

基于 ACS 的无线传感器网络区分服务路由算法

赵宏^{1,2}, 胡智^{1,2}, 闻英友^{1,2}

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 软件中心, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 针对无线传感器网络中数据传输的不同要求, 将 QoS 分为 3 类, 根据无线链路的特点提供区分服务。利用博弈论分析了数据传输在延迟、可靠性与网络能量开销之间的关系, 基于改进的蚁群优化算法 ACS(ant colony system), 设计了区分服务路由算法 ADSGR(ant colony system based differentiated service and game-theory routing), 依据不同 QoS 要求, 选择适当的路由, 提高网络的整体性能和资源利用率。实验结果表明, 与现有算法相比, 该算法在数据传输的延迟、可靠性和能量开销上具有更好的性能。

关键词: 无线传感器网络; 蚁群优化; 区分服务; 博弈论; QoS 路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)10-0106-10

ACS based differentiated service routing algorithm in wireless sensor network

ZHAO Hong^{1,2}, HU Zhi^{1,2}, WEN Ying-you^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Software Centre, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Aiming at the different requirements of data transmission in wireless sensor networks, QoS was divided into three services. By using game theory, the relationship among the delay, reliability and energy consumption during the process of data transmission was analyzed. Based on ACS (ant colony system), ACS based differentiated service and game-theory routing (ADSGR) was proposed. In accordance with the diverse QoS requirements, the ADSGR chooses the suitable paths, and improves network performance and resource utility. Experimental results show the ADSGR has better performance than some other routing algorithms in terms of the delay, reliability and energy consumption.

Key words: wireless sensor network; ant colony system; differentiated service; game theory; QoS routing

1 引言

无线传感器网络主要由带有感知功能的通信节点组成, 节点通过自组织的网络通信协议为用户传输感知数据, 将传感技术、微机电技术和无线通信技术进行了综合应用^[1,2]。最近几年, 无线传感器网络由于在环境监控、军事国防、国家安全、抢险救灾和工业控制等领域的应用前景, 并且作为物联网的重要基础实施, 可与云计算服务连接等多种使

用方式, 受到了来自学术界和产业界的广泛关注。

随着物联网应用需求的不断发展, 一个无线传感器网络需要同时承载不同类型的感知数据, 并且可以并发运行, 不同类型的感知数据需按照不同服务质量要求发送到收集节点 sink。对于某一种物理环境的周期感知并发送到收集节点的数据, 仅有延迟的要求。例如, 精细农业中, 对土壤温度的监控, 数据反映的是当前一定时间内的环境值, 在有效的时间内有效, 又由于有较多的节点数量覆盖,

收稿日期: 2012-07-20; 修回日期: 2012-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60803131); 中央高校基本科研业务基金资助项目(N110818001, N100218001); 沈阳市科技计划基金资助项目(1091176-1-00)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60803131); The Special Fund from the Central Collegiate Basic Scientific Research Bursary (N110818001, N100218001) The Science and Technology Planning Project of Shenyang City (1091176-1-00)

所以，这类数据只需要在满足一个较低分组丢失率的条件下，短时间内到达收集节点即可。而对于没有固定收集周期的感知数据，如根据某一事件产生的数据，包括当感知数据值大于某一设定阈值时产生的异常事件数据，以及用户根据现场情况下达的立即查询请求驱动的用户查询数据，则需要保证在有效时延和分组丢失率(可靠性)下将数据传输到收集节点，对于一些媒体型数据，如图像，在定期采集后，需要在满足一定可靠性的情况下将其发送到收集节点，还有许多感知应用，都要依据应用场景而确定 QoS 要求。

无线传感器网络中的感知数据传输，需要服务质量 QoS 保证，可以将其分为 3 个方面^[3]。

1) 传输延迟。从源节点(感知节点)到目的节点(收集节点)传输数据分组和分组所需的延迟。

2) 传输可靠性。目的节点成功接收到的数据分组，所占源节点的实际发送数据分组的比例，即分组成功接收率，可靠性也可以用分组丢失率来表示，分组丢失率越低，可靠性越高。

3) 能量开销。无线传感器网络是以数据为中心的网络，能量开销来自于数据的处理和传输，而数据传输主要的能量开销。

由于无线传感器网络需要同时承载多个不同感知应用，这些感知应用的数据并不一定是同时传输，且在延迟、可靠性上也有不同的需求，因此，将多个感知应用产生的数据根据延迟、可靠性分为 3 类：QoS-1、QoS-2 和 QoS-3。

1) QoS-1。以要求传输延迟为主的感知数据，其分组丢失率只需满足数据可用性要求就可以，如周期型感知温度应用数据、湿度应用数据等。

2) QoS-2。以要求传输可靠性为主的感知数据，其延迟只需满足数据可用性即可，如监控拍照图片应用数据，连续时间温度监控应用数据等。

3) QoS-3。对传输延迟和可靠性都有严格要求的应用，如具体环境信息的用户查询应用，异常数据报警应用。

这 3 类 QoS 都需要兼顾网络能量开销，延长网络的整体使用时间。

传统的路由算法是节点根据数据传输延迟、传输可靠性和能量开销进行简单加权优化处理，从而找出网络内的最优路径，但是，节点按照 QoS 要求传输数据是需要消耗网络能量的，保证路由传输的延迟和可靠性，与网络能量开销之间并不是简单的

加权关系。节点通常具有一定的运算推理能力，可以利用在网络中采集的网络信息，进行决策寻找合适的路径进行数据转发，转发数据的节点根据邻居节点行为情况，选出最适合的邻居节点完成数据传输。博弈论正是一种研究决策的理论，依靠参加活动主体的决策，相互作用后得到整个活动的资源优化配置。使用博弈论建立路由模型可以从局部的节点决策行为，权衡数据传输的收益和开销，寻找到全局的最优路径，实现整个网络资源的合理利用。

本文根据无线传感器网络中数据传输的延迟、可靠性和能量消耗 3 个方面要求，将 QoS 分为 3 类，根据无线传感器网络的无线链路物理特点，提供区分的路由服务，分析了在保证延迟和可靠性要求下进行网络传输与能量开销的博弈关系，在此基础上，设计了基于 ACS 的无线传感器网络区分服务路由算法 ADSGR(ant colony system based differentiated service and game-theory routing)。利用通信性能较好的邻居节点传输高可靠性的数据，通信性能较差的邻居节点传输高延迟的数据，根据 QoS 的分类将蚂蚁分为 3 类，按照不同的 QoS 要求计算相应的启发因子，通过路径质量选择逻辑上距离收集节点较近的邻居节点转发数据，利用最大效用值更新路径信息素，加快算法收敛，节省网络能量开销，找到相应的最优路径。

2 相关工作

蚁群优化(ACO, ant colony optimization)方法^[4-6]是 M.Dorigo 提出的一种性能优良的启发式随机优化算法，采用正反馈机制实现分布式全局优化，通过信息素不断更新，最终收敛于最优路径上。ACO 应用于多目标全局优化和网络路由的组合优化求解等问题，采用分布式计算方式，且计算复杂度低，适合求解无线传感器网络的路由问题。文献[7]提出了一种多 QoS 保障的路由算法 ASAR，通过加权平均网络 QoS 参数并设置相应权重因子，利用蚁群算法进行路由选择。文献[8]提出了一种能量均衡的数据查询协议 EBDQ，根据路径上的能量消耗情况，对路由上信息素进行奖惩，使网络的能量消耗分散到不同的路径上，以平稳的方式降低整个网络能耗。文献[9]提出了基于改进蚁群算法的多径路由算法 ACMRA，对重要性不同的视频数据进行多径选择，提高网络数据吞吐量和视频传输性能。文献[10]提出了一种基于分簇结构的多 QoS 保障路由协议

AntSensNet, 通过建立多 QoS 参数的数学模型, 利用蚁群算法寻找使得目标函数值最大的路径。文献 [11] 提出了一个适用于无线传感器网络的新型路由协议, 利用蚁群算法优化路由, 提供有效的多路数据发送机制, 以便在节点失效的情况下获得可靠的通信。以上算法在求解 QoS 路由的某些方面上提高了性能, 但没有分析延迟、可靠性和能量开销在路由传输中的关系。

博弈论^[12]是应用数学的一个分支, 已成为经济学的主要分析工具之一, 近年来也被广泛应用于通信和计算机研究领域, 尤其是在无线传感器网络领域^[13]。文献 [14] 将非合作博弈理论应用于传感器节点传输信号的能量控制。文献 [15,16] 以传感器节点为中心, 使用合作博弈对传输可靠度和网络能耗进行优化, 在保证传输可靠度、数据融合条件下, 避免节点能量被过度消耗导致网络分区问题, 延迟网络使用时间。文献 [17] 考虑了路径可靠度、网络能耗和生存时间 3 个因素, 使用博弈论建立基于节点理性偏好的路由博弈模型, 并分析了模型的均衡问题。文献 [18] 提出了一种基于博弈论模型的能量平衡路由算法 GTEBR, 引入仲裁和自信概率, 将不完全信息的博弈转换为完全但不完美的博弈, 以解决能量不均衡问题。文献 [19] 采用非合作博弈理论对网络自私节点的能量保存和最大生命周期建模, 在此基础上建立分簇机制。这些算法并没有使用博弈对延迟、可靠性和能量开销进行分析, 但建立相应的路由算法。

本文对数据传输中延迟、可靠性和能量开销进行博弈分析, 兼顾无线传感器网络的无线链路特点, 综合考虑这些因素, 提出了基于蚁群优化的区分服务路由算法 ADSGR。

3 无线链路

无线传感器网络所工作的无线链路为 IEEE 802.15.4 规范, 无线链路的物理特点主要是不可靠性和非对称性^[20-22]。不可靠性表现在数据分组在经过无线链路后, 成功接收的概率随通信距离的增大而减小, 图 1 显示了分组成功接收率与距离的关系。当节点在通信性能较高距离内, 即“高效区”, 分组成功接收率大于 90%; 在通信性能较差距离内, 称为“空白区”, 分组的成功接收率小于 10%; 在两者之间的区域称为“过渡区”, 分组成功接收率在 20% 到 90% 之间。例如, 当 A 发送数据分组时,

由于 B 在高效区内, 所以可接收到 90% 以上的数据分组; C 的接收率比较低, 将 C 向 B 移近时, C 的接收率会升高, 但仍然会有一定的波动性; 由于 D 在空白区, 接收率基本为 0。

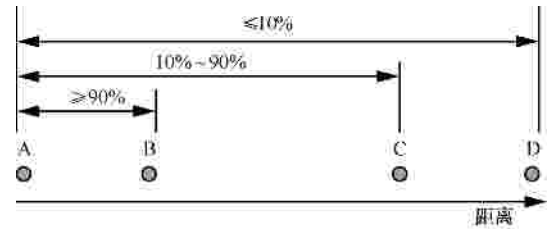


图 1 分组成功接收率与距离的关系

无线链路一般是双向的, 非对称性表现在双向链路上分组成功接收率的差值大于 25% 以上, 因此, 非对称链路主要发生在 2 个节点的通信距离在过渡区内, 受网络不同区域场强、功率和噪声等因素的影响。

根据无线链路的以上特点, 一个节点可以统计一定时间内与邻居节点在双向链路上的分组成功接收率来估计链路质量, ETX^[23]正是利用此方法, 接收节点利用指数加权移动平均算法计算分组成功接收率, 并将结果发送回发送节点, 发送节点再计算出链路质量, 同时接收节点也使用这种方式计算链路质量, 分组成功接收率越大, 链路质量越好, ETX 值越小。节点间的无线链路可以看成带 ACK 确认机制的双向信道, 节点 *i* 到邻居节点的单跳链路 ETX, 可由正向和反向链路的分组成功接收率计算得到, 设正向链路的分组成功接收率为 d_f , 反向链路的分组接收成功接收率为 d_r , 则分组的成功接收和确认概率期望为 $d_f \times d_r$, 发送一个数据分组可看成 Bernoulli 实验, 因此, 发送数据分组期望值为

$$ETX_{link} = \frac{1}{d_f \times d_r} \tag{1}$$

令 sink 节点的 ETX 值为 0, 其他节点到 Sink 节点的路径 ETX 为单跳链路 ETX_{link} 的累加和, 即 ETX_{path}

$$ETX_{path} = \sum_{i=1}^{hops} ETX_{link}^i \tag{2}$$

由于无线传感器网络物理链路的固有特点, 并且 ETX 值可以综合地反映无线链路质量, 在 CTP 协议中已成功应用^[24], 可取最近传输数据的时间段为参数, 将分组成功接收率在 75%~90% 区域和 90%~100% 区域的邻居节点转换为相应的 ETX_{link}

值,使用较大 ETX_{link} 区域内邻居节点传输 QoS-1 的数据,使用较小 ETX_{link} 区域内邻居节点传输 QoS-2 和 QoS-3 的数据,如图 2 所示,以区分提供不同 QoS 类别服务的节点。

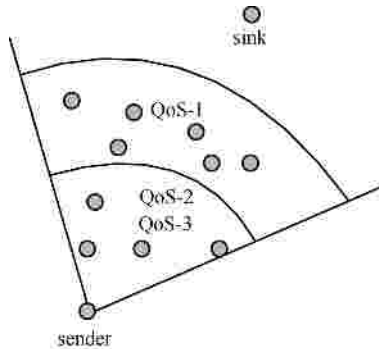


图 2 提供区分 QoS 服务的邻居节点

4 博弈路由模型

无线传感器网络节点都具有一定的计算推断能力,可以通过自身采集到的网络信息,决策路由中的下一跳节点。为了满足服务质量要求,并实现全网优化,网络节点通常考虑 2 个方面因素。

1) 尽可能选择能够提供最大 QoS 收益的节点转发数据到 sink 节点,这些数据包括节点自身感知到的数据以及节点转发的数据。

2) 尽可能选择后续跳数最少且能量最大的邻居节点转发数据,从而延长整个网络和节点的生命期。避免从源节点到目的节点路径上的关键节点由于频繁转发数据而能量耗尽,造成网络分区,降低覆盖率,缩短网络使用的生命期。

整个网络的路由过程是一个动态过程,每一个参与路由的节点权衡发送和转发数据的收益和开销,从网络节点的个体预测行为和实际行为,来优化全网的资源。

4.1 网络节点及行动顺序

网络节点是整个博弈路由建立过程中的参与者,是网络中可以正常工作的传感器节点,可以产生数据,也可以转发数据的节点。首先,源节点产生感知数据,发起路由行动,源节点选择一个较为合适的邻居节点进行转发,邻居节点收到消息后采取相应的行动再进行转发,一直持续到下一跳邻居节点为 sink 节点时停止。

4.2 行动策略空间与意外事件

节点参与传递数据并向一个邻居节点转发路

由请求。参与者节点 i 的策略集 $L_i=(l_{i,1}, \dots, l_{i,i-1}, l_{i,i+1}, \dots, l_{i,s}), l_{i,j} \in \{0,1\}, l_{i,j}=1$ 表示节点 i 选择节点 j 作为下一跳节点,而 $l_{i,j}=0$ 表示节点 i 未选择节点 j 作为下一跳节点。通常情况下,节点仅转发数据分组到一个节点,可以将这种策略空间限制到纯策略,则向量 L_i 中最多只有一个值为 1,其余都为 0。将节点 i 的上一跳节点从策略集中删除,再将不符合通信质量要求邻居节点从策略集中删除,根据链路质量将剩下邻居节点分为对应 QoS-1 的邻居节点集 $L_i^{\text{QoS-1}}=(l_{i,1}, \dots, l_{i,m})$,以及对应 QoS-2 和 QoS-3 的邻居节点集 $L_i^{\text{QoS-2,3}}=(l_{i,1}, \dots, l_{i,n})$,其中, m 表示节点 i 在满足 QoS-1 的链路质量时的邻居节点个数, n 表示节点 i 在满足 QoS-2 和 QoS-3 的链路质量时的邻居节点个数。由于每个节点的邻居节点个数都是有限的,因此,纯策略空间的博弈中参与者节点的策略空间也是有限的。

由于无线传感器网络节点资源严重受限,通信和运行表现为易失败性,设节点 i 失败概率为 $1-p_i$,根据链路质量选择邻居节点,因此,节点 $i^{\text{QoS-1}}$ 的失败率 $1-p_i$ 为 $[0,0.2]$ 的均匀分布,节点 $i^{\text{QoS-2,3}}$ 的失败率 $1-p_i$ 为 $[0,0.1]$ 的均匀分布。

4.3 信息集和效用函数

路由参与节点的每个行动都会为网络的数据传输带来一定的效用,可由效用支付函数表示,包括收益(benefit)和代价(cost)。由于博弈中参与节点的策略和行动都是相互依赖的,因此每个参与节点的效用都与其他参与节点策略有关。路由的过程是选择下一跳节点的过程,下一跳邻居的信息集对于当前的策略选择非常重要,收益和代价的计算主要是根据邻居节点的信息集。信息集主要包括对所转数据经过该节点到达 sink 节点所需的时间、可靠率、能量信息和跳数信息,再基于这些信息计算收益和代价,从而得到路由效用值。效用值越大,说明该邻居节点越应被选为下一跳节点,即该策略越好。

1) 收益

节点在发送和转发数据时,根据每一个邻居节点到 sink 节点的延迟、可靠率和能量计算在该条路由路径上的收益。无线传感器网络协议是一种自组织网络协议,并且无线链路并不总是稳定的,这使得数据在路由的过程中会出现波动,甚至丢失,很难给出精确的测量,可以采用模糊隶属度的方法给出每条路径的评价值^[25,26],对节点在延迟、分组丢

失率和能量上的评价 $A_j^{D_{QoS-t}}$, $A_j^{L_{QoS-t}}$ 和 A_j^E 为

$$A_j^{D_{QoS-t}} = \begin{cases} 0, & d_j \geq D_H \\ \left(\frac{D_H - d_j}{D_H}\right)^m, & d_j < D_H \end{cases} \quad (3)$$

$$A_j^{L_{QoS-t}} = \begin{cases} 0, & l_j \geq L_H \\ \left(\frac{L_H - l_j}{L_H}\right)^m, & l_j < L_H \end{cases} \quad (4)$$

$$A_j^E = \frac{E_j^{re}}{E_j^{init}} \quad (5)$$

其中, D_H 是最大传输延迟, L_H 是最大分组丢失率, d_j 与 l_j 分别为节点 j 提供的延迟和分组丢失率。 E_j^{re} 与 E_j^{init} 分别为节点 j 的剩余能量与初始能量。因此, 在网络传输过程中, 通过节点 j 发送或转发数据的综合评价值为

$$A_j^{QoS-t} = a_D A_j^{D_{QoS-t}} + a_L A_j^{L_{QoS-t}} + a_E A_j^E \quad (6)$$

其中, a_D 、 a_L 和 a_E 分别为反映延迟、可靠率和能量相对重要程度的权重系数, 其和为 1。对于 QoS-1 数据, $a_D + a_E = 1$, $a_L = 0$; 对于 QoS-2 数据, $a_D = 0$, $a_L + a_E = 1$; 对于 QoS-3 数据, $a_D + a_L + a_E = 1$ 。因此, $0 < A_j^{QoS-t} < 1$, 其值越大, 该邻居节点的综合评价价值越高。因此, 节点的综合收益值就是选择所有后续路由节点的综合评价值的平均。

$$B_j^{QoS-t} = \frac{1 + \sum_{k \in P} p_k A_k^{QoS-t}}{L(P)} \quad (7)$$

其中, $L(P)$ 是路径 P 的长度, p_k 是未发生意外事件的概率, sink 节点的值为 1。

2) 代价

节点在发送和转发数据时, 主要的能量开销包括计算开销和通信开销, 而计算开销远小于通信开销^[27]。通信开销主要是由数据的长度和经过的跳数来确定。在考虑跳数和数据分组长度的情况下, 发送和转发数据的通信开销可简化为

$$T_j^{QoS-t} = (E_{rx} + E_{tx}) \cdot k \cdot L(P) \quad (8)$$

其中, E_{rx} 和 E_{tx} 分别为发送和接收 1bit 数据的能量消耗, k 为数据消息长度, P 是路由路径, $L(P)$ 是路径 P 长度, 即跳数。考虑路由路径上的通信开销并不能反映出路径上节点的代价。当路径上节点的能量较大, 且路径较短时, 路由通信代价较小, 从而

容易被选为下一跳节点。通过路径长度和网络直径的比值, 以及它与路由节点的剩余能量率, 可以计算代价为

$$C_i^{QoS-t} = z_{QoS-t} \cdot PT_j^{QoS-t} \cdot PE_j^{re} \quad (9)$$

$$PT_j^{QoS-t} = (E_{rx} + E_{tx}) \cdot k \cdot \frac{L(P)}{D} \quad (10)$$

$$PE_j^{re} = \frac{\sum_{k \in P_j} E_k^{re}}{\sum_{k \in P_j} E_k^{init}} \quad (11)$$

其中, C_i^{QoS-t} 是第 t 类 QoS 数据在经过节点 j 的路由代价, D 是网络直径, z_{QoS-t} 是调整系数, 调节能量消耗占的优化比重, 与收益中能量所占比重有关。因此, 将路径上的节点能量和通信开销进行综合考虑, 给出路径的代价。

3) 效用(payoff)

整个的路由过程, 就是网络中参与路由节点的博弈过程。令 $l = (l_i, l_{-i})$ 是路由博弈中任一策略组合, 其中 l_i 表示参与节点 i 的策略, $l_{-i} = (l_1, l_{i-1}, l_{i+1}, \dots, l_n)$ 表示其他参与节点的策略。该策略组合下参与节点 i 的效用函数用 $p_i^{QoS-t}(l_i, l_{-i})$ 表示, 包括节点 i 的收益 B_i^{QoS-t} 和代价 C_i^{QoS-t} 两部分。节点 i 的 B_i^{QoS-t} 和 C_i^{QoS-t} 都与所有参与节点的策略有关, 路由博弈中节点的策略和行动是相互影响的。只有参与传递数据任务的节点才需要考虑数据在传输过程的收益和代价的权衡, 而对于那些没有参与传递数据任务的节点, 不需要付出能量代价和考虑 QoS 收益, 所以, 效用值可以为零, 其效用为

$$p_i^{QoS-t}(l_i, l_{-i}) = \begin{cases} B_i^{QoS-t} - C_i^{QoS-t}, & i \in P \\ 0, & i \notin P \end{cases} \quad (12)$$

定理 1 源节点到 sink 节点的纳什均衡路由路径存在。

证明 对于节点 i 的策略 l_i , 有

$$p_i^{QoS-t}(l_i, l_{-i}) \geq p_i^{QoS-t}(l'_i, l_{-i}) \quad 0, \quad l'_i \in L_i \quad (13)$$

则 $p_i^{QoS-t}(l_i, l_{-i})$ 是当前节点 i 的最大效用值。因此, 当节点改变自己的策略时, 其效用值将变小, 节点的理性推断在纯策略空间情况下, 会选择较大效用值的策略。由于节点的策略空间是有限的, 所以, 根据掌握的邻居节点信息集, 节点 i 的路由博弈策略为效用最大值, 并且所有的参与节点的效用值都

是最大的，从而整条路径上节点的效用值最大，形成纳什均衡。

5 ADSGR 算法设计与分析

本文的目标是为每一类 QoS 数据寻找到最优的路由路径，由于无线传感器网络的无线链路特点以及环境参数较多，会存在多个纳什均衡路径。通过无线链路对 QoS 提供区分服务，在博弈的效用基础上，采用蚁群优化 ACS，设计了基于 ACS 的区分服务路由算法。根据无线传感器网络的 3 种 QoS 分类，分别创建 3 类蚂蚁，通过各类路径上信息素和启发因子计算下一跳节点，经过多次迭代找到最适合各类 QoS 数据的路由。

5.1 下一跳节点转移函数

定义 1 路由梯度方向，通过链路质量的累加值 ETX_{path} 反映当前节点到 sink 节点的逻辑距离， ETX_{path} 越小，说明节点离 sink 节点越近，越应该选择这样的节点进行路由，用 $Direct(j)$ 表示。

如果当前节点为 i ，下一跳邻居节点为 j ，则 $Direct(j)$ 为

$$Direct(j) = \begin{cases} 1, & ETX_{path}^j < ETX_{path}^i \\ 0, & ETX_{path}^j \geq ETX_{path}^i \end{cases} \quad (14)$$

根据邻居节点选择博弈过程的效用函数和路由梯度方向，使用 tabu 表记录蚂蚁所路由过的节点，则第 t 类服务的蚂蚁 k 从节点 i 转移到邻居节点 j 的转移概率函数如下式

$$S = \begin{cases} \arg \max_{j \in tabu_k} (t_{ij}^{QoS-t})^a \cdot (h_{ij}^{QoS-t})^b \cdot Direct(j), & q \leq q_0 \\ S, & q > q_0 \end{cases} \quad (15)$$

$$S = (P_{ij}^{QoS-t})_k = \begin{cases} \frac{(t_{ij}^{QoS-t})^a \cdot (h_{ij}^{QoS-t})^b \cdot Direct(j)}{\sum_{j \in tabu_k} (t_{ij}^{QoS-t})^a \cdot (h_{ij}^{QoS-t})^b}, & j \notin tabu_k \\ 0, & j \in tabu_k \end{cases} \quad (16)$$

其中， q_0 是选择参数 ($0 < q_0 < 1$)； t_{ij}^{QoS-t} 表示在路径 (i,j) 上的第 t 类服务的信息素； h_{ij}^{QoS-t} 为相应的 QoS 类服务的启发因子，是节点 i 在路由选择博弈时的效用函数；参数 a 、 β 可反映路由选择中路径上残留信息素和启发因子的重要程度， a 越大，蚂蚁选择其他蚂蚁走过的路径可能性就越大，表明蚂蚁协作性越强， β

越大，蚂蚁受效用函数对下一跳影响就越大。

5.2 路径信息素更新规则

1) 全局更新

在 m 只蚂蚁成功地完成一次路由寻径后，根据博弈的效用值，选出最大效用值的路由：

$$u_{cur}^{QoS-t} = \max \left\{ (u_{path}^{QoS-t})_k \right\}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

其中， $(u_{path}^{QoS-t})_k$ 是第 k 只蚂蚁所经路径的效用值， u_{cur}^{QoS-t} 是路由路径中的最大效用值，表明所走的路由路径为所有路径中的最优路径，应该对该路径进行奖励，增大路径上的信息素数量，形成正反馈机制。用最大效益值来进行全局更新，如果节点 i 和 j 在此路径上，则

$$t_{ij}^{QoS-t} = (1 - r_G) t_{ij}^{QoS-t} + r_G \Delta t_{ij}^{QoS-t} \quad (18)$$

$$\Delta t_{ij}^{QoS-t} = \begin{cases} \frac{Q \cdot u_{cur}^{QoS-t}}{L(P)}, & i, j \in P \\ 0, & i, j \notin P \end{cases} \quad (19)$$

其中， r_G ($0,1$) 是挥发系数，防止链路上信息素的无限增长； t 表示 QoS 类别； Δt_{ij}^{QoS-t} 表示在路由寻径搜索中节点 i 到节点 j 上 t 类信息素的增量； P 是 u_{cur}^{QoS-t} 对应的路径， $L(P)$ 是路径的长度； Q 是调整系数。

2) 局部更新

当蚂蚁经过相邻节点 i 和 j 时，需对所经过的边进行信息素更新。

$$t_{ij}^{QoS-t} = (1 - r_L) t_{ij}^{QoS-t} + r_L \Delta t_{ij}^{QoS-t} \quad (20)$$

其中， r_L ($0,1$) 是一个参数， Δt_{ij}^{QoS-t} 可以取 0。

5.3 算法步骤

步骤 1 初始化， $Nc=0$ ，设置节点每条边的信息素为常数。

步骤 2 针对不同 QoS 类路由请求，构造相应的 m 只寻径蚂蚁，每只蚂蚁根据式(15)，在相应的 QoS 类的邻居节点中选择下一跳路由节点，并将当前节点加入到 tabu 表中。

步骤 3 利用 QoS 类的蚂蚁 k 进行路由寻径，对于经过的路径边，根据式(20)进行局部更新。

步骤 4 累加蚂蚁 k 路由路径中的节点效用值，计算出路径的效用值，根据式(17)寻找出最大效益值。

步骤 5 在本次路由寻径迭代后，根据式(18)，对最大效用值的路径进行全局更新，按照 tabu 表中

路径节点的记录顺序,反向更新相应边上的信息素。

步骤 6 迭代次数 $Nc=Nc+1$, 如果 Nc 小于设定迭代次数且不收敛, 转步骤 2, 否则, 转步骤 7。

步骤 7 更新节点路由表的服务路径, 停止当前搜索周期, 设定下一搜索周期定时器, 当定时器到期时, 转步骤 1。

5.4 算法分析

定理 2 ADSGR 算法得到的路由路径是最优路径。

证明 算法在更新时总是选择效用值最大的路径进行全局更新, 从而增加了路径上信息素浓度, 这样每次循环中效用最大的路径上总是可以累加到更多的信息素, 经过多次迭代后, 在效用值大的路径上的信息素浓度也会最大, 所以, 算法得到的路由路径收敛于最优路径。

定理 3 ADSGR 算法不会产生回路。

证明 由于路由梯度方向的指引, $Direct(j)=1$, 节点 i 在选择邻居节点 j 转发数据时, 总是选择比自己 ETX_{path} 小的节点转发, 即 $ETX_{path}^i > ETX_{path}^j$, 也就是说节点 j 比节点 i 在通信距离上更加接近 sink 节点, 同样, 节点 j 在选择邻居节点 k 转发数据时, 也采取这种方法, 所以, 每一跳节点在选择转发节点时, 都选择比自己距离 sink 更近的节点, 从而不会返回到之前距离 sink 节点较远的上流节点, 避免了回路的产生。

定理 4 路由报文开销复杂度为 $O(Nc \cdot n \cdot \log n)$ 。

证明 设 t_0 是初始信息素值, $f_1(n)$ 为更新的效用值最大路径上的平均信息素值的增长系数, $f_2(n)$ 为全局更新后的效用值最大路径上的平均信息素值的增长系数, 根据蚁群算法计算过程, 可得到

$$j_1 \cdot t_0 = t_0 - t_0 \cdot (1-r)^z + j_2 \cdot t_0 \cdot (1-r)^z \quad (21)$$

其中, r 为挥发系数, z 为局部更新中最优路径上的蚂蚁数, 选择参数为 q_0 , 则网络蚂蚁的数量为

$$m = z / q_0 \quad (22)$$

对式 (21) 两边取对数, 可得,

$$m = \frac{\log(j_1 - 1) - \log(j_2 - 1)}{q_0 \cdot \log(1-r)} \quad (23)$$

而路由的跳数 $h(n)$ 又受网络规模 n 的限制, 通常小于 n , 是 n 的一个子集, 所以, $m \times h(n)$ 是网络路由报文的数量级, 复杂度为 $O(Nc \cdot n \cdot \log n)$ 。

6 实验结果与分析

本文以 TOSSIM^[28] 作为网络模拟环境, 使用 Java 语言随机生成网络拓扑, 对 ADSGR 进行了仿真实验。在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的区域内随机地部署 100 个节点, 组成一个无线传感器网络。采用均匀分布的方式随机部署网络节点, 约每 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 范围内部署 2~6 个节点, 节点间隔距离不小于 7 m。数据分组长度为 100 byte, 通信半径约 40 m, 迭代次数 Nc 为 35。ADSGR 的主要参数设置如表 1 所示。

表 1 ADSGR 的主要参数

QoS 分类	α	β	α_D	α_L	α_E	ρ
QoS-1	2	3	0.5	0	0.5	0.5
QoS-2	2	3	0	0.5	0.5	0.5
QoS-3	2	3	0.3	0.3	0.4	0.4

随机选取区域边缘的某一处节点为 sink 节点, 在整个区域内随机选取 30 个节点作为感知数据源, 以它们到 sink 节点的距离进行编号。再进行大量数据发送实验, 并将 ADSGR 与 Dijkstra 和 MMSPEED^[29] 进行比较, 实验结果如图 3~图 8 所示。

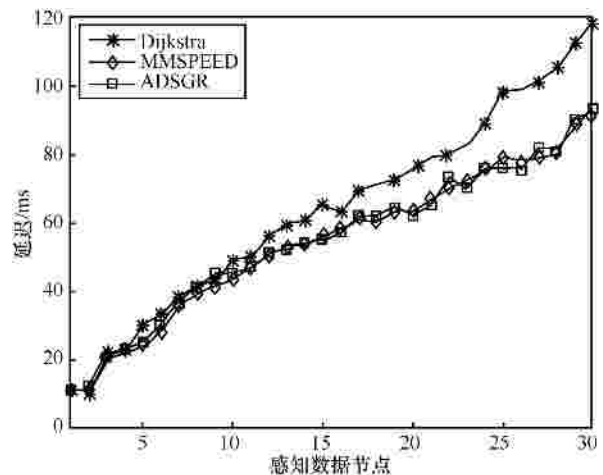


图 3 QoS-1 数据传输延迟比较

图 3 和图 4 分别表示在传输 QoS-1 和 QoS-3 数据时的延迟。可以看出, 在节点距离 sink 较近时 3 种算法的传输延迟基本相等, 但是, 随着到 sink 节点距离的增大, MMSPEED 和 ADSGR 在传输延迟上比 Dijkstra 具有更小的传输延迟。ADSGR 对于 QoS-1 数据传输的平均延迟是 54.57 ms, 约为 Dijkstra 的 85%, 但稍大于 MMSPEED, 这是由于 ADSGR 选择的转发节点比 MMSPEED 的更接近当前节点,

从而增加跳数，且延长时间。对于 QoS-3 数据传输，在分组丢失率小于 10% 时，ADSGR 平均延迟是 55.97 ms，约为 Dijkstra 的 88%，且小于 MMSPEED。在有可靠性要求时，ADSGR 和 MMSPEED 都选择较为可靠的节点，即较近节点，经过优化后，ADSGR 在传输 QoS-3 数据时，延迟性能更好。

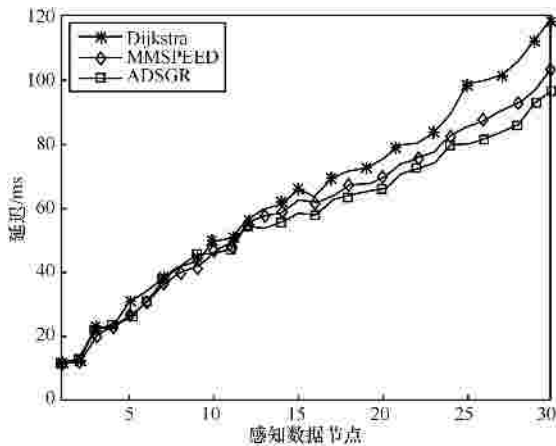


图 4 QoS-3 数据传输延迟比较

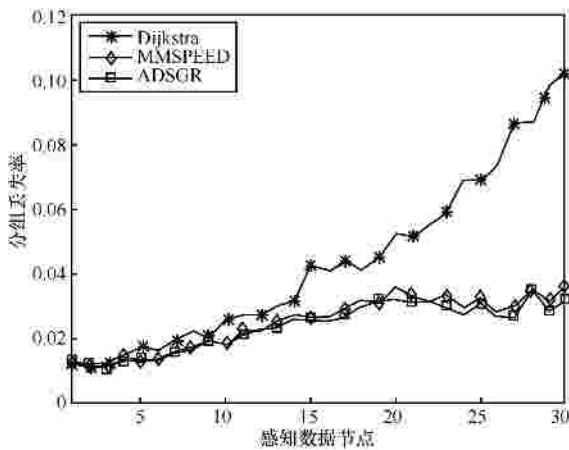


图 5 QoS-2 数据传输分组丢失率比较

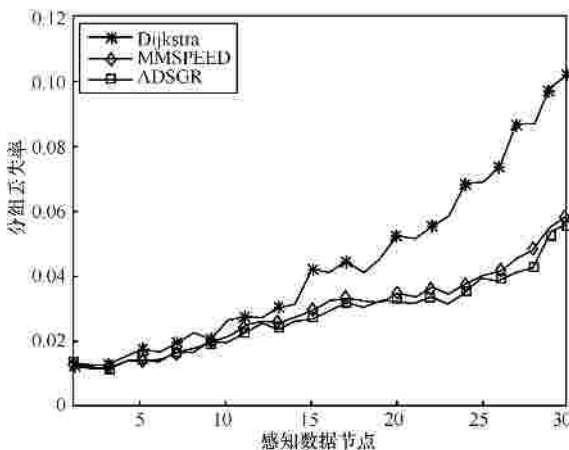


图 6 QoS-3 数据传输分组丢失率比较

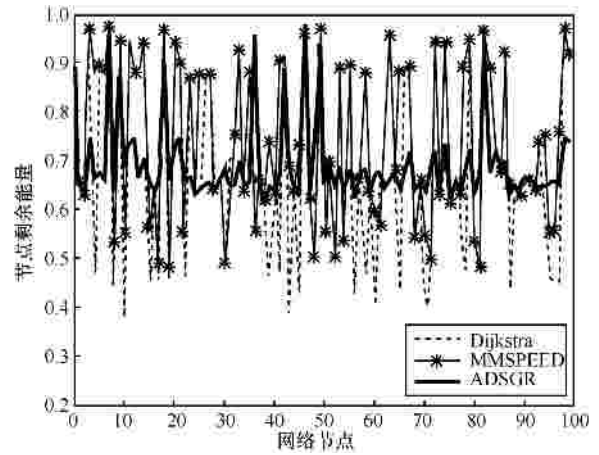


图 7 能量比较

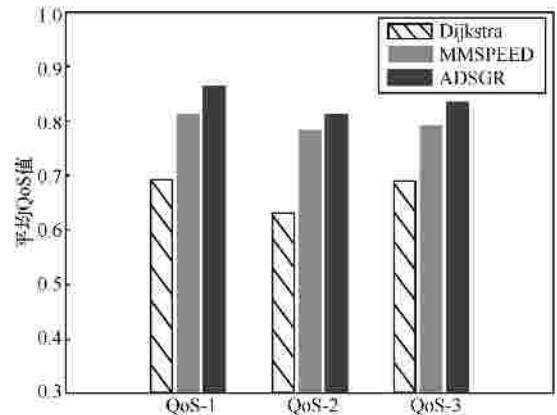


图 8 QoS 值比较

图 5 和图 6 分别表示在传输 QoS-2 和 QoS-3 数据时的分组丢失率。与延迟类似，随着到 sink 节点距离的增大，MMSPEED 和 ADSGR 在分组丢失率上比 Dijkstra 具有更小值，但是，在节点距离 sink 较近时，3 种算法的分组丢失率也基本相等。由于距离增加，跳数也增加，多次转发后分组丢失率也相应地增加了。ADSGR 对于 QoS-2 数据传输分组丢失率约为 0.023 6，明显低于 Dijkstra，在选择邻居节点转发时，ADSGR 和 MMSPEED 都选择较近节点转发，经过优化后，ADSGR 分组丢失率略小于 MMSPEED。对于 QoS-3 数据传输，ADSGR 在满足数据传输延迟小于 200 ms 的情况下，约为 0.027 4，也低于 Dijkstra 和 MMSPEED。在同时考虑延迟和分组丢失率的情况下，ADSGR 可以选择综合值最好的节点转发数据，从而得到更低分组丢失率，保证了数据传输的可靠性。

图 7 显示了在运行一段时间后节点剩余能量分布，ADSGR 在能耗方面会选择剩余能量较多，且跳数较少的节点转发数据，再优化路由过程，因此，

与 Dijkstra 和 MMSPEED 相比,网络能耗更均衡。

图 8 为感知区域节点的平均 QoS 值,从中可看出,ADSGR 在感知区域内的节点平均 QoS 值都高于 Dijkstra 和 MMSPEED。通过以上实验比较可以看出,ADSGR 在延迟、可靠性、能耗和 QoS 值上具有更好的性能。

7 结束语

本文将无线传感器网络的 QoS 按照延迟、可靠性和能量开销进行综合分类,根据无线链路的特点提供对不同 QoS 要求的区分服务。分析了延迟、可靠性与传输中的网络能耗之间的博弈关系,基于 ACS 设计了区分服务路由算法 ADSGR,依据不同 QoS 要求选择合适的路由,提高网络的整体性能和资源利用率。与现有算法相比,该算法在数据传输的延迟、可靠性和能量开销上表现较好。下一步工作是将该算法部署到实际的传感器节点,如 MicaZ、Telosb 和 Imote2 等,并对数据融合和拥塞控制进行研究。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y. Wireless sensor networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor networks survey [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(2): 2292-2330.
- [3] 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.
WEN H, LIN C, REN F Y, et al. QoS architecture in wireless sensor network[J]. *Chinese Journal of Computer*, 2009, 32(3):432-440.
- [4] DORIGO M, CARO G D. Ant algorithms for discrete optimization[J]. *Artificial Life*, 1999, 5(3):137-172.
- [5] DORIGO M, GAMBARDILLA L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1):53-66.
- [6] DORIGO M, MANIEZZO V, COLOM I A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Part B*, 1996, 26(1):29-41.
- [7] 孙岩, 马华东, 刘亮. 一种基于蚁群优化的多媒体传感器网络服务感知路由算法[J]. *电子学报*, 2007, 35(4):705-711.
SUN Y, MA HD, LIU L. An ant-colony optimization based service aware routing algorithm for multimedia sensor networks[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2007, 35(4):705-711.
- [8] 崔艳荣, 李克清. 传感器网络中基于蚁群优化的数据查询协议[J]. *软件学报*, 2010, 21(4):793-801.
CUI Y R, LI K Q. Data query protocol based on ant colony optimization for wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Software*, 2010, 21(4):793-801.
- [9] 曹啸, 王汝传, 黄海平等. 无线多媒体传感器网络视频流多路径路由算法[J]. *软件学报*, 2012, 23(1):108-121.
CAO X, WANG R C, HUANG H P, et al. Multi-path routing algorithm for video stream in wireless multimedia sensor networks[J]. *Chinese Journal of Software*, 2012, 23(1):108-121.
- [10] COBO L, QUINTERO A, PIERRE S. Ant-based routing for wireless multimedia sensor networks using multiple QoS metrics[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(17):2991-3010.
- [11] OKDEM S, KARABOGA D. Routing in wireless sensor networks using ant colony optimization[A]. *Proceedings of the First NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems*[C]. IEEE Press, 2006. 401-404.
- [12] FUDENBERG D, TIROLE J. *Game Theory* [M]. MIT Press, 1991.
- [13] MACHADO R, TEKINAY S. A survey of game-theoretic approaches in wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(8): 3047-3061.
- [14] SENGUPTA S, CHATTERJEE M, KWIAT K. A. A game theoretic framework for power control in wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on computers*, 2010, 59(2):231-242.
- [15] KANNAN R, SITHARAMA I S. Game-theoretic models for reliable path-length and energy-constrained routing with data aggregation in wireless sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2004, 22(6):1141-1150.
- [16] KANNAN R, SARANGI S, IYENGAR S S, RAY L. Sensor-centric quality of routing in sensor networks[A]. *Proceedings of IEEE Infocom*[C]. San Francisco, CA, 2003. 692-701.
- [17] 李慧芳, 姜胜明, 韦岗. 无线传感器网络中基于博弈论的路由建模[J]. *传感器技术学报*, 2007, 20(9):2075-2079.
LI H F, JIAN S M. Game-theoretic modeling on routing in wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Sensors and Act* 2007, 20(9):2075-2079.
- [18] 曾加, 慕春棣. 基于不完全信息博弈的传感器网络能量平衡路由[J]. *自动化学报*, 2008, 34(3): 317-322.
ZENG J, MU C D. Game theory-based energy balance routing with incomplete information in wireless sensor networks[J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2008. 34(3): 317-322.
- [19] Koltsidas G, Pavlidou F N. A game theoretical approach to clustering of ad-hoc and sensor networks[J]. *Telecommunication Systems*, 2011, 47: 81-93.
- [20] 孙佩刚, 赵海, 罗玎玎等. 无线传感器网络链路通信质量测量研究[J]. *通信学报*, 2007, 28(10): 14-22.
SUN P G, ZHAO H, LUO D D, et al. Study on measurement of link communication quality in wireless sensor networks[J]. *Journal on Communication*, 2007, 28(10): 14-22.
- [21] SRINIVASAN K, KAZANDJEVA M A, AGARWAL S, et al. The β -factor: measuring wireless link burstiness[A]. *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded network sensor system(SenSys)*[C]. Raleigh, NC, USA, 2008, 29-42.
- [22] ZUNIGA M, KRISHNAMACHARI B. Analyzing the transitional region in low power wireless links[A]. *Proceedings of IEEE SECON*[C]. 2004. 517-526.
- [23] DE COUTO D S J, AGUAYO D, BICKET J C, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[J]. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 419-434.

- [24] OMPRAKASH G, RODRIGO F, KYLE J, *et al.* Collection tree protocol[A]. Proceedings of the 7th ACM conference on Embedded network sensor system(SenSys)[C]. Berkeley, CA, USA, 2009.1-14.
- [25] 王兴伟, 秦佩玉, 郭磊等. 基于混合人工鱼群的 ABC 支持型切换决策机制[J]. 通信学报, 2010, 31(12): 72-81.
WANG X W, QIN P Y, GUO L, *et al.* Hybrid artificial fish swarm based handover decision scheme with ABC supported[J]. Journal on Communication, 2010, 31(12): 72-81.
- [26] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理与应用(第四版)[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006. 41-49.
YANG L B, GAO Y Y. Fuzzy Mathematics and Application (4th edition)[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006, 41-49.
- [27] BUETTNER M, YEE G, ANDERSON E, *et al.* X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 4th ACM conference on Embedded network sensor system(SenSys)[C]. New York, USA, 2006, 307-320.
- [28] LEVIS P, LEE N, WELSH M, *et al.* TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire tinyOS application[A]. Proceedings of the 1st ACM conference on Embedded network sensor system(SenSys)[C]. Los Angeles, CA, USA, 2003, 126-137.
- [29] FELEMBAN E, LEE C G, EKICI E. MMSPEED: multipath multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2006, 5(6):738-754.

作者简介：



赵宏(1954-),男,河北河间人,博士,东北大学教授、博士生导师,主要研究方向为下一代网络、网络管理、网络安全。



胡智(1978-),男,辽宁沈阳人,东北大学博士生,主要研究方向为无线传感器网络、下一代网络、移动终端技术。



闻英友(1974-),男,辽宁沈阳人,博士,东北大学副教授,主要研究方向为下一代网络、移动通信技术和网络安全。