

无线传感器网络中基于移动代理的自适应数据融合路由算法

胡海峰 杨震

(南京邮电大学通信与信息工程学院江苏省无线通信重点实验室 南京 210003)

摘要: 该文提出在无线传感器网络中基于移动代理的自适应数据融合路由(AFMR)算法, 解决移动代理如何以能量有效的方式融合、收集相关性数据的问题。该算法综合考虑了移动代理在路由过程中传输能量和融合能量的消耗, 并根据数据融合算法的能量开销和节能增益, 对移动代理迁移到各节点时是否执行数据融合操作进行自适应调整, 以达到在各种不同的应用场景中优化移动代理能量开销的目的。通过仿真验证了在无线传感器网络的各种相关性数据收集的应用环境中, AFMR 算法在节省能量方面比现有 TSP 和 FMR 的移动代理路由算法更加有效。

关键词: 无线传感器网络; 移动代理; 数据融合; 路由算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2254-05

Mobile-Agent-Based Adaptive Data Fusion Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks

Hu Hai-feng Yang Zhen

(*Jiangsu Key Lab of Wireless Commun. College of Communications and Infor. Eng., Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China*)

Abstract: in this paper, an energy efficient Adaptive Fusion Mobile-agent-based Routing algorithm (AFMR) is presented in Wireless Sensor Networks (WSN), where AFMR can provide energy efficient Mobile Agent (MA) routing algorithm for correlated data gathering. AFMR is used to not only jointly optimize over the costs for both data transmission and data fusion, but also evaluate the cost and benefit of the data fusion, in order to adaptively adjust whether fusion shall be performed for minimizing the total energy consumption when MA migrates to a particular node. Simulation results show that AFMR achieves better performance than existing MA routing algorithm including TSP and FMR from perspectives of energy consumption in a variety of correlated data gathering applications.

Key words: Wireless Sensor Networks (WSN); Mobile Agent (MA); Data fusion; Routing algorithm

1 引言

无线传感器网络 WSN(Wireless Sensor Networks)是由大量的随机分布在某一地理区域传感器节点(以下简称节点)组成, 节点通常使用电池供电, WSN 中各节点的测量数据可以认为是大量有一定相关结构的分布式数据源, 通过射频接口把各数据源以无线多跳的方式发送给需要的节点(比如 sink 节点), 以便进行数据处理, 该问题可以归结为研究 WSN 中相关数据收集的节能有效的路由算法。

在实际应用中, WSN 各节点产生的数据是彼此相关的, 数据融合算法利用感知数据的相关冗余性来减少需要传输的数据量以达到节能增益。文献[1]提出的定向扩散(directed diffusion)算法中, 回传给 sink 节点的路由按照信息梯度建立, 并且在交汇节点上进行数据融合以减少传输的数据量。

文献[2]提出的 LEACH 分簇路由策略让本簇内的节点直接把数据发送给簇头, 簇头对汇总的数据进行数据融合后, 再通过多跳方式发送给 sink 节点以节省能量。文献[3]在目标跟踪过程中, 目标附近的节点协同形成动态生成树的路由结构, 协同组节点把测量数据沿确定的生成树向根节点传输, 在传输过程中, 汇聚节点对其子生成树节点的数据进行数据融合, 以减少传输过程的能量消耗。

以上论文最大问题是没有明确利用数据相关性, 在选择路由的时候, 没有考虑数据融合所可能带来节能增益和能量开销。在许多 WSN 的应用场合中, 数据融合的能量开销是不能忽略不计的, 比如在文献[4]表明, 图像数据融合开销和数据传输开销(nJ/bit)已经非常接近。文献[5]提出 MFST (Minimum Fusion Steiner Tree)路由算法, 用于在 WSN 中以数据融合方式能量有效的收集数据, 文中考虑了数据传输开销和数据融合开销, 并且根据节点产生的数据量来选择融合数据点。文献[6]提出了 AFST(Adaptive Fusion Steiner Tree)算法, 对 MFST 算法进行改进, AFST 不仅要优化数

2007-02-26 收到, 2007-07-18 改回

国家 973 计划项目(2007CB310607), 国家自然科学基金(60772062)和江苏省高校自然科学重大基础研究项目(06KJA51001)资助课题

据传输路由,而且在节点转发数据时,动态决定是否进行数据融合来进一步减少总的能量开销。

以上论文工作模式是多个节点把大量感知到的数据通过无线多跳方式发送到信息汇聚点或处理中心(如 Sink),由中心运行一定的算法来处理数据,提取相关信息,这本质上可以看作一种 C/S(客户端/服务器)架构,文献[7]提出了基于移动代理 MA(Mobile Agent)协同信号和信息处理模式,总结了 MA 的工作模式相对于 C/S 工作模式的许多优点,如可扩展性好、可靠性高、任务自适应性强、节能效率高等,因而,基于移动代理的 WSN,在各种应用中体现出自己的独特优势。文献[8]提出了在 WSN 中,MA 的路由(访问节点的顺序)直接影响了融合数据的质量和通信开销,并采用遗传算法来计算该目标函数优化的近似解。文献[9]进一步把 MA 的路由问题归结为多目标(multi-objective)优化问题。

上面的基于 MA 的路由算法存在以下缺点:(1)路由过程中以最大化节点的探测信号强度为目标,没有考虑到节点测量数据之间存在相关冗余性。(2)使用遗传算法来解决目标优化问题,算法的迭代次数较多,运行时间较长,一般需要数秒甚至更长,在实时性要求比较高的应用场合,比如目标跟踪或紧急事件处理场合,不能满足 WSN 应用需求。

本文提出一种新的 AFMR(Adaptive Fusion MA Routing)算法,该算法综合考虑了移动代理在路由过程中传输能量和融合能量的开销,并根据数据融合算法的能量开销和节能增益,对移动代理迁移到各节点时是否执行数据融合进行自适应调整,使得 MA 在路由过程中收集、融合相关节点测量数据的同时,保持总的能量开销接近最优。

本文的具体安排如下:第2节讨论了 AFMR 算法的应用背景和基本概念;第3节具体描述 AFMR 的算法思想和基本模块;第4节用仿真的方法对 AFMR 算法和 TSP、FMR 算法在网络拓扑、数据相关度、不同的单位数据融合能量等条件下对节能方面进行了比较;最后给出了全文的总结。

2 基本定义和概念

无线传感器网络可以表示为图 $G=(V, E)$, V 表示传感器节点的集合,节点间存在的边 E 表示该对节点间存在通信链路。因为 WSN 具有分布性和资源受限的特点,设 $S \subset V$ 是协同组节点的集合, S 中的节点参与对某个具体事件的测量任务,通过协同信号处理算法来提高事件测算的精度和冗余度,并且根据事件变化的情况(比如目标跟踪应用中的目标移动)动态调整 S 中包含的节点,在保持测算精度的条件下,维持对事件的有效跟踪和能量有效。在 MA 的工作模式下,节点 s 派遣出 MA,通过迁移到参与测量的协同组节点来收集、融合 S 中节点的测量数据,最后 MA 携带融合的数据缓存返回节点 s ,由 s 进行进一步的处理。节点 s 可以是 sink 节点、簇头等,在本文中假设 $s \in S$ 。

设 MA 由标识、路由信息、数据缓存、处理代码组成,其中数据缓存中包含部分融合的协同组节点的测量数据,设

MA 的大小为 $w_{MA} = w_{buffer} + FS$,其中 FS 包括 MA 的标识、路由信息、处理代码等不随 MA 迁移而改变的部分, w_{buffer} 为 MA 携带的部分融合的数据缓存,它由协同组节点的测量数据形成,并随着 MA 的迁移而单调增加。

设 w_u 和 w_v 表示 u, v 节点中待处理的测量数据大小。 $e_{uv} = (u, v) \in E$ 表示节点 u, v 之间存在通信链路,假设 MA 在路由中,从节点 u 迁移到节点 v , $t(e_{uv})$ 和 $f(e_{uv})$ 分别表示相对于边 e_{uv} 的 MA 的传输能量(包括节点 u 的发送能量和节点 v 的接收能量)和融合能量。

$$\left. \begin{aligned} t(e_{uv}) &= w_{MA}c(e_{uv}) = w_{buffer_u}c(e_{uv}) + FS \times c(e_{uv}) \\ f(e_{uv}) &= (w_{buffer_u} + w_v)q(v) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$c(e_{uv})$ 为从节点 u 到节点 v 的单位数据传输能量,由节点间的距离以及节点之间信道状况决定, w_{buffer_u} 是 MA 在节点 u 进行数据融合后所携带的数据缓存, $q(v)$ 为 MA 在节点 v 的单位数据融合能量。

衡量数据融合算法的一个重要参数是数据聚合度 ρ , $\rho(e_{uv}) \in [0,1]$ 表明因为数据融合而引起的数据减少比例,它的大小和节点 u, v 测量数据之间的冗余度以及融合算法都有关系。融合前后数据量的变化如下:

$$w_{buffer_v} = (w_{buffer_u} + w_v)(1 - \rho(e_{uv})I_v) \quad (2)$$

其中 $I_v \in \{0,1\}$ 表明 MA 是否在节点 v 上运行数据融合算法,当 MA 迁移到每个节点时,根据数据融合算法所带来的能量开销和融合后的能量节省度,即节能增益,动态决定 MA 在该节点是否进行数据融合运算,以达到能量消耗的最优。

MA 迁移了节点 t, u, v 。设 E_{ij} 表示 MA 从节点 i 迁移到节点 j 所消耗的传输能量和融合能量之和为

$$\begin{aligned} E_{tu} &= t(e_{tu}) + f(e_{tu}) \\ &= (w_{buffer_t} + FS)c(e_{tu}) + (w_{buffer_t} + w_u)q(u)I_u \end{aligned} \quad (3)$$

$$w_{buffer_u} = (w_{buffer_t} + w_u)(1 - \rho(e_{tu})I_u) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E_{uv} &= t(e_{uv}) + f(e_{uv}) \\ &= (w_{buffer_u} + FS)c(e_{uv}) + (w_{buffer_u} + w_v)q(v)I_v \end{aligned} \quad (5)$$

式(3)-式(5)可以看出如果节点的拓扑结构确定,对应测量事件的测量数据冗余度确定的情况下, E_{uv} 是 w_{buffer_u} 的单调递增函数。从能量的角度来看,节点 u 采用数据融合的价值在于减少了 w_{buffer_u} 和 E_{uv} ,同时,因增加了融合开销 $f(e_{tu})$ 而增加了 E_{tu} 。针对上面的矛盾,本文采用自适应数据融合 MA 路由 AFMR(Adaptive Fusion MA Route)算法,MA 在迁移的过程中,动态决定节点是否需要进行数据融合运算,以进一步降低 MA 的能量消耗。

3 算法描述

MA 的路由描述如下:设 $w: E \rightarrow \mathbb{R}^+$ 为图 G 边长的权值函数,寻找顶点集合 $S: \{1, \dots, n\}$ 的一个循环排列 $(1 \rightarrow \pi(1) \rightarrow \dots \rightarrow \pi^{n-1}(1) \rightarrow 1)$,使得 MA 循环遍历上述节点后,所有边长对应权值和最小,这是一个经典的 TSP(Traveling Salesman Problem)问题,边长对应为 MA 的每一次迁移,

权值 E 定义为每一次 MA 迁移所消耗的能量(包括传输和融合能量), 算法的目的是找到能量消耗最小的 MA 迁移路径。

由于TSP算法具有的NP-hard性质, 本文采用启发式算法^[10]的思想, 能够在多项式时间内找到比较好的能够满足实际要求的解。目前, 求解TSP问题的启发式算法很多, 包括各种环路构造算法和环路改进算法, 因此需要结合MA的应用特性, 选择一个合适算法。从式(3)–式(5)可以看出, MA每次迁移所对应边长的权值(所消耗的能量)和MA所携带的部分融合的数据缓存有关系, 也就是说, 边长的权值不仅和边长的距离、测量数据的相关性分布有关, 而且和MA迁移路径有关, 考虑到上面的因素, AFMR算法以插入算法(insertion algorithm)^[10]为基础, 结合MA迁移过程中, 传输能量和融合能量的变化规律, 计算出MA的迁移路由, 并根据数据融合算法的能量开销和节能增益, 对每个节点是否进行数据融合运算进行自适应调节。

对于 $e_{x_k x_{k+1}}$, 设 $w(k+1) = (w_{\text{buffer}_{x_k}} + w_{x_{k+1}})$, $\Delta_{x_k x_{k+1}}$ 表示在 x_{k+1} 节点进行数据融合的增益

$$\Delta_{x_k x_{k+1}} = \overline{w(k+1)h(x_{k+1}s)} - \overline{w(k+1)(1-\rho(e_{x_k x_{k+1}}))} \cdot \overline{h(x_{k+1}s)} - q(x_{k+1})\overline{w(k+1)} \quad (6)$$

其中 $h(\widehat{x_{k+1}s})$ 表明从 x_{k+1} 沿 MA 确定的路由传输单位数据量到节点 s (派遣并回收 MA 的节点) 所消耗的传输能量和融合能量的总和, 式(6)的第1项表示如果节点 x_{k+1} 不进行数据融合, MA 从该点迁移回节点 s 所消耗的总能量, 式(6)后两项表示节点 x_{k+1} 进行数据融合时对应 MA 消耗的能量。如果 $\Delta_{x_k x_{k+1}} > 0$, 说明在 x_{k+1} 节点进行数据融合是节省能量的。对式(6)进行化简:

$$\Delta_{x_k x_{k+1}} > 0 \Rightarrow \rho(e_{x_k x_{k+1}})h(\widehat{x_{k+1}s}) > q(x_{k+1}) \Rightarrow I_{k+1} = 1 \quad (7)$$

如果式(7)成立, 融合运算开关处于闭合状态, x_{k+1} 运行数据融合算法以节省能量开销。反之, 该节点就抑止融合运算。

AFMR算法主要包括2个模块, (1)MAR模块计算出所有未插入节点传输数据到已插入节点集合的能量消耗(包括传输能量和融合能量), 选出能量消耗最大的节点作为待插节点, 已插入节点集合中的节点顺序代表MA迁移的路径; (2)AF模块在MAR模块计算出的路由基础上, 考虑节点数据融合的能量开销和节能增益, 在式(6)的基础上自适应调节节点是否运行数据融合算法。对AFMR算法的模块论述如下:

步骤1 模块 MAR(D, s) 计算能量(包括传输和融合能量)优化的MA迁移路由

$d_{ss} = 0, d_{yx} = w_y c(e_{yx}) + (w_y + w_x)q(x); //$ 节点 y 到节点 x 的能量消耗(传输和融合)

$C \leftarrow (s, s), K \leftarrow \{ss\}, \text{sum_}w = 0;$

for $u = x_1$ to x_{n-1} do $d(u) = d_{us}$ end;

for $k = 1$ to $n - 1$ do

选择 y , 使得 $d(y) = \max\{d(u) : u = x_1, \dots, x_{n-1}\};$

for $l \in K$ do $g(l) = \mathbf{in_weight}(l, K, y)$ end;

选择边 $f \in K$, 使得 $g(f) = \min\{g(l) : l \in K\};$

设 $f = e_{uv}; y$ 插入到 C 中 u, v 之间;

$K \leftarrow (K \setminus \{f\}) \cup \{uy, yv\}, \text{sum_}w = \text{sum_}w + g(f);$

$\mathbf{re_assign}(f, K, y); d(y) \leftarrow 0;$

for $x \in \{1, \dots, n\} \setminus C$ do $d(x) = \min\{d(x), d_{yx}\};$

end

MAR(D, s) 是 MA 路由计算模块, 输入参数 D 包括 S 中任意节点 u 和节点 v 之间的 $c(e_{uv})$ 、 $q(v)$ 以及各节点测量数据量, $s (s \in S)$ 节点派遣出 MA, S 中的节点有 n 个。 $d(x)$ 函数表示 x 节点到 C 节点集合的距离, 即 x 到集合中各节点距离的最小值。 $g(l)$ 函数为 y 节点插入 l 边对应的两顶点之间时, MA 迁移路径总的能量增加量。算法结束时, K 中节点的顺序代表 MA 迁移的路由。 $\mathbf{in_weight}(l, K, y)$ 子模块被 MAR 模块调用, 用于计算 y 节点插入边长 e 对应的两节点之间时, MA 迁移路径总的能量开销增加量。 $\mathbf{re_assign}(f, K, y)$ 子模块被 MAR 模块调用, 用于计算 y 节点插入到边长 f 对应的两节点之间时, 重新调整迁移路径上 f 后续边长的能量权值。

步骤2 模块 AF(D, K) 自适应调整节点的融合开关状态

设 $K : \{x_0 x_1, \dots, x_{n-1} x_0\} (x_0 \leftarrow s)$

$h(\widehat{x_{n-1}s}) = c(e_{x_{n-1}x_0})$ 根据式(7)计算 $I_{n-1};$

for $i = 2$ to $n - 1$ do

$h(\widehat{x_{n-i}s}) = c(e_{x_{n-i}x_{n-i+1}}) + q(x_{n-i+1})I_{n-i+1} + (1 - \rho(e_{x_{n-i}x_{n-i+1}})I_{n-i+1})h(\widehat{x_{n-i+1}s});$

根据式(7)计算 $I_{n-i};$

end

从式(7)可以看出, 算出 $h(\widehat{x_k s})$ 就可以计算出 I_k , 以判断 x_k 节点是否需要数据进行融合以节省能量, $h(\widehat{x_k s})$ 是单位数据量从 x_k 发送到 s 节点所消耗的总能量(包括传输、融合能量), 只有确定了迁移路径上 x_k 后续节点 $\{x_{k+1} \dots x_{n-1}\}$ 是否进行数据融合的前提下, 才能确定 $h(\widehat{x_k s})$ 和 I_k , 所以, 在 MAR(D, s) 模块计算出的 MA 路由上, AF(D, K) 模块以逆向的顺序计算出 I_{n-1}, \dots, I_1 , 来决定对应节点 $x_k (k \in \{1, \dots, n-1\})$ 的数据融合开关是否打开。

AFMR 计算复杂度为 $o(n^3)$, 考虑到节点 S 只包括参与运算的协同组节点, 可以在允许的计算时间和复杂度条件下, 寻找到满足实际要求的 MA 路由, 使得 MA 遍历 S 节点的能量消耗得到优化。

4 实验仿真

在仿真过程中, 本文比较了 TSP-nf(Traveling Salesman Problem-no fusion), FMR(Fusion MA Route)和 AFMR 3 种路由算法在各种应用情况下的能量消耗。3 种算法的共同点都是寻找 MA 遍历协同组节点 S 的迁移路径, 其中 TSP-nf 路由算法只考虑 MA 迁移过程中的传输能量开销, 在所有的节点上都不进行数据融合运算。这是文献[8,9]中 MA 路由算

法的基本模式。FMR 路由算法在所有节点都运行数据融合运算,综合考虑传输能量和融合能量的条件下,寻找 MA 迁移能量消耗最小的路径,是考虑数据融合算法 MA 路由算法的基本模式。

本文用 NS 仿真工具模拟 20m×20m 的协同组节点测量区域,协同组节点随机均匀分布在测量区域,每个节点存储了本地测量数据 400Byte。MA 由协同组节点 s 派遣,MA 遍历协同组节点 S 后返回 s 节点, s 节点的位置在本算法中没有特别的要求,在仿真环境中固定于测量区域的中上方,MA 的大小设为 2kByte。单位数据量的传输能量消耗为 $c(e_{x_k, x_{k+1}}) = \beta d^\gamma + \varepsilon$,其中 $\gamma = 2$, $\beta = 100\text{pJ/bit/m}^2$, $\varepsilon = 100\text{nJ/bit}$ 。MA 从 x_k 节点迁移到 x_{k+1} ,进行数据融合运算,NS 使用数据聚合度 ρ 对数据的相关程度进行模拟,根据文献[6],根据数据聚合度 ρ ($\rho = 1 - d/r_s = 1 - \sigma$),融合后的数据缓存表示为

$$w_{\text{buffer}_{x_{k+1}}} = \max(w_{\text{buffer}_{x_k}}, w_{x_{k+1}}) + \min(w_{\text{buffer}_{x_k}}, w_{x_{k+1}}) \cdot (1 - \rho(e_{x_k, x_{k+1}})) = w_{\text{buffer}_{x_k}} + w_{x_{k+1}} \sigma \quad (8)$$

d 为进行相关度计算的节点距离, r_s 为相关距离,其中 $\rho \in [0,1]$,当 d 大于 r_s 时, ρ 等于 0。

(1)节点密度对路由算法能量消耗的影响 在仿真过程中,20m×20m 的协同组节点测量区域分别随机放置 5, 10, 15, 20, 25, 30 个节点。其中,根据文献[6]仿真参数的设定,单位数据融合能量 $q(e_{x_k, x_{k+1}})$ 统一为 200nJ/bit,相关距离 r_s 为 50m。考虑在节点密度不同的情况下,3 种算法的能量消耗情况。

由图 1(a)可以看出,当节点密度比较低的时候,节点之间相关性比较小,进行数据融合而减少的传输数据量也较少,所节省的能量不能抵消融合运算本身消耗的能量,FMR 在每个节点都进行数据融合,所以 FMR 的能量消耗比 TSP-nf 高;随着节点密度的增加,节点之间相关度增加,融合能量增益超过了能量消耗,TSP_nf 的能量消耗逐渐超过 FMR,并且两者的差距会随着节点密度的增加而增加。AFMR 因为综合考虑了融合的增益和代价,当节点数目比较小的时候,AFMR 抑止节点数据融合运算,当节点数目比较大的时候,AFMR 让更多的节点参与数据融合运算,图 1(b)清楚地表明了 AFMR 的自适应数据融合特性。

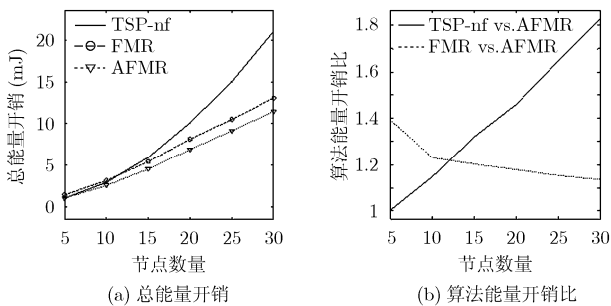


图 1 算法能量消耗对比图(不同的节点密度)

(2)数据相关性对路由算法能量消耗的影响 在仿真过程中,20m×20m 的协同组节点测量区域随机放置节点 20 个,分别考虑在高单位数据融合能量(150nJ/bit)和低单位数据融合能量(20nJ/bit)情况下,相关距离 r_s 从 0.25m 变化到 2048m 的 10 种情况下,仿真 3 种算法在不同相关度数据场下的能量消耗情况,以及 AFMR 中参与融合运算节点的比例。

从图 2 可以看出,随着相关距离的增加,不同节点之间的测量数据的相关度增大,数据融合所减少的传输数据量增加,数据融合所带来的能量增益加大,因而 FMR 和 AFMR 的能量消耗呈单调降低特性,而且 AFMR 自适应于数据相关度的变化,执行融合运算节点数目的比例呈单调增加特性。AFMR 算法在 r_s 比较小的时候,对所有节点都抑止数据融合运算,和 TSP-nf 算法的能量消耗相等,随着 r_s 增加,AFMR 自动调整参与融合运算节点的比例,能量消耗逐渐降低,最后当 r_s 很大的时候,几乎所有的节点都进行数据融合运算,AFMR 算法和 FMR 算法的能量消耗很接近了。

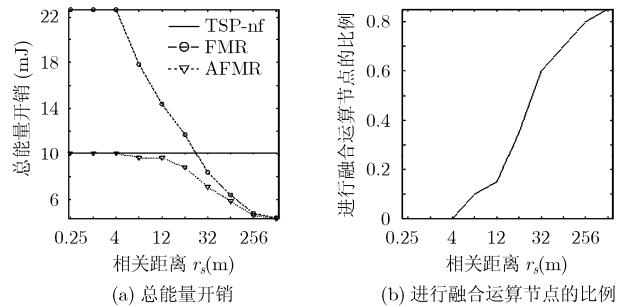


图 2 算法能量消耗和 AFMR 算法的融合节点比例(不同的相关距离 r_s , $q=150\text{nJ/bit}$)

(3)单位数据融合能量对路由算法能量消耗的影响 在仿真过程中,20m×20m 的协同组节点测量区域随机放置节点 20 个,相关距离 r_s 为 50m,分别考虑在单位数据融合能量从 10 到 450(nJ/bit)10 种情况下,3 种算法的能量消耗情况,以及在 AFMR 中参与融合运算节点的比例。

从图 3(a)看出 TSP-nf 算法的能量消耗不受单位融合能量的影响,图形上表现为一直线。当 r_s 一定的时候,也就是融合增益一定的时候,单位融合能量的增加意味着融合运算的代价增加,因而 FMR 能量消耗随着增加,当单位融合能量接近 300(nJ/bit)的时候,FMR 的能量消耗已经超过 TSP-nf 算法,AFMR 算法在单位融合能量很小的时候,几乎所有的节点都参与融合运算,图形上表现为 AFMR 和 FMR 重叠在一起,随着单位融合能量的增加,因为有的节点的融合代价已经超过了融合增益,所以参与融合运算的节点比例在逐步降低(如图 3(b)),当所有节点都不参与融合运算时,最终 AFMR 算法的能量消耗接近 TSP-nf 算法。

总之,在不同的节点密度、不同的相关度数据场、不同

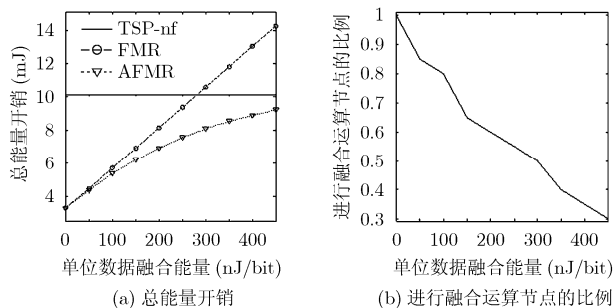


图3 算法能量消耗和AFMR算法的融合节点比例(不同单位融合能量, $r_s=50\text{m}$)

的融合算法的情况下, AFMR算法的节能效果都是最佳的, 完全适应于WSN中动态拓扑变化、不同应用场景的客观需求。

5 结束语

本文提出了在无线传感器网络中基于移动代理的自适应数据融合路由(AFMR)算法, 解决移动代理如何以能量有效的方式融合、收集相关性数据的问题。移动代理在路由过程中的能量消耗包括传输能量和融合能量的消耗, AFMR算法根据数据融合算法的能量开销和所带来的节能增益, 采用了自适应数据融合算法, 根据不同应用场景的条件变化, 动态决定节点是否需要运行数据融合运算。仿真表明在不同的节点密度、不同的测量数据相关度以及不同的单位数据融合能量的条件下, AFMR算法相对于TSP-nf算法和FMR算法在能量节省方面都是最优的。

参考文献

- [1] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Heidemann J, and Silva F. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003, 11(1): 2-16.
- [2] Heinzelman W R, Chandrakasan A, and Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless

microsensor networks[C]. In Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui HI Jan, 2000: 1-10.

- [3] Zhang W and Cao G. DCTC: Dynamic convoy tree-based collaboration for target tracking in sensor networks[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communication*, 2004, 3(5): 1689-1701.
- [4] Luo H, Luo J, Das S K, and Liu Y. Energy efficient routing with adaptive data fusion in sensor networks[C]. in Technical Report, CSE UTA, 2005.
- [5] Luo H, Liu Y, and Das S K. Routing correlated data with fusion cost in wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006, 5(11): 1620-1632.
- [6] Luo H, Luo J, Liu Y, and Das S. Adaptive data fusion for energy efficient routing in wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans. on Computers*, 2006, 55(10): 1286-1299.
- [7] Qi H R, Xu Y Y, and Wang X L. Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks[C]. *Proc. IEEE*, 2003, 91(8): 1172-1183.
- [8] Wu Q, Rao N S V, and Barhen J, et al. On computing mobile agent routes for data fusion in distributed sensor networks[J]. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2004, 16(6): 740-753.
- [9] Rajagopalan R, Mohan C K, Varshney P K, and Mehrotra K. Multi-objective mobile agent routing in wireless sensor networks[C]. The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Scotland, 2005, Vol. 2: 1730-1737.
- [10] Jungnickel D. Graphs, Networks, and Algorithms. Germany, Springer, 2004: 453-455.

胡海峰: 男, 1973年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络通信技术。

杨震: 男, 1961年生, 博士, 教授、博士生导师, 目前研究方向为现代通信中的语音信号处理和通信信号处理。