携带后返回数据中心。其中,移动代理原始代码长度、源节点原始数据长度、数据提取压缩率、数据融合率以及移动代理在源节点中进行以上处理所需延时等参数设置如表格 1 所列:

表 1 移动代理的仿真参数

数据提取压缩率	0.8
源节点间数据融合率	0.9
源节点原始数据长度	2048 bits
移动代理原始代码长度	1024 bits
移动代理数据处理延迟	10 ms
数据处理速率	50 Mbps

4.2 评价标准

为了评价算法优劣,我们提出以下 3 个评价标准:

1) 能量消耗:在仿真中,我们记录所有传感器节点在移动代理任务处理以及无线通讯中的能量消耗情况作为算法是否能有效节省网络能量的一个评价标准。

2) 任务延迟:从第一个移动代理发送到网络中开始,到最后一个移动代理返回数据中心的这个时间区间,我们记录为任务延迟。任务延迟是评价算法性能的一个重要参数。

3) 能量延迟积 (EDP):通过对权衡因子 α 的控制灵活应对不同的应用需求是本文算法的重要特点。但是出于量化评价的考虑,我们有必要设定一种特定的应用。在一些具体的现实应用^[12]中,网络中能量的有效性和任务的延迟都是需要保障的,这就要求我们必须兼顾二者。能量延迟积 (EDP) 计算了能量和任务延迟的乘积,综合考虑了能量和延迟的表现,可以作为评定算法综合性能的标准。

4.3 权衡因子 α 的测量和选定

为了在能量与延迟之间取得权衡,我们在 3.4 小节中引入了权衡因子 α 。因此在仿真中,我们应该首先考察 α 的取

值对于所提出算法各方面性能的影响。我们设置 15 个源节点的场景,采用大量的随机种子来模拟能量、延迟以及 EDP 随着 α 改变产生的影响。

从图 4(a)和图 4(b)中可以看出,当 α 小于 0.5 时,网络中能量消耗一直维持在较高水平而任务延迟却是最小的,这是因为在无向连通图中的权值计算时,源节点与数据中心的距离占据了过大的比重。这一极端条件导致了在最小生成树的构建中,所有源节点都与数据中心连接,即,在多移动代理编组后,数据中心为每一个源节点分配了单独对应的一个移动代理。显然,此时的任务延迟可以被降低到最小。但是由于移动代理的数据融合的优点没有完全发挥,其能量消耗必然维持在一个较高的水平。值得注意的是,当权衡因子大于 0.5 之后,网络中能量消耗随着权衡因子的增大而逐渐减小,与此同时任务的延迟却逐渐增大。这一趋势在 α 接近 1.0 的过程中趋于平缓。图中的曲线趋势充分说明了能量消耗与任务延迟之间的反比关系。从而,我们可以通过调整权衡因子 α 得到所需的多移动代理行程规划算法。

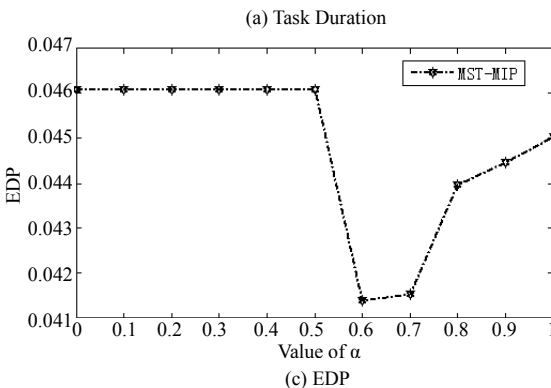
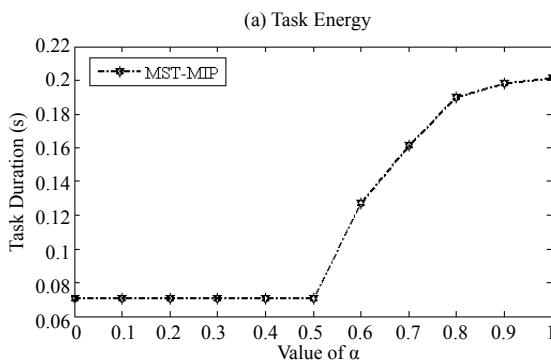
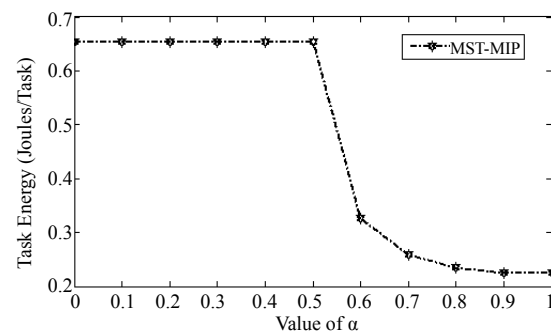


图 4 能量消耗、任务延时和 EDP 与平衡因子 α 的对应关系

在上一小节中,我们提出用能量延迟积 EDP 作为一种综合性能指标,因此在实验中我们需要考察 EDP 与权衡因子 α 的对应关系。很显然,既然能量消耗与任务延迟分别是递增与递减的关系,那么作为二者综合性能体现的 EDP 数值必然存在一个最优解。从图 4(c)的曲线中我们可以观察到,当权衡因子的取值小于 0.5 的时候,EDP 性能保持不变,这与能量消耗和任务延迟在这一区间的稳定是直接相关的。而当权衡因子的数值持续增大直到 0.6 的过程中,EDP 数值持续减小,这意味着算法的综合性能得到了持续的提高。然而当权衡因子继续增大直到最终为 1.0 的变化过程中,EDP 数值却转而增大,这意味着算法性能的下降。因此,我们可以得知当权衡因子为 0.6 时,所提出的算法在 EDP 综合性能方面可以达到最佳。

4.4 MST-MIP 与 CL-MIP 的性能对比

在本小节中,我们针对能量延迟综合(EDP)性能高的应用设计了大规模的仿真实验来对比 MST-MIP 与之前的 CL-MIP 算法优劣性。根据上一节的结论,为了获得较好的 EDP 性能,我们选择 0.6 作为权衡因子 α 的值。此外,为了考察算法对于源节点规模情况的反应,我们选择了源节点个数从 5 到 35 个的 7 种场景。每个场景中每个源节点的位置均由随机种子生成,同一场景由不同的多个随机种子进行试验,并最终求得平均值。

如图 5(a)和图 5(b)所示,MST-MIP 和 CL-MIP 的能量消耗和任务延迟都随着源节点数的增多而逐渐增大。这是因为源节点数量的增多必然导致移动代理需要完成更多的数据采集任务,在网络中能量的消耗和所经路程都会随之增加。此外我们可以很明显的看到,在权衡因子设定为 0.6 的条件

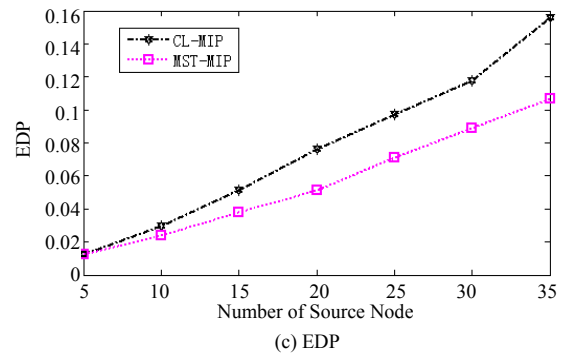
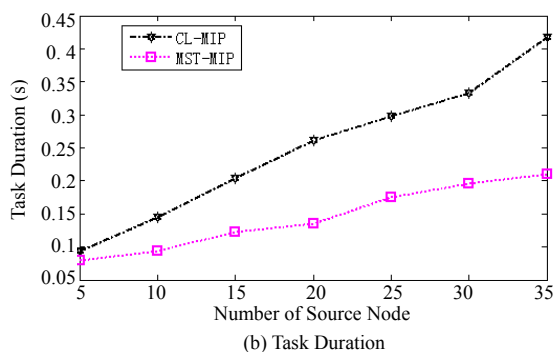
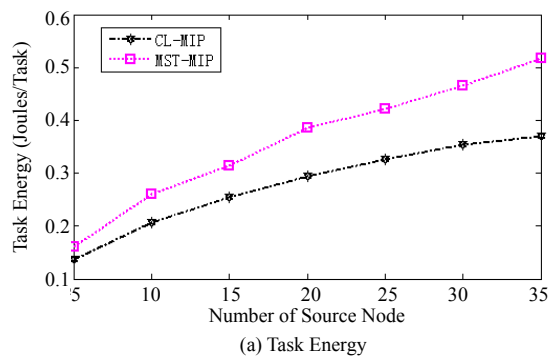


图 5 能量消耗、任务延迟和 EDP 的变化趋势

下, MST-MIP 算法在任务延迟方面总体要优于 CL-MIP 算法,但是在能量的消耗方面却不如 CL-MIP 有效。这种性能上的权衡我们已经在上一小节中提过。而图 5(c)描述的最为重要的 EDP 综合性能方面,由于在我们设定的应用方案中, MST-MIP 针对能量延迟乘积进行了优化,因此在各种源节点数量变化的场景中, MST-MIP 算法的 EDP 值均小于 CL-MIP,亦即达到了更好的综合性能。

5 结论

基于多移动代理的无线传感器网络可以在降低网络中能量消耗的同时保障可接受的任务延迟。行程规划是多移动代理设计中最基础的一个问题。相对于之前的工作,本文提出了一种基于跳数最小生成树分组的多移动代理形成规划算法(MST-MIP)。该算法通过适当调节权衡因子 α 实现能量消耗和任务延迟的权衡。大规模的 OPNET 仿真实验表明, MST-MIP 算法比现有的多移动代理形成规划算法具有更优秀的综合性能。

参考文献:

- [1] IF Akyildiz, W Su, Y Sankarasubramaniam, E Cayirci. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks (S1389-1286), 2002, 38(4): 393-422.
- [2] M Chen, S Gonzalez, V Leung. Applications and design issues for mobile agents in wireless sensor networks [J]. Wireless Communications (S1530-8677), IEEE, 2007, 14(6): 20-26.
- [3] P Dasgupta, N Narasimhan, L E Moser, P M Melliar-Smith. MAGNET: mobile agent for networked electronic trading [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (S1041-4347), 1999, 11(4): 509-525.
- [4] M Chen, S Gonzalez, Y Zhang, V C Leung. Multi-agent itinerary planning for sensor networks [C]// Proceedings of the IEEE 2009 International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness (QShine 2009), Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2009. USA: IEEE, 2009.
- [5] Min Chen. OPNET Network Simulation [M]. ISBN 7-302-08232-4. Beijing, China: Press of Tsinghua University, April, 2004: 352.
- [6] Hairong Qi, Feiyi Wang. Optimal Itinerary Analysis for Mobile Agents in Ad Hoc Wireless Sensor Networks [C]// Proc. IEEE ICC, July 2001. USA: IEEE, 2001.
- [7] Q Wu, N S V Rao, J Barhen, S S Iyengar, V K Vaishnavi, H Qi, K

- Chakrabarty, S Member, S Member. On computing mobile agent routes for data fusion in distributed sensor networks [J]. IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering (S1041-4347), 2004, 16(6): 740-753.
- [8] Min Chen, Victor Leung, Shiwen Mao, Taekyoung Kwom, Ming Li. Energy- efficient Itinerary Planning for Mobile Agents in Wireless Sensor Networks [C]// IEEE International Conference on Communications (ICC '09), Dresden, Germany, June 2009. USA: IEEE, 2009.
- [9] M Chen, T Kwon, Y Yuan, V C Leung. Mobile agent based wireless sensor networks [J]. Journal of Computers (S1796-203X), 2006, 1(1): 14-21.
- [10] M Chen, T Kwon, Y Yuan, Y Choi, V C M Leung. Mobile agent-based directed diffusion in wireless sensor networks [J]. EURASIP J. Appl. Signal Process (S1687-0433), 2007, 2007(1): 219-219.
- [11] RL Graham, P Hell. On the history of the minimum spanning tree problem [J]. Annals of the History of Computing (S1058-6180), 1985, 7(1):44-57.
- [12] Ian F Akyildiz, Tommaso Melodia, Kaushik R Chowdhury. A survey on Wireless Multimedia Sensor Networks [J]. Computer Networks (S1389-1286), 2007, 51(4): 921-960.