

TinyOS2.x 下基于蚁群算法的 WSNs 路由协议设计*

鲁天龙, 卢俊岭, 王小明, 段卓君
(陕西师范大学 计算机科学学院, 西安 710062)

摘要: 为了增强无线传感器网络的动态适应性和实现数据包的多路径传输,根据蚁群算法的原理,使用 NesC 语言在 TinyOS2.x 下设计了路由协议 Ant-PDRP。该协议采用信息素浓度指引路由包和数据包传输,并在数据包传输过程中引入惩罚机制以实现动态均衡网络能耗。TOSSIM 仿真和 Micaz 节点的真实实验表明,改进后的路由协议能够有效减少传输时延,延长网络寿命,保证数据可靠传输。

关键词: 无线传感器网络; 路由协议; 蚁群算法; 信息素浓度; 惩罚机制

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)02-0541-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.061

Design of routing protocol for WSNs based on ant colony algorithm and TinyOS2.x

LU Tian-long, LU Jun-ling, WANG Xiao-ming, DUAN Zhuo-jun
(School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: In order to increase dynamic adaptability of wireless sensor networks and implement multi-path transmission of data packets, this paper designed an ant colony algorithm based routing protocol by NesC programming language based on TinyOS2.x operating system called Ant-PDRP. It used pheromones for searching path for transmitting routing packets and data packets. During the transmission of data packets, it used a punishment mechanism for balancing the energy consumption of networks. The simulation in TOSSIM and the experiment in actual wireless sensor networks which consist of Micaz node show that the protocol can reduce the transmission delay, prolong the lifetime of networks, and ensure the reliability of data transmission.

Key words: wireless sensor networks; routing protocol; ant colony algorithm; pheromones; punishment mechanism

0 引言

无线传感器网络(WSNs)是由大量具有信息采集、数据处理和无线通信能力的传感器节点组成,节点间通过无线多跳通信方式形成自组织网络,在军事、民用和工业生产等领域有着广泛的应用前景^[1]。路由协议是无线传感器网络的重要研究内容之一,主要负责路由的发现与维护,使得传感器节点可以进行有效的相互通信,路由算法执行效率的高低将直接决定传感器节点收发控制数据和有效采集数据的比率,从而影响整个网络的能耗和寿命。

无线传感器网络发展至今已经提出了很多路由协议,如 AODV 协议、LEACH 协议、Gossiping 协议等,但这些协议建立的路由路径会因为网络中一个或多个传感器节点的失效或移动而经常中断,需要维护端到端的路径信息,缺乏对网络变化的动态适应性^[2]。蚁群算法是一种具有自组织、正反馈、分布式计算等特点的仿生学算法,已经成功解决 TSP、任务调度等众多复杂问题,将蚁群算法应用于路由协议可很好地解决动态适应性的问题。文献[2]提出了一种基于能量和位置信息的蚁群算法路由协议,综合考虑节点的位置信息和剩余能量,增

强了网络的动态适应性,并且引入了新的路由回退机制,有效地提高了路由成功率;文献[3]提出了一种基于多态蚁群算法的能耗均衡路由协议,将节点剩余能量作为下一跳选择的依据,一定程度上减少了时延,延长了网络寿命;文献[4]提出了一种基于蚁群优化的功率自适应路由算法,通过人工蚂蚁携带节点的位置信息,自适应地调节发射功率,避免能量的浪费。上述路由协议都是在 NS2、MATLAB、Visual C++ 等工具下设计和实现的,并未考虑到现实的可行性,要将其应用到真实的节点中,仍需完成大量的修改工作。

本文路由协议是在 TinyOS2.x^[5]下使用 TinyOS 专用的编程语言 NesC 设计的,稍作改动就可以应用到硬件实验中。通过信息素来指引路由包和数据包进行路径搜索,自适应性良好,支持多路径传输;前向蚂蚁在建立路由阶段会找到多条到达目的节点的路径;数据包会选择信息素浓度最大的邻居节点作为自己的下一跳节点;在此过程中加入了惩罚机制,每丢包一次信息素浓度就会减少一定量,所以其他次优的路径也有被选中的可能,在一定程度上减少了丢包率,均衡了网络能耗。在 TinyOS 下分别实现了本文提出的算法 Ant-PDRP (pheromones diffusion routing protocol based ant colony algorithm) 和文献[3]

收稿日期: 2012-06-11; **修回日期:** 2012-07-19 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60970054, 61173094); 国家教育部留学回国人员科研启动基金

作者简介: 鲁天龙(1989-),男,陕西汉中,人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络(lutianlong@stu.snnu.edu.cn); 卢俊岭(1972-),男,河南武陟人,讲师,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络; 王小明(1964-),男,甘肃天水人,教授,博导,主要研究方向为无线传感器网络、访问控制、普适计算等; 段卓君(1988-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。

中算法 Ant-BECP (balanced energy consumption routing protocol for WSN based on ant colony), 进行 TOSSIM 仿真比较了路由协议的性能, 并在真实的节点上实验验证协议的可行性以及仿真结果的正确性。

1 Ant-PDRP 协议模型

在基本蚁群路由算法^[6]中, 人工蚂蚁模拟真实的蚂蚁通过信息素的浓度和期望启发因子共同决定来寻找最优路径。在源节点放出若干只前向蚂蚁, 这些蚂蚁按照式(1)所示的概率^[7,8]选择下一跳节点, 并记录自己所经过的节点。

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

其中: p_{ij}^k 表示蚂蚁 k 在 t 时刻从节点 i 选择到节点 j 的概率; τ_{ij} 表示从节点 i 到节点 j 的路径上的信息素浓度; η_{ij} 表示期望启发因子; α 和 β 分别表示信息素浓度和启发因子的相对重要程度; allowed_k 表示节点 i 下一跳允许选择的节点集合, 也就是节点 i 的邻居节点列表。

文献[2~4]分别将期望启发因子 η_{ij} 选为节点 j 的剩余能量、时延、队列长度或者节点 i 与节点 j 之间的距离。考虑到这些因子虽然在一定程度上均衡了网络的能量, 降低了时延, 但是如果将剩余能量、时延或者队列长度作为期望因子, 那么对网络的实时性要求就很高, 邻居节点必须不断地广播自己的能量、时延、队列长度等信息, 因此能量开销较大, 增加了节点的计算负担; 且权重因子 α 和 β 不好确定, 如果选取不当, 随着网络能量的消耗, 容易造成路由循环, 引起数据包的反向传输。为了解决这一问题, 本文提出新的概率公式, 如式(2)所示, 用信息素的浓度来指引前向蚂蚁和数据包的传输, 在数据包的发送过程中加入惩罚机制, 以达到均衡网络能耗, 实现数据包多路径传输的目的。

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}(t)}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} \tau_{is}(t)} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & j \notin \text{allowed}_k \end{cases} \quad (2)$$

前向蚂蚁到达目的节点后, 会立即变成后向蚂蚁并立即按原路返回。当节点 i 收到从节点 j 发送的后向蚂蚁时就会更新这条边上的信息素浓度:

$$\tau_{ij}^* = \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij} \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{w}{\text{cost}} \quad (4)$$

式(3)中: τ_{ij} 表示节点 i 到节点 j 这条边上的初始信息素浓度。式(4)中: w 是信息素的更新权重, cost 为后向蚂蚁所经过的跳数。

2 Ant-PDRP 协议的实现

Ant-PDRP 协议的实现过程分为两个阶段: a) 路由初始化, 这一阶段主要是为了建立节点的邻居表, 并初始化信息素浓度; b) 路由发现, 这一阶段主要包括路径搜索和数据包发送两部分。

2.1 路由初始化阶段

网络中每个节点保存一张邻居表记录自己所有邻居节点的 ID 号、剩余能量 (energy) 和信息素浓度 (regphero), 本文将记为 $\text{Routingtable}[i]$, 节点开启之后会发送广播包, 广播包的内容是节点的剩余能量。广播的过程如图 1 所示。图中 deadenergy 表示节点的死亡门限值, 当节点的能量小于这一值时, 节点就会死亡, 邻居表中对应邻居的信息素浓度设为 0, 后

续找路过程就不会选择该邻居。为了减少频繁广播造成的能量消耗, 根据数据包的发送速率, 节点会周期性地检测剩余能量, 当能量小于 deadenergy 时就会发送广播包, 而不是持续广播。为了能让路由协议支持节点的动态加入, 每隔一段时间节点还必须广播一次。

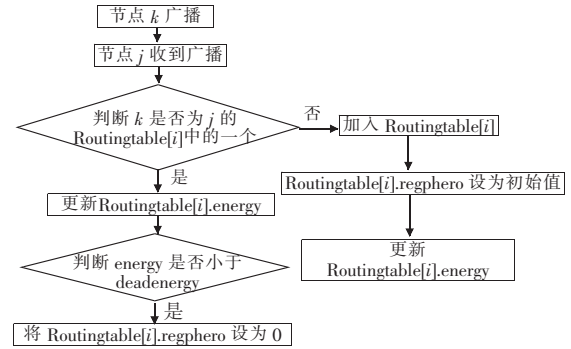


图1 节点的广播过程

2.2 路由发现阶段

当网络中所有节点都建立好邻居表之后, 源节点周期性地创建一定数量的前向蚂蚁。前向蚂蚁携带的信息有目的节点 ID 号 (dest)、存活时间 (ttl)、蚂蚁的序号 (seqno) 和自身所经过的节点 (forwardant.visit[i])。前向蚂蚁的搜索过程如图 2 所示。其中: tableactive 表示节点总的邻居数, N 是节点邻居中信息素为初始值的节点个数。由于初始时刻节点邻居的信息素浓度都为初始值, 因此, 源节点发出的 1 号蚂蚁会广播出去。邻居节点收到 1 号蚂蚁后会先判断自己的邻居中是否有目的节点, 若有则直接发给目的节点, 否则继续广播, 依次循环直到找到目的节点为止。中间节点会根据 ttl 和 seqno 来判断是否为重复蚂蚁, 目的节点只需要根据 seqno 就可以判断。由于初次搜索都是广播, 所以在目的节点会收到多个 seqno 相同的蚂蚁, 但只会保存最先收到的前向蚂蚁的信息, 如 $\text{forwardant.visit}[i]$, 这也就是本次搜索的最优解, 然后变成后向蚂蚁原路返回, 更新路径上的信息素。之后每收到一只蚂蚁就会判断 seqno 是否与最优解的 seqno 相同, 相同则不作处理, 不同则创建后向蚂蚁。为了避免算法过早地收敛, 前向蚂蚁在选择下一跳时会先判断邻居中信息素浓度为初始值的节点个数 N 是否大于邻居总数的一半, 满足条件则继续广播, 否则根据式(2)的概率公式进行选择。多次搜索之后就会找出到达目的节点的最优解。

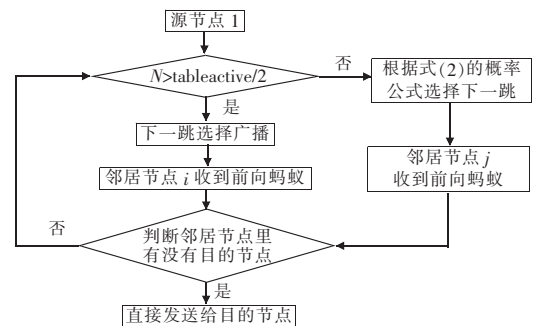


图2 前向蚂蚁的搜索过程

前向蚂蚁的搜索和后向蚂蚁的更新完成之后, 源节点就会根据式(2)的概率选择下一跳进行数据包的发送。由于算法在设计过程中信息素不挥发, 所以之前较差的路径也不会被忘记。但在数据包发送过程中加入了惩罚机制, 每丢一个数据包信息素就会减少 10%, 所以之前较差的路径就有可能被选到, 这样一定程度上均衡了网络的能量, 也支持了数据包的多路径

传输。为了避免丢包严重,造成信息素无限减小,本文设定每发送一定数量的数据包之后,发送一只前向蚂蚁,对路由进行维护。

3 实验评估

仿真实验采用 TinyOS 系统自带的 TOSSIM 仿真器,与传统的仿真系统不同的是,TOSSIM 仿真器通过对实际的 TinyOS 应用程序进行编译并在计算机上模拟出多个传感器网络节点,从而能够建立更加真实的仿真环境。因此,TOSSIM 仿真既能检验本文 Ant-PDRP 协议逻辑的正确性,还能进行性能分析,并且应用程序稍作改动就能应用于真实的节点实验。

3.1 TOSSIM 仿真与结果分析

为了验证路由协议的性能,分别实现了 Ant-PDRP 算法和 Ant-BECP 算法,通过比较其时延、丢包率、发包数量来证明本文所提方法的优越性。为了增加仿真实验的真实性,加载了斯坦福大学 Meyer 图书馆的噪声数据,从而模拟节点之间的相互干扰和射频噪声的影响^[9]。

仿真采用 100 个节点,使其均匀随机地分布在 100×100 的单位区域内,源节点和目的节点分别位于仿真区域的左下方和右上方。假设目的节点 sink 能量充足,源节点和中间转发节点能量有限,均为 60 000 个单位,每发送和接收单位比特的数据消耗 1 个单位的能量。经多次实验,当节点个数为 100 时,初始化蚂蚁的数量取 15 个最合适。初始信息素浓度为 100,信息素的更新权重为 100。当源节点能量耗尽时仿真结束。图 4、5 为不同发包间隔下丢包率、时延和发包数量的变化情况。

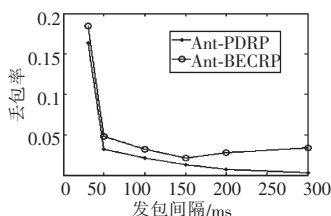


图3 丢包率的变化情况

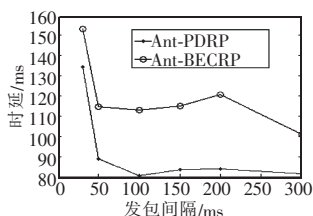


图4 时延的变化情况

通过图3~5可以看出,本文所设计的路由协议 Ant-PDRP 在丢包率、时延和发包数量方面都要优于 Ant-BECP 协议。当数据包的发送间隔很小时,由于存储空间和队列长度有限,产生的数据包来不及发送,所以丢包率和时延就比较大。当发送间隔大于 250 ms 时,时延和丢包率基本上保持不变,此时发送间隔已经不能够对时延和丢包率产生影响。仿真实验中设定源节点能量有限,所以发包数量可以作为衡量网络寿命的一个标准。图 5 表明,Ant-PDRP 算法在一定程度上延长了网络的寿命。

3.2 真实节点实验与结果分析

在真实的节点实验中本文使用 Crossbow 公司的 Micaz 节点,节点数量为 59 个。定义数据包的内容如表 1 所示, S 代表源节点, D 代表目的节点,Send 代表发送数据包的数量,Receive 代表接收数据包的数量,seqno 代表数据包的序号,Trace 代表数据包经过的节点。节点的部署如图 6 所示,源节点是 1 号节点,基站是 59 号节点,即目的节点。源节点的发包间隔为 200 ms。基站每收到一个数据包就将其发送到串口,通过串口调试工具就可以将数据包读出来,在 PC 上显示,读出的数据是十六进制。表 1 是不同时刻从串口读出的有三个数据包,由此可以计算出丢包率、数据包的传输路径。

表中的数据均为十六进制,将其转换成十进制之后, t_1 时刻发包数量为 293,接收包数量为 292,包经过的路径为 1—6—

49—59,由此算出丢包率为 0.38%; t_2 时刻发包数量为 961,接收包数量为 958,包经过的路径为 1—6—2—23—59,丢包率为 0.31%; t_3 时刻发包数量为 1259,接收包数量为 1231,包经过的路径为 1—3—39—22—59,丢包率为 2.22%。在路由建立的初期,由于网络中节点能量充足,所以丢包率比较低,随着网络能量的消耗,丢包率就会增大,惩罚机制开始起作用,从而指引数据包沿着不同的路径传输,达到均衡能耗的效果。

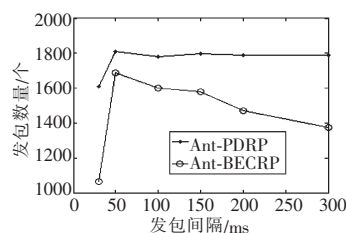


图5 发包数量的变化情况

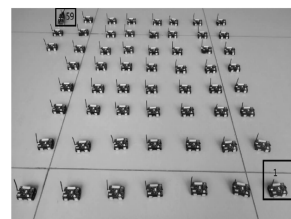


图6 节点实际部署图

表1 不同时刻数据包的内容

	S	D	Send	Receive	Seqno	Trace
t_1	01	3B	01 25	01 24	01 25	01 06 31 3B
t_2	01	3B	03 C1	03 BE	03 C1	01 06 02 17 3B
t_3	01	3B	04 EB	04 CF	04 EB	01 03 27 16 3B

真实实验的结果基本符合仿真实验的结果和设计思路,数据包支持多路径传输,自适应性较好,由于实际实验中信号之间有干扰,而仿真实验中不能够很好地模拟这种干扰,所以在相同发包间隔下,真实实验的丢包率比仿真实验大。

4 结束语

针对无线传感器网络节点能量有限,结合蚁群算法的优点,本文提出了一个基于蚁群算法的路由协议,在数据包的传输过程中加入了惩罚机制,通过仿真实验和真实节点实验,验证了该路由协议的有效性和可行性,并与其他蚁群算法的路由协议相比,在丢包率、时延和能量的利用率方面都有一定的改进。因此,本文工作对以后路由协议的设计和实际应用有一定的参考价值。下一步的工作是利用现有的路由协议设计一个环境监测系统,并将其应用到实际的生活。

参考文献:

- [1] GUNGOR V C, HANCKE G P. Industrial wireless sensor networks: challenges, design principles, and technical approaches [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2009, 56(10): 4258-4265.
- [2] 王小明, 安小明. 具有能量和位置意识基于 ACO 的 WSN 路由算法 [J]. *电子学报*, 2010, 38(8): 1763-1769.
- [3] 常薇, 刘才兴, 林惠强, 等. 基于多态蚁群算法的 WSN 能耗均衡路由协议 [J]. *计算机工程*, 2010, 36(7): 87-90.
- [4] 黄曼, 程良伦. 基于蚁群优化的 WSN 功率自适应路由算法 [J]. *计算机工程*, 2012, 38(1): 102-104.
- [5] DWIVEDI A K, TIWARI M K, VYAS O P. Operating system for Tiny networked sensors: a survey [J]. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2009, 1(2): 152-157.
- [6] SALEEM K, FISAL N, KAFIZAH S, et al. A self-optimized multipath routing protocol for wireless sensor networks [J]. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2009, 2(1): 93-97.
- [7] 张胜, 贺庆全, 尹志军, 等. WSN 中改进蚁群算法求解移动代理问题 [J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(11): 4272-4275.
- [8] 刘瑞杰, 胡小兵. 基于动态调节信息素增量的蚁群算法 [J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(1): 135-137.
- [9] LEVIS P, LEE N, WELSH M, et al. TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications [C]//Proc of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2003: 126-137.