软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2012,23(11):2946−2954 [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04306]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

无线传感器网络 Agent 数据分流策略*

胡晓敏+

(中山大学 信息科学与技术学院 计算机科学系,广东 广州 510006)

Agent Data Separation Strategy for Wireless Sensor Networks

HU Xiao-Min+

(Department of Computer Science, School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

+ Corresponding author: E-mail: xmhu@ieee.org

Hu XM. Agent data separation strategy for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2012,23(11): 2946−2954 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4306.htm

Abstract: Mobile agents (MA) have been widely applied in detecting abnormal events in wireless sensor networks. Based on the characteristics of the event, the data center (i.e., the sink) sends a specific MA to collect the data sensed by the sensors (acted as source sensors) in the nearby area of the target event. Different from the traditional client-server transmission model, the MA technology can compress and aggregate the sensed data and reduce the amount of data and the energy consumption of sensors for data transmission. When MA passes more source sensors, the size of the collected data becomes larger. This paper investigates the existing MA itinerary planning algorithms, and proposes an agent data separation strategy. The strategy can determine whether to send the collected data to the sink in advance based on a data separation rule. If data separation is performed, the data collected by the MA will be sent to the sink, while the MA only with the head will continue visiting the rest source sensors. Because the data carried by the MA is reduced, the proposed agent data separation strategy conserves the energy consumption of sources sensors. The strategy is a general scheme and can be applied in most of the existing MA itinerary planning algorithms to enhance their performance. The ultimate goal of the proposed strategy is to reduce the data transmitted by source sensors and extend their working lifetime for monitoring the targets.

Key words: wireless sensor network; agent; data transmission; data separation; mobile agent

摘 要: 移动 Agent(mobile agents,简称 MA)技术在无线传感器网络的异常事件监测中广泛应用.基于异常事件的性质,数据中心(即 sink 点)派出实现特定功能的 MA 到异常目标位置附近收集传感器节点(数据源节点)的感应监测数据.与传统的客户端-服务器传输模型不同,MA 技术往往能够对收集到的感应数据进行压缩和融合,从而大大减少了在网络中传播的数据流量,降低了数据传输的能量消耗.通常情况下,MA 经过的源节点越多,其收集的数据量越大.通过对目前已有的 MA 行程规划算法进行研究,提出了实现 Agent 数据分流的传输技术.该技术基于分流规则,决定是否提前把 MA 已收集到的数据传回 sink,而不携带数据的 MA 继续访问余下的传感器节点.该 Agent 数据分流技术解决了由于 MA 携带大量数据访问源节点而造成的源节点能量消耗过快的问题,适用性强.大多数目前常用

* 基金项目: 国家自然科学基金(61202130); 中国博士后科学基金(2012M510208); 中央高校基本科研业务费专项资金(12lgpy47); 广东省自然科学基金(S2012040007948)

收稿时间: 2012-06-11; 定稿时间: 2012-08-21

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

的 MA 行程规划算法都可以采用该技术来提高性能.Agent 数据分流的最终目标是减少源节点传输的数据量,尽可能地延长源节点的工作寿命,从而更长时间地实现对异常目标的监控.

关键词: 无线传感器网络;agent;数据传输;数据分流;移动代理

中图法分类号: TP18 **文献标识码**: A

无线传感器网络[1]由分布在监控区域中具有感应监控能力和无线数据传输功能的传感器节点组成,传感器节点通过无线传输的方式把收集到的感应数据传送到远处的数据接收中心(又称为 sink 节点).Sink 节点对接收到的数据进一步进行处理.无线传感器网络技术广泛用于军事、环境监测、安全监测等领域,特别是在大范围的无人监控环境中,与传统的有线网络相比,无线传感器网络的部署更加灵活而且费用低廉.传感器由电池供电,一个无线传感器网络上部署的传感器节点的数量通常成百上千,由飞机空投至待监控的区域,因此无法为传感器更换电池.如何最大限度地利用传感器有限的能量,使无线传感器网络具有尽可能长的工作寿命,是无线传感器网络研究的热点[2].

目前,传感器网络已经从最初的同构型网络,即所有传感器节点的功能相同,发展到异构型网络,即传感器节点可以具有不同的传输范围和数据处理功能[3−5],这些都为进一步实现智能无线传感器网络奠定了技术基础.移动 Agent(mobile agent,简称 MA)数据传输正是无线传感器网络实现智能化的一种新型技术.传统的客户端-服务器数据传输模型实现了传感器感应数据转发到 sink 节点的功能.然而,这些数据在网络中传输时通常没有进行压缩,也没有利用数据之间的相关性来减少数据量,这些原始的数据流造成了传感器能量的浪费.为了减小网络中传输的数据流量,实现对感应数据的压缩和融合,sink 节点派出 MA,它们根据 sink 设计好的移动方式,在经过的传感器上实现数据的压缩和融合.Konstantopoulos 等人[6]综述了无线传感器网络中的数据融合技术,并把这些技术归结为 4 类:集簇、链式、树状和基于 MA 的方法,而基于 MA 方法是目前的研究热点之一.另一方面,通过 MA 携带控制数据,可以实现对经过的传感器的工作方式和实现功能的调整和更新,使得传感器可以更好地实现所要求的功能,为扩展传感器的功能提供了有效的途径,有助于实现传感器节点的工作智能化.

MA 实际上由头部控制代码和地址信息及其携带的数据组成.Min 等人[7,8]把无线传感器网络的 Agent 设计分为 4 个部分,分别是架构、行程规划、中间系统设计和 Agent 协作.行程规划是 MA 数据传输的技术核心,因为它是 MA 的最佳移动路线的优化问题,涉及到传感器节点的能量消耗、数据传输延迟和丢失率等因素,对网络的工作寿命和数据传输的可靠性等方面有重要影响.然而,该问题已被证明是 NP-难的问题[9].为了更好地利用 MA 数据传输技术满足应用需求,人们提出了多种方法.本文提出的 Agent 数据分流传输技术正是对目前已有方法的进一步提高,适用于多种已有的 MA 行程规划算法.下面先介绍目前常用的 MA 行程规划算法,然后介绍本文的 Agent 数据分流传输技术.

1 移动 Agent 数据传输技术

无线传感器网络主要用于对监控区域内的目标实现监控,移动 Agent(MA)是一段可以实现自治功能的代码,从 sink 出发抵达监控目标附近的传感器节点,实现 sink 指定的数据收集任务,然后携带数据返回 sink.监控区域内的目标往往可被看作异常的事件,一旦异常情况出现,就会触发异常目标附近的传感器节点通知 sink 节点,由 sink 做出决策,派出 MA 实现主动监测和响应处理事件.因此,MA 是实现智能响应和处理的有效手段.通常,传感器越接近异常目标,对该目标的感应信号强度(signal strength)(即信号能量值(signal energy))就越大.把超过预定阈值的信号能量值的传感器节点作为生成感应数据的源节点[10].它们负责监控目标,MA 从 sink 出发逐个访问这些感应数据源节点,并把数据带回 sink,以便作进一步的处理.MA 移动的行程规划就是要找出最佳的路径,从 sink 出发逐个访问这些数据源节点,其间,MA 会以其他传感器作为传输中继,最终把数据带回 sink,如图 1 所示.

图 1 中,三角符号代表 sink 节点.在 sink 的远处出现一个监控目标,其周围某个范围内的传感器节点的信号能量值超出阈值,这些传感器作为负责感应目标获取感应数据的源节点,而监控区域内的其他传感器可以参与

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

作为中继节点.当 sink 获知目标出现时,它派出 MA 按照规划的行程路径去访问源节点收集数据.这条行程路径的好坏将影响到 MA 所经过的传感器的能量消耗量及其工作寿命的长度.实际上可以把该行程分为 3 段(如图 2 所示):第 1 段由从 sink 出发直到获取感应数据的第 1 个源节点前 MA 经过的传感器节点组成,第 2 段从获取感应数据的第 1 个源节点出发直到抵达最后一个获取感应数据的源节点期间经过的传感器节点,第 3 段就是从离开最后一个获取感应数据的源节点后抵达 sink 之前经过的传感器节点组成.注意,图 2 中右端的 sink 实际上就是左端的 sink,图中只是把起始与终止于 sink 的回路拉开为一条链,以便于描述.此外,上述描述中强调了是获取感应数据的源节点,而不是笼统地说源节点.这是由于 MA 在移动过程中,有可能在抵达第 1 个源节点时并不获取感应数据,而是先访问其他源节点获取感应数据,此时经过的第 1 个源节点应属于第 1 段(只作为中继点),待以后(即第 2 段时)才再次到达该源节点获取感应数据,具体与采用的 MA 行程规划算法有关.下面将介绍目前较为常用的 MA 行程规划算法.

Fig.1 An example of MA itinerary

图 1 MA 移动行程实例

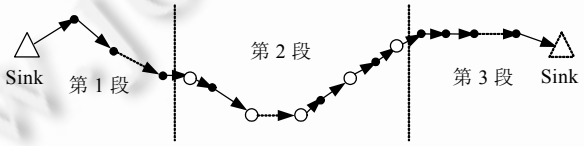

Fig.2 An example of the three steps of MA itinerary

图 2 MA 的移动行程 3 段图示

最初的 MA 行程规划是由文献[11]提出的本地最近优先(LCF)和全局最近优先(GCF)启发式方法.它们都基于网络中的传感器节点组成的完全图,得到 sink 与源节点之间、源节点与源节点之间的最短路径.LCF 方法从 sink 出发,每次都选择与 MA 当前点最近的未访问源节点作为下一访问点.由于 LCF 只考虑最近的点,往往忽略源节点分布的全局性,因而经常出现 MA 从最后访问的源节点返回 sink 时耗费更多能量.而 GCF 方法每次都选择最接近 sink 的未访问源节点作为下一访问点,这样会导致 MA 移动的跨度大,得到的移动路径互相交叠.测试结果表明,LCF 的性能要优于 GCF.文献[9]提出利用遗传算法优化 MA 的移动行程,然而该方法依赖于目标函数和编码的策略,运行效率比其他方法要低.文献[10]设计了无线传感器网络中信息传输的数据报文和数据表,并基于传感器节点的数据通信的能耗,比较采用哪一个源节点作为第 1 个访问点能够得到最佳的行程能耗.以上介绍的算法的共同特点是:基于完美的数据融合模型,都假设 MA 头部及其携带的数据大小固定,访问更多源节点获取感应数据只会提高数据包含的精度,但数据量大小不变.

然而很多情况下都是随着 MA 移动收集数据,MA 携带的数据量变得越来越大.文献[7]给出了一个用于 MA 行程规划的算法框架,MA 在移动过程中会不断增大.该文献提出了行程能量最小的第一源选择(IEMF)算法,对每一个源节点测试其作为第 1 个获取感应数据的源节点时所能得到的最小能量代价,并找出最优的源节点作为第 1 个访问点,而第 1 个源节点后的点的访问行程都基于 LCF 确定.该文献还进一步提出了 IEMF 算法的迭代版本——行程能量最小算法(IEMA),可以迭代地对第 2 次、第 3 次、…、第 k 次选择下一最佳源节点.为了降低 MA 数据传输的延迟和减少每个 MA 需要收集的数据量,sink 可同时派出多个 MA,负责对不同的源节点进行数据收集,这就是多 MA 行程规划(MIP)算法.代表性算法有 CL-MIP[12],DSG-MIP[13],BST-MIP[14],MST-MIP[15]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

和 TBID 算法[6]等.这些方法制定出对源节点进行分组的策略,每个组派出一个 MA 进行访问.因此,无论是针对单个 MA 行程规划(SIP)的算法,还是 MIP 算法,都是实现 MA 对源节点的行程规划问题.本文将基于文献[7]中的数据融合模型,提出新型的 Agent 数据分流技术,以进一步提高目前已有算法的性能.

2 MA 行程规划中的融合与能量消耗模型

在制定 MA 的行程规划时,需要根据数据融合模型的特点进行设计.下面将介绍本文采用的数据融合模型和能量消耗模型.

2.1 数据融合模型

由于 MA 主要由头部(包含控制代码和地址信息)及其携带的数据组成,一开始从 sink 发出的 MA 只具有头部信息,其大小用 s 表示.在 MA 到达获取感应数据的第 1 个源节点之前,MA 的大小不变,经过的传感器节点充当数据中继的角色,这是由于传感器的传输半径有限,远距离传输需要采用多跳中继的方式.没有携带任何收集的数据的 MA 到达获取感应数据的第 k 个源节点后,通过收集该源节点的感应数据,MA 的大小变为

$$l_{\mathrm{ma}}^{(k)}=s+l^{(k)}=s+(1-r^{(k)})l_{\mathrm{rd}}^{(k)} \tag{1}$$

其中,$l^{(k)}$表示 MA 经过第 k 个获取感应数据的源节点后除头部外携带的有效数据量;$l_{\mathrm{rd}}^{(k)}$ 表示该源节点的原始感应数据量;$r^{(k)}$表示 MA 对该源节点的原始感应数据的压缩率,$0\leqslant r^{(k)}<1,k\in\{1,2,\ldots,n\}$,$n$ 表示源节点个数.对原始数据的压缩可以看作 MA 根据其被分配的任务抽取出要收集的数据信息,因此,MA 携带的数据量一般小于原始感应数据的大小.此时 MA 没有数据融合的操作,因为在收集该源节点的数据前,MA 只有头部数据.然而,当携带有收集的数据的 MA 访问后续的获取感应数据的源节点时,不但收集该源节点上的感应数据,而且把新数据与原有数据进行融合,此时,MA 的大小变为

$$l_{\mathrm{ma}}^{(k)}=s+l^{(k)}=l_{\mathrm{ma}}^{(k-1)}+(1-\rho^{(k)})(1-r^{(k)})l_{\mathrm{rd}}^{(k)} \tag{2}$$

其中,$\rho^{(k)}(0\leqslant\rho^{(k)}\leqslant 1)$为 MA 对该源节点的感应数据的融合率.从上式可以看出,随着 MA 的移动,其携带的数据量不断增加,数据融合率和压缩率越高,数据量的增长速度越慢.

2.2 能量消耗模型

基于上述数据融合模型,可以估算出参与数据传输的传感器节点在 MA 访问后的能量消耗.先给出符号 $e_{\mathrm{rec}},e_{\mathrm{tran}},e_{\mathrm{sen}},e_{\mathrm{agg}}$ 分别代表接收、发送、感应、融合单位数据量的能耗.通常对于同一类型的传感器,其各种操作的单位数据能耗相同,因此为了表达更为简洁,此处没有对不同的传感器作上标区分.假设传感器节点的数据传输半径固定,那么传感器传输数据到半径范围内的其他节点消耗自身的能量相同.

对于中继节点,由于接收和发出的数据量相同,因此其能耗为

$$E=(e_{\mathrm{rec}}+e_{\mathrm{tran}})l \tag{3}$$

其中,l 表示该节点接收和发出的数据量.

对于被 MA 收集感应数据的源节点,如果当前 MA 只有头部信息,那么访问的该第 k 个获取感应数据的源节点的能耗为

$$E=e_{\mathrm{rec}}s+e_{\mathrm{sen}}l_{\mathrm{rd}}^{(k)}+e_{\mathrm{tran}}l_{\mathrm{ma}}^{(k)} \tag{4}$$

其中,$e_{\mathrm{rec}}s$ 表示该传感器节点接收 MA 头部信息的能耗,$e_{\mathrm{sen}}l_{\mathrm{rd}}^{(k)}$ 表示获取数据量为 $l_{\mathrm{rd}}^{(k)}$ 的感应数据的能耗.MA 对感应的原始数据进行压缩,压缩后连同头部的数据量为 $l_{\mathrm{ma}}^{(k)}$,将被发送到下一接收方.携带数据的 MA 访问该第 k 个获取感应数据的源节点的能耗为

$$E=e_{\mathrm{rec}}l_{\mathrm{ma}}^{(k-1)}+e_{\mathrm{sen}}l_{\mathrm{rd}}^{(k)}+e_{\mathrm{agg}}(1-r^{(k)})l_{\mathrm{rd}}^{(k)}+e_{\mathrm{tran}}l_{\mathrm{ma}}^{(k)} \tag{5}$$

其中,$e_{\mathrm{rec}}l_{\mathrm{ma}}^{(k-1)}$ 表示接收 MA 的能耗.MA 根据传感器收集到的数据(数据量为 $(1-r)l_{\mathrm{rd}}^{(k)}$)与自身携带的数据进行比较实现数据融合,处理后的数据量 $l_{\mathrm{ma}}^{(k)}$ 将被发送到下一接收方.

以上分析可知,传感器节点的能耗与经过其自身的数据量大小密切相关.由于 MA 携带的数据量逐渐增大,

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

越到后期,访问的传感器节点接收和传输 MA 所消耗的能量就越大.

3 Agent 数据分流传输技术

目前已有的MA行程规划算法往往只考虑源节点的总能量消耗,而没有考虑MA数据传输过程中对源节点的工作寿命的影响.源节点的工作寿命就是最快耗尽自身能量的源节点对应的持续时间,其值与单位时间内处理的数据量大小成反比.由于源节点关系到对目标的监控,要尽可能地延长源节点的工作寿命才能更好地对目标实现监控.由于 MA 携带的数据量逐渐增大,如果能够在某种情况下把 MA 携带的数据发回给 sink,而一个仅带有头部的 MA 继续访问余下的源节点,将有助于减少经过余下源节点的数据流量.下面先从一个例子着手,进而进一步分析什么情况下实现数据分流是有效的.

3.1 一个例子

假设所有点的初始能量值都相同,如图 3(a)所示,当前携带数据的 MA 在点 k,下一步要访问源节点 k+1 获取数据,那么该 MA 对点 k+1 产生的能量消耗值为

$$E_{k+1}=e_{\mathrm{rec}}l_{\mathrm{ma}}^{(k)}+e_{\mathrm{s}}+e_{\mathrm{g}}+e_{\mathrm{tran}}[l_{\mathrm{ma}}^{(k)}+(1-\rho^{(k+1)})l_{\mathrm{data}}] \tag{6}$$

其中,$l_{\mathrm{ma}}^{(k)}$ 为从点 k 移到点 k+1 的 MA 大小;$e_{\mathrm{s}}=e_{\mathrm{sen}}l_{\mathrm{rd}}^{(k+1)}$ 表示点 k+1 感应消耗的能量;$e_{\mathrm{g}}=e_{\mathrm{agg}}l_{\mathrm{data}}$ 表示实现数据融合消耗的能量,$l_{\mathrm{data}}=(1-r^{(k+1)})l_{\mathrm{rd}}^{(k+1)}$. $[l_{\mathrm{ma}}^{(k)}+(1-\rho^{(k+1)})l_{\mathrm{data}}]$ 表示源节点 k+1 发送的数据量.点 k+1 的寿命与其单位时间内需要处理的数据量成反比,单位时间内处理的数据量越大,节点的能量消耗就越快,寿命也就越短.

为了延长源节点的工作寿命,减少其数据传输负载,本文提出 Agent 数据分流的思想.其核心是利用其他节点传输数据,减少经过源节点的数据量,从而延长源节点的工作寿命.如图 3(b)所示,去掉 MA 头部的点 k 的数据流量经过点 j 传输,而只有 MA 的头部被传输到点 k+1(图中线段的粗细反映数据量的大小),那么分流后,该 MA 对点 k+1 产生的能量消耗值为

$$E'_{k+1}=e_{\mathrm{rec}}s+e_{\mathrm{s}}+e_{\mathrm{tran}}(s+l_{\mathrm{data}}) \tag{7}$$

其中,源节点 k+1 接收来自点 k 的 Agent 头部数据流量 s.由于该 MA 没有携带感应数据,无法与源节点 k+1 中的感应数据进行数据融合,因此,源节点对外传输的数据流量为(s+l_{data}).为了让分流有效,要求无分流情况下,该 MA 对源节点 k+1 产生的能量消耗值比分流后对源节点 k+1 产生的能量消耗值大,即满足

$$E_{k+1}>E'_{k+1} \tag{8}$$

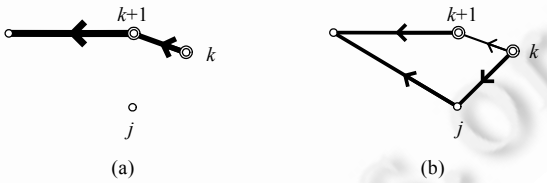

Fig.3 An example of MA traffic partition

图 3 MA 分流模型示例

经过化简,可以得到关系式:

$$l_{\mathrm{ma}}^{(k)}>s+\frac{\rho^{(k+1)}e_{\mathrm{tran}}l_{\mathrm{data}}-e_{\mathrm{g}}}{e_{\mathrm{rec}}+e_{\mathrm{tran}}} \tag{9}$$

由于 e_{g}=$e_{\mathrm{agg}}l_{\mathrm{data}}$ 和 $l_{\mathrm{data}}=(1-r^{(k+1)})l_{\mathrm{rd}}^{(k+1)}$,上式可进一步表示为

$$l_{\mathrm{ma}}^{(k)}>s+\frac{\rho^{(k+1)}e_{\mathrm{tran}}-e_{\mathrm{agg}}}{e_{\mathrm{rec}}+e_{\mathrm{tran}}}(1-r^{(k+1)})l_{\mathrm{rd}}^{(k+1)} \tag{10}$$

在满足公式(10)的条件下,采用分流策略可以延长源节点 k+1 的工作寿命.也就是说,每一个传感器都有一个阈值,当数据量大于该阈值时,分流是有效的.特别地,在所有传感器单位时间的感应数据量、数据压缩率、融

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

合率都相同的情况下,该阈值是一个常数.

3.2 Agent数据分流传输规则

公式(10)给出了采用分流策略可以延长下一个源节点寿命的一个基本条件,而被去掉 MA 头部的数据(即被分流的数据)将沿着最优的路径传输到 sink 节点.然而,这条最优路径上有可能以源节点作为数据传输的中继节点,从而额外消耗了源节点的能量.因此,是否执行数据分流还需要判断该附加条件.综上所述,为了延长源节点工作寿命、最小化能耗最大的源节点所消耗的能量,Agent 实现数据分流传输的判断规则归结如下:

步骤 1. 判断当前 MA 所在的第 k 个源节点需要发送的数据量是否满足公式(10):如果是,则转步骤 2;否则,不分流.

步骤 2. 按照公式(6)计算在不分流情况下,MA 对点 k+1 产生的能量消耗值 E_{k+1}.

步骤 3. 检查如果实现数据分流,分流的不含 MA 头部数据 $l^{(k)}$沿最优路径到达 sink 节点时,沿途是否会以源节点作为中继节点:如果没有,则转步骤 5;否则,估算作为中继节点的源节点(设为点 i)的能耗:

如果 MA 在访问第 k+1 个源节点前已经获取了源节点 i 的数据,那么采取分流下源节点 i 的能耗估计值为

$$E_i' = E_i^{(\mathrm{prev})} + (e_{\mathrm{rec}} + e_{\mathrm{tran}})l^{(k)} \tag{11}$$

其中, $E_i^{(\mathrm{prev})}$ 表示源节点 i 在 MA 访问第 k+1 个源节点之前的能耗,$(e_{\mathrm{rec}}+e_{\mathrm{tran}})l^{(k)}$表示源节点 i 中继传输分流数据 $l^{(k)}$的能耗.

如果 MA 还没有经过该源节点 i,那么 $E_i^{(\mathrm{prev})} = 0$. 但由于 MA 往后一定会经过该源节点 i 而携带的数据量当前还不能确定,因此该源节点 i 的估计能耗还需要加上其在往后 MA 访问时的最低能耗估计值:

$$(e_{\mathrm{rec}}s + e_{\mathrm{sen}}l_{\mathrm{rd}}^{(i)} + e_{\mathrm{agg}}(1-r^{(i)})l_{\mathrm{rd}}^{(i)} + e_{\mathrm{tran}}(s + (1-r^{(i)})l_{\mathrm{rd}}^{(i)})),$$

即 MA 只带有头部数据访问时的能耗.此时,该作为中继节点的源节点的能耗估计值为

$$E_i' = (e_{\mathrm{rec}} + e_{\mathrm{tran}})l^{(k)} + (e_{\mathrm{rec}}s + e_{\mathrm{sen}}l_{\mathrm{rd}}^{(i)} + e_{\mathrm{agg}}(1-r^{(i)})l_{\mathrm{rd}}^{(i)} + e_{\mathrm{tran}}(s + (1-r^{(i)})l_{\mathrm{rd}}^{(i)})) \tag{12}$$

步骤 4. 如果分流后该中继节点的估计能耗小于不分流情况下第 k+1 个源节点的能耗,即满足 $E_i' < E_{k+1}$,那么转步骤 5;否则,不分流.

步骤 5. 在第 k 个源节点处实现数据分流.

从上述分流规则可以看出,实现分流的前提是既能减少 MA 经过源节点时对源节点的能量消耗(步骤 1),又能避免分流的数据对源节点造成更大的能量消耗(步骤 2~步骤 4).

3.3 网络能耗与延迟

采用 Agent 数据分流技术后,当满足分流规则时,由传感器提取 MA 携带的数据并将该数据传送到 sink 节点,让仅剩下头部信息的 MA 继续移动到下一节点.这样,一方面可以减少 MA 携带的数据流量对下一个源节点的影响,另一方面也可以让 sink 提前获得 MA 收集的部分数据.实际上,Agent 分流技术对 MA 的移动路径没有任何影响,MA 仍然要按照设定的行程路径逐个访问源节点,因此,本文提出的 Agent 分流技术广泛适用于基于 MA 携带的数据不断增大的融合模型下的 MA 行程规划算法,从而延长源节点的工作寿命.MA 的传输延迟主要基于 MA 的行程路径,与在 sink 执行的 MA 行程规划算法过程无关.因此,是否采用 Agent 分流技术对传输延迟没有实质性影响.本文提出的 Agent 数据分流传输技术在 MA 行程规划算法中的执行流程如图 4 所示.

4 实验与测试

从以上分析可知,本文提出的Agent数据分流传输技术可广泛用于目前已有的单MA行程规划(SIP)算法和多 MA 行程规划(MIP)算法.然而需要注意的是,本文提出的 Agent 数据分流传输技术不适用于要求 MA 头部及其携带数据大小固定的情况,如文献[9,10].为了对本文提出的技术进行测试,假设传感器网络部署在一个无障碍的平坦监控区域内,传感器的工作参数见表 1.在区域中随机部署大量传感器节点,当监控区域内出现监控目标时,位于监控目标某个范围内的传感器节点(如图 1 所示监控目标的邻域内)对该目标的感应信号强度超过某

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

个阈值,这些传感器节点将成为对该目标实现监控的源节点.这些源节点通知 sink 节点监测到目标数据,sink 将根据通知的消息属性,制定以应对该目标(或异常情况)实现信息收集的 MA 代码,计算最佳的 MA 行程路径,派出 MA 到源节点收集数据.

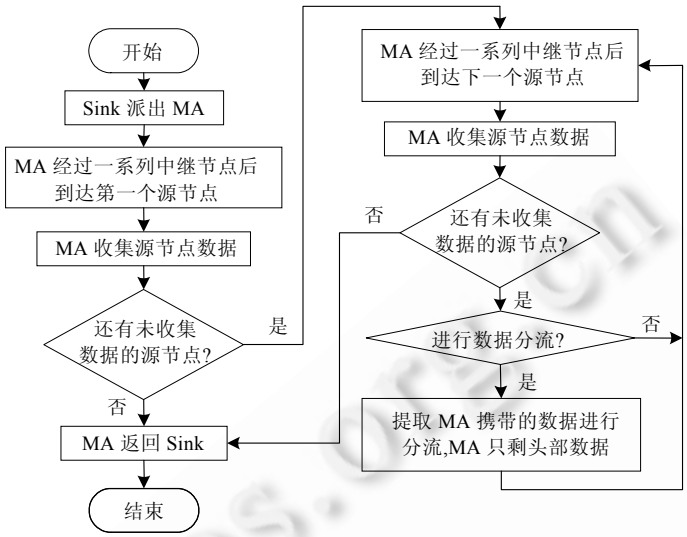

Fig.4 Flowchart of the algorithm using the proposed agent data separation strategy

图 4 使用 Agent 数据分流策略的算法流程图

Table 1 Parameters of sensors

表 1 传感器的工作参数

符号	默认取值	描述
e_{rec}	10 nJ/byte	接收数据能耗
e_{tran}	50 nJ/byte	发送数据能耗
e_{sen}	2 nJ/byte	感应数据能耗
e_{agg}	5 nJ/byte	融合数据能耗
r	0.8	MA 对感应数据的压缩率
ρ	0.8	MA 对数据的融合率

为了更好地分析本文所提出的方法的有效性,实验比较了利用 IEMF 算法[7]实现 MA 行程规划时使用与不使用 Agent 数据分流的技术的性能,并且进一步分析 MA 采用不同的数据融合率下的性能.IEMF 算法把每个源节点都当作收集感应数据的第 1 个源节点进行比较,选出最优的 MA 行程路径所对应的收集感应数据的第 1 个源节点.本文 MA 行程路径的最优性体现在最小化某个异常事件发生时,MA 传输后能量消耗最大的源节点的能耗.该源节点实际上就是能量消耗最快的点,减少该点上经过的流量值有助于延长源节点的工作寿命.

图 5 比较了不使用与使用 Agent 数据分流传输技术下,IEMF 算法以各个源节点作为第 1 个访问点得到的 MA 行程路径上的源节点最大能量消耗值.从图中可以看出,在以每个源节点作为第 1 个访问点的测试中,除了以第 3 个和第 6 个源节点为第 1 访问点时两种方法的能耗一样以外,使用了 Agent 数据分流技术的 MA 传输消耗的源节点能耗都小于不使用分流技术时的能耗值.此外,在不使用分流技术情况下,IEMF 以第 6 个源节点为第 1 个访问点时最优;而采用了分流技术后,IEMF 以第 8 个源节点作为第 1 个访问点时最优,而且该最优值比不分流时的值更优.

图 6 还进一步给出了采用了分流技术后,IEMF 对各个源节点的测试结果与不采用分流技术下最大能量消耗源节点上所节省的能量百分比.可以看出,采用 Agent 数据分流对单一个源节点所节省的能量最高达 24%.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

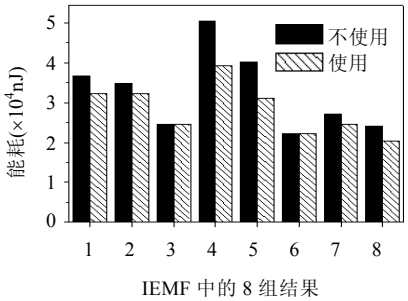

Fig.5 Results by IEMF without or with the proposed agent data separation strategy

图 5 IEMF 算法不使用与使用 Agent 时数据分流策略的计算结果

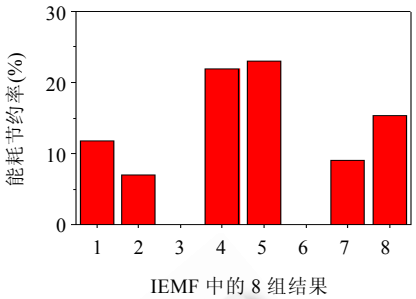

Fig.6 Percentage of energy consumption reduction of the maximum energy consumption source node by IEMF by using the proposed agent data separation strategy

图 6 IEMF 算法采用 Agent 数据分流策略比不采用该策略时最大能耗源节点上所节省的能量百分比

如图 7 所示为 IEMF 算法找到的最优 MA 行程路径,其中,sink 节点位于监控区域的中心,用三角形表示;目标点用星号(*)表示;源节点用点圈表示;其余实心原点表示部署在监控区域内的传感器.

实验中还测试了在不同 MA 数据融合率下,是否使用本文提出的 Agent 数据分流传输技术下算法的性能.分别测试了ρ=0,0.1,0.2,…,0.9,1.0 下,IEMF 算法对各个源节点的最大能量消耗值的平均值.图 8 给出了二者的比较曲线.无论数据融合率取何值,采用 Agent 分流传输技术下的 MA 传输消耗的最大源节点能量都比不使用分流技术的最大源节点能量要少接近一半.数据融合率为 0 表示不存在数据融合,此时,源节点上消耗的能量最大;当数据融合率为 1.0,即 MA 的大小为 s 或$(s+(1-r)l_{rd})$时,采用 Agent 分流传输仍比不采用分流要更优.

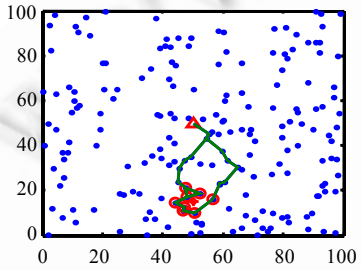

Fig.7 MA itinerary by using the 8th source node as the first visited node in the previous example

图 7 上例中采用第 8 个源节点为第 1 个访问点时的 MA 行程规划路线

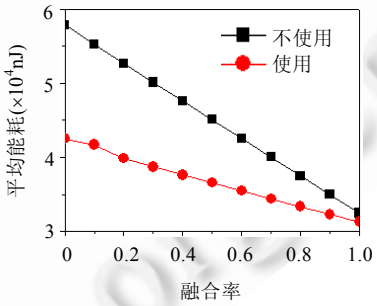

Fig.8 Average energy consumption by IEMF without or with the proposed agent data separation strategy by using different aggregation rates

图 8 不同数据融合率下 IEMF 算法不采用与采用 Agent 数据分流策略下的平均能耗值

5 结束语

本文提出了无线传感器网络中移动 Agent(MA)的数据分流传输技术,通过设计分流规则,解决了由于 MA 携带大量数据访问源节点而造成源节点的能量消耗过快的问题,从而达到延长源节点的工作寿命的目的.该技术适用性强,大多数目前常用的 MA 行程规划算法都可以采用该技术来提高性能.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

References:

[1] Akyildiz IF, Melodia T, Chowdhury KR. A survey on wireless multimedia sensor networks. Computer Networks, 2007,51(4): 921−960. [doi: 10.1016/j.comnet.2006.10.002]

[2] Hu XM, Zhang J, Yu Y, Chung H, Li YL, Shi YH, Luo XN. Hybrid genetic algorithm using a forward encoding scheme for lifetime maximization of wireless sensor networks. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2010,14(5):766−78. [doi: 10.1109/TEVC.2010.2040182]

[3] Lin Y, Hu XM, Zhang J. An ant-colony-system-based activity scheduling method for the lifetime maximization of heterogeneous wireless sensor networks. In: Proc. of the GECCO 2010. Portland. 23−30. [doi: 10.1145/1830483.1830488]

[4] Lin Y, Hu XM, Zhang J. Optimal node scheduling for the lifetime maximization of two-tier wireless sensor networks. In: Proc. of the CEC 2010. Barcelona, 2010. 1−8. [doi: 10.1109/CEC.2010.5586264]

[5] Lin Y, Zhang J, Chung HSH, Ip WH, Li Y, Shi YH. An ant colony optimization approach for maximizing the lifetime of heterogeneous wireless sensor networks. IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics—Part C, 2012,42(3):408−420. [doi: 10.1109/TSMCC.2011.2129570]

[6] Konstantopoulos C, Mpitziopoulos A, Gavalas D, Pantziou G. Effective determination of mobile agent itineraries for data aggregation on sensor networks. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 2010,22(12):1679−1693. [doi: 10.1109/TKDE.2009.203]

[7] Chen M, Yang LT, Kwon T, Zhou L, Jo M. Itinerary planning for energy-efficient agent communications in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2011,60(7):3290−3299. [doi: 10.1109/TVT.2011.2134116]

[8] Chen M, Gonzalez S, Leung VCM. Applications and design issues for mobile agents in wireless sensor networks. IEEE Wireless Communications, 2007,14(6):20−26. [doi: 10.1109/MWC.2007.4407223]

[9] Wu QS, Rao NSV, Barhen J, Iyengar SS, Vaishnavi VK, Qi H, Chakrabarty K. On computing mobile agent routes for data fusion in distributed sensor networks. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 2004,16(6):740−753. [doi: 10.1109/TKDE.2004.12]

[10] Zhou SW, Lin YP, Nie YL, Wang JL, Zhang J. A study of trajectory-based mobile agent dynamic routes algorithm for data fusion in wireless sensor networks. Chinese Journal of Computers, 2007,30(6):894−904 (in Chinese with English abstract).

[11] Qi H, Wang F. Optimal itinerary analysis for mobile agents in ad hoc wireless sensor networks. In: Proc. of the 13th Int'l Conf. on Wireless Comm. (Wireless 2001). 2001. 147−153.

[12] Chen M, Gonzalez S, Zhang Y, Leung V. Multi-Agent itinerary planning for wireless sensor networks. In: Proc. of the Ashine. Las Palmas de Gran Canaria, 2009. 584−597. [doi: 10.1007/978-3-642-10625-5_37]

[13] Chen M, Gonzales S, Leung V. Directional source grouping for multi-agent itinerary planning in wireless sensor networks. In: Proc. of the ICTC. Jeju Island, 2010. 207−212. [doi: 10.1109/ICTC.2010.5674660]

[14] Chen M, Cai M, Gonzalez S, Leung V. Balanced itinerary planning for multiple mobile agents in wireless sensor networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on ADHOCNETS. Victoria, 2010. 416−428. [doi: 10.1007/978-3-642-17994-5_28]

[15] Cai W, Chen ZJ, Feng XL, Zeng WH. Multi-Agent grouping algorithm in wireless sensor networks. Journal of System Simulation, 2012,22(12):2890−2894 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

[10] 周四望,林亚平,聂雅琳,王继良,张锦.无线传感器网络中基于数据融合的移动代理曲线动态路由算法研究.计算机学报,2007,30(6):894−904.

[15] 蔡玮,陈志军,冯新龙,曾文华.无线传感器网络中多移动代理分组优化算法.系统仿真学报,2012,22(12):2890−2894.

胡晓敏(1983－),女,广东江门人,博士,讲师,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络,智能优化技术,数据挖掘与建模.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn