

A QoS Routing Algorithm Based on Adaptive Ant System for Sensor Networks *

Wang Yin, Shang Fengjun *, Ren Dong hai

(College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Image, video and audio information are gathered by wireless sensor networks more and more with each passing day, it's a great challenge for the QoS routing. In this paper, a QoS routing algorithm (APAS) with adaptive parameters based on Max-Min Ant System (MMAS) Algorithm is presented. The performance of algorithm is improved by the adaptive pheromone and evaporation coefficient. With the beamed broadcasting, the node of energy changed only needs to announce the necessary neighbours. The simulation for APAS shows that the improved algorithm can search QoS routes effectively and the networks have longer life.

Key words: wireless sensor networks; ant system; adaptive; quality of service

EEACC: 6150P

一种基于自适应蚁群系统的传感器网络 QoS 路由算法 *

王 寅, 尚凤军 *, 任东海

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院, 重庆 400065)

摘 要: 随着无线传感器网络对图像、视频和音频等多媒体信息的采集需求日益增多, 使得传感器网络的 QoS 路由具有极大的挑战性。本文在最大-最小蚁群算法 (MMAS) 的基础上提出一种参数自适应的传感器网络 QoS 路由算法 APAS。在该算法中, 通过信息素和挥发系数的自适应变化, 改善了 MMAS 收敛速度慢的缺点, 提高了全局搜索能力。APAS 还通过使用定向广播, 让能量有变化的节点只需向有价值的邻居通告自己的剩余能量, 从而使全网能耗得以降低。对 APAS 的仿真证明, APAS 有较好的 QoS 路由性能, 并且使传感器网络有较长的生存周期。

关键词: 无线传感器网络; 蚁群系统; 自适应; 服务质量

中图分类号: TP393; TP270.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)02-0239-06

无线传感器网络能很方便地获取环境信息, 在军事、民用及商业领域中具有广阔的应用前景。随着硬件技术的发展, 廉价的 CMOS 摄像头及麦克风的出现。无线传感器网络的检测数据类型逐渐由温度、湿度等简单信息变成了图像、音频和视频数据等多媒体信息, 例如无线多媒体传感器网络。对于多媒体信息的传输需要提供一定的服务质量, 而对于传统无线传感器网络的研究重点一般放在能量受限的问题上, 对于带宽、时延和时延抖动等服务质量保证体制的研究并没有成为主流^[1], 而在有线网络中传送多媒体信息的算法、协议及技术已经得到了广泛的研究。由于无线传感器网络具有资源受限的特点, 所以无线传感器网络中的 QoS (Quality of Service) 研究具有更大的挑战性。

目前对于无线传感器网络的 QoS 路由研究已经引起了国内外不少学者的关注。Akyildiz 对传感器网络传输多媒体信息的硬件技术、网络体系结构及研究方向进行了综述, 并就网络各个层次中对 QoS 保障问题进行了探讨^[2]。Spadoni 使用可以自适应于服务质量要求的移动代理以及动态编址方案来提高传感器网络的 QoS 性能^[3]。Sen 提出一种能够满足多种 QoS 需求的基于查询的自适应路由算法^[4]; 为了保证路径和数据的可靠性, 该算法构造多条从源节点到基站的路径且传输多个数据的拷贝。Suriyachai 提出一种基于 TDMA 的 MAC 协议^[5]来满足传感器网络的 QoS 需求, 该协议利用拓扑信息来降低网络传输的冲突和延时。Chen 提出了一种传感器网络 QoS 路由算法 QOSMR^[6], 该算法使

项目来源: 重庆市科委项目资助 (CSTC2009BB2081); 重庆市教委项目资助 (KJ080526)

收稿日期: 2009-09-19 **修改日期:** 2009-10-29

用不相交的路径或能规避相同源节点的相交路径传输数据以提高网络可靠性。梁华为等人提出的无线传感器网络蚁群优化路由算法 (ARAWSN)^[7], 该算法利用蚁群的自组织和自适应寻优机制进行网络优化路径的建立和维护, 采用 Stigmergy 的概念来减少控制信息的流量, 进一步降低路由开销, 实现网络信息的高效传输, 和定向扩散 (Directed Diffusion) 算法对比优势明显。

1 APAS 算法

最大-最小蚁群算法 (MMAS)^[8] 是一种性能优良的启发式随机优化算法, 本文在该算法的基础上, 提出一种信息素和挥发系数自适应的传感器网络 QoS 路由算法 APAS (Adaptive Pheromone Ant System)。在该算法中, 通过信息素和挥发系数的自适应变化过程, 改善了 MMAS 收敛速度慢的缺点, 并且提高全局搜索能力。APAS 还通过使用定向广播^[9], 让能量有变化的节点只需向有价值的邻居通告自己的剩余能量, 从而使全网的能耗得以降低。对 APAS 的仿真证明, APAS 有较好的 QoS 路由性能, 并且使传感器网络有较长的生存周期。

定义 1 无线传感器网络抽象为连通的无向图 $G = (V, E)$, V 是顶点的集合, E 是边的集合。 $v_i, v_j \in V$, 是图 G 的顶点; $e(i, j) \in E$, 表示顶点 v_i 和 v_j 之间的边; τ_{ij} 是边 $e(i, j)$ 上的信息素强度, 其值可由经过 $e(i, j)$ 的蚂蚁修改; η_{ij} 是边 $e(i, j)$ 上的启发因子。

定义 2 在图 G 中, 蚂蚁经过路径 $P = (v_1, v_2, \dots, v_s)$, 则称该路径为以 v_1 为源节点, v_s 为目标节点的蚂蚁路径, 记为 $P(v_1, v_s)$ 。

定义 3 节点 $A(X_A, Y_A)$, 它的邻居集合为 $\text{Neighbour} = \{(X_1, Y_1, \alpha_1), (X_2, Y_2, \alpha_2), \dots, (X_n, Y_n, \alpha_n)\}$, 其中 X, Y 表示节点所处环境中的平面坐标值, α_n 表示从 A 点到第 n 个邻居节点的方向角。

1.1 蚁群算法

设 n 表示 TSP 规模, m 表示蚂蚁的总数目, 时刻 t 蚂蚁 k 从城市 i 转移到城市 j 的状态转移概率如 (1) 式所示:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{is}(t)]^\beta} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & j \notin \text{allowed}_k \end{cases} \quad (1)$$

α 为信息素的调节因子, 反映了信息素对蚂蚁运动过程的影响; β 为启发因子的调节因子, 反映了路径启发信息对蚂蚁选路的影响。

当全部蚂蚁遍历完 n 个城市时, 对信息素进行更新。 $t+n$ 时刻在路径 (i, j) 上的信息素水平可按式 (2) 进行调整。式 (2) 中 P 表示信息素挥发系数, $\Delta\tau_{ij}(t)$ 表示本次循环中路径 (i, j) 上的信息素增量

$$\tau_{ij}(t+n) = P \times \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (2)$$

MMAS 算法通过设定信息素值的上下界来避免算法的过早收敛, 并且只增加当前最优解对应弧上的信息素。这样可以有效地避免某条路径上的信息素远大于其他路径, 使得所有的蚂蚁都集中到同一路径上造成算法不再扩散。

1.2 自适应信息素

信息素强度表征蚂蚁所留轨迹数量, 它影响着算法搜索全局最优解的能力和收敛速度。 APAS 算法提出信息素强度自适应调节的机制如 (3) 式所示:

$$\tau_{ij}(n+1) = \begin{cases} P \times \tau_{ij}(n) + \Delta\tau_{ij}(n), \tau_{ij}(n) > \tau_{mi} & \text{up} = 0 \\ 1.1\tau_{ij}(n), \tau_{ij}(n) < \tau_{mi} & \text{up} = 1 \\ 1.1\tau_{ij}(n), \tau_{ij}(n) > \tau_{mi} & \text{up} = 1 \\ P \times \tau_{ij}(n) + \Delta\tau_{ij}(n), \tau_{ij}(n) < \tau_{mi} & \text{up} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

蚂蚁从源节点 v_o 出发进行目标点为 v_s 的搜索, 随着搜索次数的不断增加, 前期搜索中较优秀的路径如 P_A 会累积更多的信息素。这时, P_A 上各段路径的信息素强度 τ 将升高。这会使后续蚂蚁聚集在路径 P_A 上。这样将会削弱蚂蚁对稍差路径如 P_B 的搜索, 使得 P_B 上各段路径的信息素强度 τ 不断降低。这将不利于蚂蚁对图 G 中全局最优解的搜索, 同时较优秀的路径 P_A 上的节点将会过快耗尽能量。

本算法为解决以上问题, 设置一个信息素强度的门限 τ_{mi} ($\tau_{\min} < \tau_{mi} < \tau_{\max}$)。当路径 ij 的信息素强度 τ_{ij} 首次小于 τ_{mi} 时, τ_{ij} 便停止下降, 以避免中前期搜索中较优路径 P_A 和较差路径 P_B 因为信息素强度 τ 差距过大而容易收敛于局部最优解。

τ_{ij} 随后以每轮 1.1 倍的速度增加到 τ_{\max} 。搜索路径 ij 的信息素强度 τ_{ij} 在进入这个上升过程后设指示变量 $\text{up} = 1$ 否则 $\text{up} = 0$ 。此后, τ_{ij} 和在 MMAS 中的规则一样, 即使再小于 τ_{mi} 也不会再增加, 以提高收敛速度。

1.3 自适应挥发系数

蚂蚁具有一定的记忆能力, 但随着时间的推移, 以前留下的信息会逐步消失, 信息素挥发系数 P 的大小直接关系到蚁群算法的全局搜索能力及其收敛速度。 APAS 算法提出挥发系数的调节机制如式 (4) 所示:

$$P(n+1) = \begin{cases} 0.95P(n), P(n) > P_{\min} & pp = -1 \\ 1.05P(n), P(n) < P_{\min} & pp = 1 \\ 1.05P(n), P(n) > P_{\min} & pp = 1 \\ 1.15P_o & pp = 0 \end{cases} \quad (4)$$

在蚂蚁从源节点 v_o 出发进行目标点为 v_s 的搜索过程后,因为挥发系数 P 越大,则算法的全局搜索能力将会降低,所以为了保证蚂蚁在前期能够在图 G 中有效的扩大搜索范围,本算法中挥发系数从算法开始将以每轮 $0.95P(n)$ 的速度逐渐减小,直到 $0.95P(n) < P_{\min}$ 。这时各搜索路径的累积信息素强度 $\tau_{ij}(n)$ 受到以前搜索路径的信息素强度影响较小,可以保证蚂蚁不会聚集在少数较优路径上。

此后,为了保证采用信息素强度自适应和挥发系数前期降低后的收敛时间不会过长,挥发系数以每轮 $1.05P(n)$ 的速度逐渐增加,直到增加到 $1.15P_o$ (P_o 为挥发系数的初始值),并在以后也保持此值。这样将可以保证蚂蚁在搜索的前期扩大搜索范围,然后有效的降低收敛时间。

设置 PP 为指示变量,PP = -1 时表示自适应过程中的下降过程,PP = 1 时表示自适应过程中的上升过程,PP = 0 时表示自适应过程结束。

1.4 信息素和启发因子的公式

为了满足无线传感器网络中路由的 QoS 需求和传感器网络对于节能的要求,重新设计了启发因子和信息素增量的公式如(5),(6)式所示。

$$\eta_{ij} = k \cdot \frac{E(j)}{E_o} + \frac{l}{C(i,j)} + \frac{m}{D(i,j)} + \frac{q}{d(j)} \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{1}{a \cdot E_{\text{cost}}(P) + b \cdot C(P) + c \cdot D(P)} \quad (6)$$

在蚂蚁从源节点 v_o 出发进行目标点为 v_s 的搜索过程中,使用启发因子如式(5)所示,作为搜索下一跳的重要参数。在每轮结束后,对本轮最优的蚂蚁的搜索路径按式(6)更新信息素。 E_o 是每个节点的初始能量, $E(j)$ 为可选的下一跳节点 j 的能量; $C(i,j)$ 为从 i 节点向 j 节点发送数据时的丢包率; $D(i,j)$ 为从 i 节点到 j 节点的时延; $d(j)$ 为可选的下一跳节点 j 到基站的距离。 k, l, m, q 为权重因子。式(6)为信息素增量 $\Delta\tau_{ij}$ 的公式,式中 $E_{\text{cost}}(P)$ 是路径 P 上各节点能耗的平均值; $C(P)$ 是路径 P 上各点丢包率的平均值; $D(P)$ 是路径 P 的时延。 a, b, c 为能耗、丢包率和时延的权重因子。

由于信息素增量和启发因子的公式都考虑了时延、丢包率和能耗,所以可以在寻找路径时达到 QoS

需求,并且能延长网络寿命。

1.5 QoS 值函数

无线传感器网络的 QoS 路由问题可描述为:在所给图 G 中,找出一个数据包路径集 P ,使得 QoS 值尽可能大。式(7)是路径 P 的 QoS 值函数,该函数表征了路径 P 的 QoS 值。该函数的值越大,路径 P 的 QoS 值越大。 $E_{\text{cost}}(P)$ 是路径 P 的能耗, $C(P)$ 是路径 P 的丢包率, $D(P)$ 是路径 P 的时延。 j_o, k_o, l_o 是能耗、丢包率、时延的权重因子。本轮所释放的所有蚂蚁中,旅行路径的 QoS 值最优的蚂蚁为本轮最优蚂蚁,其 QoS 值为本轮最优 QoS 值。本轮所有的蚂蚁的旅行路径的 QoS 值的平均值为本轮平均 QoS 值。

$$Q(P) = j_o \cdot \frac{1}{E_{\text{cost}}(P)} + k_o \cdot \frac{1}{C(P)} + l_o \cdot \frac{1}{D(P)} \quad (7)$$

1.6 定向广播

为了加快算法的搜索速度,本文使用搜索角度^[10]来限制蚂蚁的搜索范围。通过搜索角度这一限制条件可以避免因为蚂蚁泛滥而导致的搜索速度变慢。算法的搜索角度为当前节点朝向基站方向的角度 θ 。

蚂蚁从源节点 v_o 出发进行目标点为 v_s 的搜索后,蚂蚁从当前节点 v 选择下一跳节点时,只从邻居集合 $\text{Neighbour} = \{(X_1, Y_1, \alpha_1), (X_2, Y_2, \alpha_2), \dots, (X_n, Y_n, \alpha_n)\}$ 中选择在搜索角度 θ 之内的作为下一跳节点。

因为采用了搜索角度,在每轮结束后,能量有变化的节点不需要向它的所有邻居节点 Neighbour 都广播自己的最新剩余能量,只需要向有价值的邻居 $\text{Neighbour}_{\text{need}}$ 进行定向广播以通告自己的最新剩余能量,以便自己在下一轮中被邻居节点选中成为下一跳节点。当搜索角度为 θ 时,有价值的邻居节点为本节点背向基站方向 $(360 - \theta)^\circ$ 范围内的邻居。因为在使用了搜索角度限制蚂蚁寻找下一跳的范围后,只有这部分节点才可能在下一轮选择本节点作为下一跳节点。定向广播公式如式(8)所示,式中 r 是广播半径, α 是传输衰减系数。

$$P = \frac{\theta}{360} r^\alpha \quad (8)$$

APAS 算法中使用定向广播向有价值的邻居进行定向广播后,能够节省的能量 ΔE 如式(9)所示:

$$\Delta E = (1 - \frac{360 - \theta}{360}) r^\alpha \quad (9)$$

1.7 APAS 算法的实现

下面阐述 APAS 算法,伪代码如算法 1 所示。

算法1 APAS 算法伪代码

1. At the beginning, $Nc = 1$;
2. m forward ants start from source node S , use equationin (1) to search the next node;
3. While $E_A(t+n) \neq E_A(t)$ do
4. node A broadcasts $E_A(t+n)$ to $Neighbour_{need}$;
5. End while
6. When m forward ants reach base, calculate the QoS value of each ant with equationin(7), ant with the highest value is the best ant,
7. Send backward ant to update pheromone of path which the best ant has passed with equationin(2)and(6);
8. If $\tau_{ij} < \tau_{mi}$ AND $up = 1$ OR $\tau_{ij} > \tau_{mi}$ AND $up = 1$ then
9. $\tau_{ij}(Nc+1) = 1.1\tau_{ij}(Nc)$
10. Else
11. $\tau_{ij}(Nc+1) = P \times \tau_{ij}(Nc) + \Delta\tau_{ij}(Nc)$
12. End If
13. If $pp = -1$
14. $P(Nc+1) = 0.95P(Nc)$
15. Else If $pp = 1$
16. $P(Nc+1) = 1.05P(Nc)$
17. Else If $pp = 0$
18. $P(Nc+1) = 1.15P_o$
19. End If
20. End If
21. End If
22. If $Nc < N_{max}$
23. $Nc = Nc + 1$, return to 2
24. Else If
25. End

2 仿真实验

2.1 仿真环境

为了分析 APAS 的有效性,本文以 MATLAB 作为实验平台。在相同实验环境中对 APAS 和 MMAS 算法的 QoS 值、延时、丢包率、能量消耗进行仿真、分析和比较。其中,在仿真场景的区域大小为 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 的区域内随机分布 100 个传感器节点,基站位于坐标 $(0,0)$ 。在场景中随机设置 3 个干扰源,节点距离干扰源越近,丢包率越高。节点的通信半径为 70 m,数据包长度为 20 000 bit,节点的初始能量为 3 J,循环轮数为 200 轮。传输能耗模型和干扰模型如式 (10) 和式 (11) 所示。式 (11) 中 C_{init} 为基本丢包率, R_1 为干扰源 1 的干扰半径,当节点 i 位于其干扰半径内的时候计算节点 i 和干扰源 1 的距离 $length_1$, 干扰源 2 和 3 以此类推。仿真实验的其它参数见表 1 所示。

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d^2, & d < d_o \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_o \end{cases} \quad (10)$$

$$C(i) = C_{init} + \frac{0.2 * (R_1 - length_1)}{R_1} + \frac{0.2 * (R_2 - length_2)}{R_2} + \frac{0.2 * (R_3 - length_3)}{R_3} \quad (11)$$

表1 实验仿真参数

参数	取值
j_o	2
k_o	1
l_o	2
E_{elec}	5×10^8
ϵ_{fs}	10^{-11}
ϵ_{mp}	1.3×10^{-15}
d_o	70
C_{init}	0.05

2.2 仿真结果分析

图 1 显示的是随着时间的推移全局最优蚂蚁搜索路径的 QoS 值进化状况。从图中可以看出,随着时间的推移,APAS 算法开始超过 MMAS 算法。因为 MMAS 算法的各路径的信息素强度差距随着蚂蚁的搜索而逐渐拉大,使后续的蚂蚁逐渐聚集在根据前面搜索经验得到的较优路径上,忽视了对信息素强度稍差路径的搜索,所以较容易陷入局部最优解。APAS 算法通过信息素和挥发系数的自适应升降过程,能够很好的在保证对较优秀路径进行搜索的同时,兼顾较差路径的搜索以增强对全局最优解的搜索能力;同时因为挥发系数在后期保持较高的值可以保证收敛时间。由图中可以看出,APAS 算法搜索得到的最优解值是 MMAS 算法搜索得到的最优解值的 120%;MMAS 算法的收敛时间是 APAS 算法的 180%。

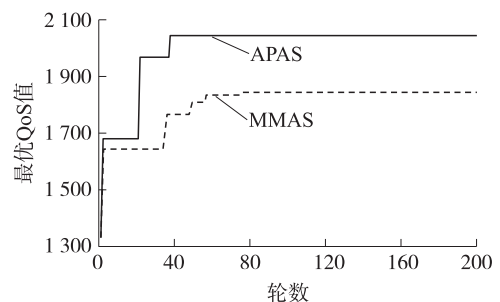


图1 APAS 算法和 MMAS 算法的最优 QoS 值

图 2 显示的是随着时间的推移每轮所有蚂蚁搜索路径的平均 QoS 值状况。从图中可以看出,在初始阶段,二种算法中的路径平均 QoS 值相差不大。这是因为算法在开始时,各路径上节点能量损耗不大,二种算法进行的局部搜索时主要依靠的启发因子搜索的效率相差不大。但 80 轮之后,平均 QoS 值的差距就逐渐显现出来。这时各路径的信息

素强度和启发因子随着蚂蚁的每轮搜索逐渐开始有所差别,此时蚂蚁使用 APAS 算法能够根据信息素和启发因子搜索到有利于满足 QoS 需求的路径。在后 120 轮以后,APAS 算法因为在选择下一跳节点的时候考虑了节点的剩余能量,所以可以很好地避免在选择路径时选到濒临死亡的节点而加剧全网节点的死亡速度;MMAS 算法未考虑能量因素,在 120 轮以后节点会陆续死亡,由图所示 APAS 算法在 80 轮之后表现优于 MMAS 算法。

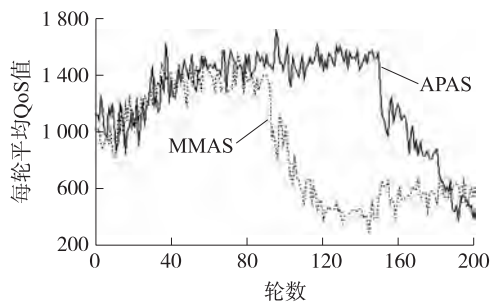


图 2 APAS 算法和 MMAS 算法的每轮平均 QoS 值

图 3 显示的是随着时间的推移,死亡节点数的变化情况。从图中可以看出,MMAS 算法中出现节点死亡发生在 10 轮左右,APAS 算法中出现节点死亡发生在 30 轮左右。所以 APAS 算法的第一个节点死亡的时间是 MMAS 算法的 300%。从图可以看出,最后的 MMAS 算法死亡节点数是 APAS 算法的 200%。这是因为 APAS 算法在考虑选择下一跳节点的时候,考虑了下一跳节点的剩余能量,避免了单个节点因为被使用频繁而过早死亡,从而有效的平衡了网络能耗。与 MMAS 相比,APAS 出现第一个节点死亡和最终的死亡节点数都比较优秀,这是由于 APAS 通过把能量考虑进了信息素强度和启发因子,从而使节点的能耗更低而且均衡性更好。

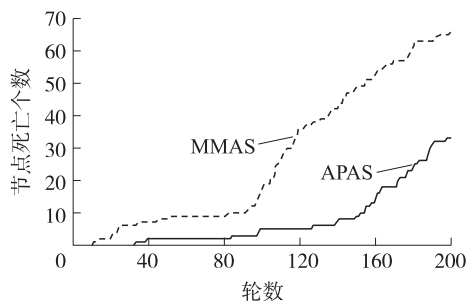


图 3 APAS 算法和 MMAS 算法的死亡节点数

图 4、图 5 对比了 5 次,每次 200 轮通过 APAS 和 MMAS 两种算法得出路径的丢包率,时延。从图中可以看出,MMAS 算法的丢包率是 APAS 算法的 130%,MMAS 算法的时延是 APAS 算法的 120%。这是因为 APAS 通过把时延和丢包率考虑进了信息

素和启发因子,从而使蚂蚁搜索的路径能够很好地满足这些 QoS 参数的需求。

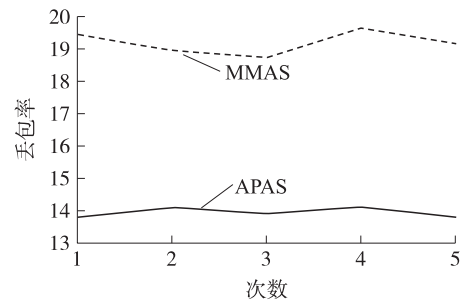


图 4 丢包率比较

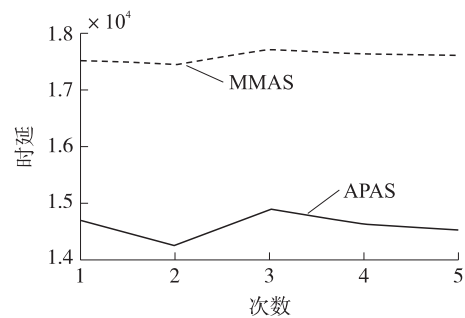


图 5 时延比较

3 结论

本文在最大-最小蚁群算法的基础上,提出一种信息素和挥发系数自适应的传感器网络 QoS 路由算法 APAS。在该算法中,通过信息素和挥发系数的自适应变化过程,改善了 MMAS 收敛慢的缺点,并且提高全局搜索能力。APAS 还通过使用定向广播,让能量有变化的节点只需向有价值的邻居通告自己的剩余能量,从而使全网的能耗得以降低。对 APAS 的仿真证明,APAS 有较好的 QoS 路由性能,并且使传感器网络有较长的生存周期。我们下一步的工作是将 APAS 算法的信息素分发方案进行改进,以适应大规模网络。

参考文献:

- [1] 文浩,林闯,任丰原,等. 无线传感器网络的 QoS 体系结构[J]. 计算机学报,2009,32(3):432-440.
- [2] Akyildiz I F. A Survey on Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. Computer Networks(Elsevier), 2007, 51(4): 921-960.
- [3] Igor M. B. Spadoni, Regina B. Araujo, Cesar Marcondes. Improving QoS in Wireless Sensor Networks through Adaptable Mobile Agents[C]//Proc of the IEEE Conference on INFOCOM Workshops, 2009: 1-5.
- [4] Jaydip Sen, Arijit Ukil. An Adaptable and QoS-aware Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proc of the Wireless VITAE, 2009: 767-771.

- [5] Petcharat Suriyachai, Utz Roedig, Andrew Scott. Implementation of a MAC Protocol for QoS Support in Wireless Sensor Networks [C]//Proc of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2009: 1-6.
- [6] Chen Yunfeng, Nidal Nasser. Enabling QoS Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proc of the IEEE International Conference on Communications, 2008: 2421-2425.
- [7] 梁华为,陈万明,李帅,等. 一种无线传感器网络蚁群优化路由算法[J]. 传感技术学报,2007,20(11):2450-2455.
- [8] Thomas S, Holger H H. Max-Min Ant System[J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16(8): 889-914.
- [9] Jeffrey E. Wieselthier, Gam D. Nguyen, Anthony Ephremides. Energy-Aware Wireless Networking with Directional Antennas: The Case of Session-Based Broadcasting and Multicasting[J]. IEEE transaction on Mobile Computing, 2002, 1(3): 176-190.
- [10] Yin Guisheng, Yang Guang, Yang Wu. An Energy-Efficient Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks [C]//Proc of ICICSE, 2008: 181-186.



王寅(1985-),男,重庆人,重庆邮电大学计算机科学与技术学院在读硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络 QoS 路由、无线自组织网络,ok-wang-ok@163.com;



尚凤军(1972-),男,内蒙古人,重庆邮电大学工作,博士/副教授,主要研究方向为无线传感器网络、网络流量测量、WiMAX 等;



任东海(1984-),男,河南新乡人,硕士研究生,主要研究方向为无线自组织网络、无线传感器网络,sqrdh0613@163.com.