

基于动态规划的无线传感器网络的路由算法

杨文国^{1,2} 郭田德³ 赵彤³

¹(中国科学院研究生院工程教育学院 北京 100049)

²(中国科学院科技政策与管理科学研究所 北京 100085)

³(中国科学院研究生院数学科学学院 北京 100049)

(yangwg@gucas.ac.cn)

Routing Algorithms of the Wireless Sensor Network Based on Dynamic Programming

Yang Wenguo^{1,2}, Guo Tiande³, and Zhao Tong³

¹(College of Engineering , Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049)

²(Institute of Policy and Management , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100085)

³(College of Mathematics Science , Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049)

Abstract Routing problem is one of the most important issues to the wireless sensor network. In sensor network, data is transmitted from source to sink node in a multi-hop mode, so dynamic programming principle lends itself well to design routing algorithms of sensor network. Based on dynamic programming, a hop value of each node that indicates the hop number needed to communicate with the sink is generated by a node hop number generation algorithm. As the topology of the sensor network is concerned, the difference between the hop values of each node and its neighbor is no more than 2. Then three algorithms, that is minimal hop routing, minimal hop with maximal residual energy routing and minimal hop with minimal cost routing algorithms, are presented in this paper, which can pick up the paths that meet different design target between the sink and the source node in wireless sensor network effectively. The relationship between minimal hop with minimal cost routing and minimal cost routing is studied. A necessary and sufficient condition that minimal hop with minimal cost routing is also minimal cost routing are given. Energy consumption analysis shows that the routing algorithms proposed can be energy saving to a great degree.

Key words wireless sensor network ; routing ; dynamic programming ; algorithm ; hop value

摘 要 路由问题是无线传感器网络中的核心问题之一,其数据传送的多跳特点使得非常适合用动态规划的原理来设计传感器网络的路由算法。基于动态规划,通过节点跳数生成算法为传感器网络中的每个节点赋一个表示到 Sink 点跳数的节点跳数值,并分析了传感器网络的拓扑结构特点,然后给出了无线传感器网络中寻找从源到汇满足不同设计目标的最小跳数(MinH)、最小跳数最大剩余能量(MinHMaxRE)和最小跳数最小费用(MinHMinC) 3 种路由算法。探讨了最小跳数最小费用路由与最小费用路由之间的关系,并给出了判断最小跳数最小费用路径就是最小费用路径的一个充要条件。算法的能量消耗分析表明,所给路由算法能实现大幅度的能量节省。

关键词 无线传感器网络 ;路由 ;动态规划 ;算法 ;跳数值

中图法分类号 TP301.6

随着通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术的飞速发展和日益成熟,具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器开始在世界范围内出现。这种传感器网络能够协作地实时监测、感知和采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息,处理加工后能及时地送到需要这些信息的用户。传感器网络可以使人们在任何时间、地点和任何环境条件下获取大量详实可靠的信息。因此,这种网络系统可以被广泛地应用于国防军事、国家安全、环境监测、交通管理、医疗卫生、制造业、反恐抗灾以及家庭等各个领域^[1-2]。传感器网络作为一个全新的研究领域有着广阔的应用前景,同时也在基础理论和工程技术两个层面向科技工作者提出了大量的挑战性研究课题。

处理器技术的发展能够廉价地大量生产具有感知和交流功能的传感器节点,在特定的区域内大量地撒播这些传感器节点就形成了无线传感器网络。随着无线传感器网络的布置和无线传感器网络应用的发展,急需相应的控制和管理算法,这是无线传感器网络的发展所提出的挑战,其核心问题之一就是无线传感器网络中的路由问题。对于传感器网,由于节点没有全球惟一的标识符,网络中的所有节点都可能是源节点,大量的节点采集到的数据是相同或相近的,并且节点具备的电能、处理能力和存储能力都很有限,使得传感器网络的路由协议与传统网络截然不同,因此传感器网络的路由协议设计是很具挑战性的。

1 无线传感器网络路由问题及其研究状况

传感器是无线传感器网络的重要组成部分。它是几何尺寸小、价格低廉、具有简单的计算能力和一定的信息感知、处理与无线交流能力的能量自供应装置^[3]。其构成通常包括感知单元、信息处理单元、信息交换单元(发射器)和能量单元4个部分,此外有的传感器包括位置确定系统、移动器、能量生成器等附加部分。在被监控的区域内大量撒播传感器就形成了传感器网络;每个传感器能够感知和收集数据,并可以通过多跳的方式向 Sink 点(汇点)传送; Sink 点通过 Internet 网或卫星与任务管理中心(用户)进行信息交流;任务管理中心也可以通过这种方式向网络中的每个节点布置任务。

信息的采集、处理与传递是传感器网络的主要功能,这就需要相应的控制和管理算法,路由问题就

是其中的一个核心问题。传感器网络的路由问题就是在满足一定的性能指标条件下,包括能量消耗水平、延迟、数据传输率、容错性、网络的整体寿命等等,如何有效地实现源节点与 Sink 点之间的信息交换,针对不同的应用环境国内外研究人员提出了不同的路由协议。在传感器网络的各种路由协议中,文献[4]按传感器网络中节点是否划分等级,路由协议可分为平面路由协议(flat routing)和层次化路由协议;在平面路由协议里,网络中所有节点是平等的,这类路由协议包括 1)泛洪(flooding);2) forwarding 和 3)以数据为中心的路由(data-centric based routing)等;而在层次化路由协议(hierarchical routing)中,节点分为若干簇,每个簇选一个首领,首领通过数据融合来节约功耗,簇的划分依据是节点现有的能量和它与首领的距离,这类协议包括① LEACH—low-energy adaptive clustering^[5],② TEEN—threshold sensitive energy efficient sensor network protocol^[6]和③ APTEEN—adaptive periodic TEEN^[7]等。在泛洪协议中,传感器网络中的每个节点通过广播重复一次数据,其优点是不用维持网络结构,不需要复杂的路径寻找算法,但该协议具有信息爆聚、信息交迭、资源的盲目性等缺点。forwarding 协议只用局部信息进行路由,不需保留端-端信息,它又包括闲聊(gossiping)—随机选择一个邻居进行信息交换;BEGHR—best effort geographical RP—采用了位置信息传输数据的路由协议^[8]和 Field Based Optimal Forwarding—用一个费用字段向前传输数据^[9]。以数据为中心的路由(data-centric based routing)包括 directed diffusion—sink 点广播数据属性^[10]和 SPIN(sensor protocol for information via negotiation)—传感器节点广播所需的数据信息,然后等待回复^[11]。

按传感器网络中路由协议是否支持多跳路由,可分为单跳路由协议和多跳路由协议^[12];其中 LEACH 是单跳路由协议,而支持多跳的路由协议很多,根据向目的节点传送同一数据包的复本个数,多跳路由协议又可分为单径路由和多径路由。例如:rumor(谈话)是单径路由^[13];energy aware routing 是单径路由^[14],这类路由协议又包括① SWR—带路径修复的单径路由;② SWOR—不带路径修复的单径路由;③最大距离约束的单径路由;④约束最短路径能量有效的路由算法^[15]等等。多径路由包括 MESH(网状)^[16]和 Braided(辨状)^[17]多径路由;在 Braided(辨状)多径路由中,同时建立

数据传输的多条路径,但只有一条用来传输数据,其他路径作备用路径用。此外,directed diffusion 根据加强到 sink 点的路径条数,可以是单径路由也可以是多径路由。LMR(label-based multi-path routing)是一种只利用局部信息,就能找到不交路径或不交路段的径路由。设计传感器网络路由协议时要考虑的首要因素是无线传感器网络中能量的有效性^[18];同时还要重点考虑无线传感器网络信息传递的可靠性。最小能量不交路径路由(minimum energy disjoint path routing, DISjk)^[19]是靠 WMA(wireless multicast advantage)来节省能量,靠多条节点不交或路段不交的路径来提高数据传输的可靠性的路由协议。蚁群优化算法(ACO)是最近提出的求解复杂组合优化问题的启发式算法,文献[20]把 ACO 成功地应用到了无线传感器网络中的路由问题,并且得到了满意的实际结果;文献[21]给出了求解传感器网络路由问题的 ACO 算法框架,并给出了算法的收敛性证明。

2 基于动态规划的路由算法

动态规划是研究决策过程最优化的一种方法。在处理时间离散问题即所谓多阶段决策过程时非常有效。其基本思想是把一个 N 阶段过程问题化为 N 个单阶段问题,用不变嵌入原理求解问题的最优策略^[22],即为了求得多阶段过程的最优解,采用的策略具有这样的性质:不论过去的状态及过去的决策如何,如果把现存的状态看做后续过程的初始状态,则其后诸决策仍必须构成一个最优策略。动态规划的解题顺序是和事物发展的进程相反的,把多阶段决策的过程比做一根链条,一环紧扣一环地进行,而为了求得问题的最优解,须得先解开最后一环,逐步反推回去才行。动态规划的这种处理问题的方法非常适合用来解决无线传感器网络的路由问题。

本节首先利用传感器网络中数据传送的多跳特征,得到了网络中节点跳数的生成算法;然后基于动态规划的思想给出了传感器网络最小跳数(MinH)、最小跳数最大剩余能量(MinHMaxRE)和最小跳数最小费用(MinHMinC)3种路由求解算法。

2.1 传感器网络节点跳数生成算法和网络结构特点

通常用带权重的连通图 $G = G(V, E, w)$ 表示给定的无线传感器网络,其中 V 是节点集, E 是边集, $w: E \mapsto R^+$ 为 E 中的每条边赋一个费用值。无线传感器网络中的路由问题就是寻找无线传感器网

络中从探测或跟踪点 t (也可以是小的探测区域)到检测控制中心(即 Sink 点) s 的最优路径,以便检测控制中心及时获取探测或跟踪区域的信息并进行相应的处理。 V 中的每个节点表示一个传感器,对于 $v_k, v_l \in V, e_{kl} = (v_k, v_l) \in E$ 当且仅当传感器 v_k 和 v_l 能够进行信息交换。由于能量的限制,并非任意的两个传感器之间都可以进行信息交换,通常每个传感器节点只能和它发射半径之内的几个传感器进行信息交换,可见 G 并不是完全图。在传感器网络中,感知数据的传递是以一跳一跳的方式进行的,知道任意节点 v_i 到 Sink 节点 s 的跳数 $h(v_i)$ 对于路由算法的设计至关重要。下面的节点跳数生成算法为传感器网络中的每个节点 v_i 找到到 Sink 节点 s 的最小跳数 $h(v_i)$ 。

算法 1. 节点跳数生成算法。

Step1. 初始化:对于 Sink 点 s ,标记其跳数 $h(s) = 0$,对于 $\forall v_i \in V - \{s\}$,标记其跳数 $h(v_i) = \infty$,并令 $h = 0$ 。

Step2. 循环生产下一跳节点的跳数:第 h 跳节点同时发送跳数传播信息 hop-num;收到跳数传播信息的节点 v_i 更新其跳数,更新规则是 $h(v_i) = \min\{h(v_i), h + 1\}$;停留时间 Δ 后, $h = h + 1$ 。

Step3. 终止条件:直到所有节点不再改变其跳数为止,算法结束。

在 Step2 中,停留时间 Δ 是为了让每个节点尽可能得到较小的节点跳数值。在 Step3 中,终止条件也可以表示为循环变量 h 的值不再增加。执行了节点跳数生成算法之后,传感器网络中的每一个节点都有一个表示到 Sink 点跳数的节点跳数值。

令 H 是节点跳数生成算法执行后,网络中节点跳数的最大值; V_k 表示网络中节点跳数为 k 的节点集合,即 $V_k = \{v_i | v_i \in V, h(v_i) = k\}$; $N(v_i)$ 表示节点 v_i 的邻居节点组成的集合,则有:

命题 1. 传感器网络节点的集合 V 可表示成不交的 k 跳节点集合的并。即

$$V = \bigcup_{k=1}^H V_k, V_k \cap V_l = \emptyset, \\ \forall k \neq l, k, l = 1, 2, \dots, H.$$

证明。由节点跳数生成算法知,命题成立。

命题 2. 设 $h(v_i) = k$, 则有如下性质:

- 1) $N(v_i) \cap V_l = \emptyset$, 对 $\forall |l - k| \geq 2$;
- 2) $N(v_i) \cap V_l \neq \emptyset$ 对 $\forall |l - k| < 2$ 。

证明。反证法。

- 1) 假设存在 $v_j \in N(v_i) \cap V_l$, 且 $|l - k| \geq 2$,

若 $k \geq l+2$, 则 $k = h(v_i) \leq h(v_j) + 1 = l+1$, 矛盾.

若 $k \leq l-2$, 则 $l = h(v_j) \leq h(v_i) + 1 = k+1 \leq l-1$, 矛盾.

2) 因为 $v_i \in N(v_i) \cap V_k$, 所以 $N(v_i) \cap V_k \neq \emptyset$. 若 $N(v_i) \cap V_{k-1} = \emptyset$, 则在节点跳数生成算法中无法得到 $h(v_i) = k$, 矛盾. 同理可证 $N(v_i) \cap V_{k+1} \neq \emptyset$, 命题成立.

根据命题 1 和命题 2, 记 $N_{k-1}(v_i) = N(v_i) \cap V_{k-1}$, $N_k(v_i) = N(v_i) \cap V_k$, $N_{k+1}(v_i) = N(v_i) \cap V_{k+1}$, 则有:

$$N(v_i) = N(v_i) \cap V = N(v_i) \cap \left(\bigcup_{l=1}^K V_l \right) = \bigcup_{l=1}^K (N(v_i) \cap V_l) = N_{k-1}(v_i) \cup N_k(v_i) \cup N_{k+1}(v_i),$$

于是我们得到下述定理.

定理 1. 设节点 v_i 的跳数是 $h(v_i) = k, k = 1, 2, \dots, H-1$, 那么 v_i 的邻居节点集可表示为跳数分别为 $k-1, k, k+1$ 的 3 个子集的并, 即 $N(v_i) = N_{k-1}(v_i) \cup N_k(v_i) \cup N_{k+1}(v_i)$. 特别地, 当 $h(v_i) = H$ 时, $N(v_i) = N_{H-1}(v_i) \cup N_H(v_i)$.

2.2 传感器网络最小跳数和最小跳数最大剩余能量路由

对于传感器网络, 要实现点到点的信息有效传递, 传输延迟也是设计路由算法时必须考虑的重要因素. 通常, 传输延迟与信息传输的跳数成正比, 传感器网络最小跳数路由的设计思想就是通过寻找信息传递的最小跳数来控制传输延迟. 传感器网络的最小跳数路由算法如下:

算法 2. *MinHR*(s, t).

输入: Sink 节点和源节点 s, t , 记录 $h(t) = h$.

Step1. 初始化: 令 $j = 0, v_j = t$.

Step2. 循环: While($j < h$)

{
在 $N_{h-1-j}(v_j)$ 中任选一个节点, 记为 v_{j+1} ;
 $j = j + 1$.
}

Step3. 终止条件: 当 $j = h$ 时算法结束.

输出: 从 $t \sim s$ 的最小跳数路径 $t = v_0 v_1 \dots v_{h-1} v_h = s$.

在每次迭代中, 传送的信息到 Sink 点的跳数减 1, 故最小跳数路由算法经过 h 次迭代一定结束.

能量问题是传感器网络路由设计始终要考虑的重要因素, 并且传感器网络节点的能量消耗具有不均匀性, 当网络不能工作时, 网络中的剩余能量是非

常多的; 为了提高网络的寿命, 减少网络的剩余能量, 在最小跳数路由选择信息传送的下一跳节点时, 人们总是希望先使用剩余能量最大的节点. 令 $\epsilon_r(v_j)$ 表示传感器节点 v_j 的剩余能量, 于是得到下述最小跳数最大剩余能量路由算法.

算法 3. *MinHMaxRER*(s, t).

输入: Sink 节点和源节点 s, t , 记录 $h(t) = h$.

Step1. 初始化: 令 $j = 0, v_j = t$.

Step2. 循环: While($j < h$)

{
在 $N_{h-1-j}(v_j)$ 中选取剩余能量最大的节点作为下一跳节点, 即

$$v_{j+1} = \underset{v_i \in N_{h-1-j}}{\operatorname{argmax}} \{ \epsilon_r(v_i) \};$$

$$j = j + 1$$

}

Step3. 终止条件: 当 $j = h$ 时算法结束.

输出: 从 $t \sim s$ 的最小跳数最大剩余能量路径

$$t = v_0 v_1 \dots v_{h-1} v_h = s.$$

2.3 传感器网络最小跳数最小费用路由

能量消耗是传感器网络路由设计要考虑的关键因素, 通常路由算法设计所追求的目标是数据传送过程中所消耗的总能量即费用最小. 以此为目标, 基于动态规划可得如下传感器网络最小跳数最小费用路由算法.

算法 4. *MinHMinCR*(s, t).

输入: Sink 节点和源节点 s, t , 记录 $h(t) = h$.

Step1. 初始化: 令 $v_0 = v_{0,0} = t, N_h = \{v_{0,0}\}, f^0(v_{0,0}) = 0$.

Step2. 前向循环: For($j = 1, 2, \dots, h$)

{

$$N_{h-j} = \bigcup_{v_{j-1,i} \in N_{h-j+1}} N_{h-j}(v_{j-1,i});$$

对于 $\forall v_{j,i} \in N_{h-j}$, 计算:

$$f^j(v_{j,i}) = \min_{v_{j-1,i} \in N_{h-j}} \{ f^{j-1}(v_{j-1,i}) + \epsilon$$

$$(v_{j-1,i}, v_{j,i}) \};$$

}

Step3. 后向循环: $v_h = s$.

For($j = 1, 2, \dots, h-1$)

{

$$v_{h-j} = \underset{v_{h-j,i} \in N_j}{\operatorname{argmin}} \{ f^{h-j+1}(v_{h-j,i}) \}$$

}

Step4. 终止条件: 当 $v_0 = t$ 时算法结束.

输出: 从 $t \sim s$ 的最小跳数最小费用路径 $t =$

$$v_0 v_1 \dots v_{h-1} v_h = s.$$

3 最小跳数最小费用路由与最小费用路由之间的关系

在传感器网络中,能量的消耗通常不满足所谓的“三角不等式”,即数据从 v_i 经 v_k 传到 v_j 所消耗的总能量大于数据从 v_i 直接传到 v_j 所消耗的能量通常不一定成立. 这样增加跳数有时能够降低数据传送所消耗的总能量,于是,最小跳数最小费用路径不一定是最小费用路径. 图 1 给出了一个最小跳数最小费用路径不是最小费用路径的图例. 其中括号内数字表示该节点到 Sink 点的最小跳数,边上的数字表示两节点间的传送距离,假设传送单位数据所消耗的能量与传送距离的平方成比例,为方便计,不妨假设比例系数是 1. 可以看出,从源节点的最小跳数最小费用路径是 D-B-Sink,传送单位数据所消耗的能量是 85. 但是,当传送路径是 D-C-B-Sink 时,传送单位数据所消耗的能量是 77. 这样,跳数的增加有时会使能量的消耗降低. 从上述分析可以看出,造成最小跳数最小费用路径不一定是最小费用路径的原因是能量消耗不满足“三角不等式”. 为此给出传感器网络的广义能量消耗“三角不等式”. 对于传感器网络 G 中任意的节点 $v_i, v_j \in V$ 和从 $v_i \sim v_j$ 的两条路径 $P1: v_i v_{k1} \dots v_{km} v_j$ 和 $P2: v_i v_{l1} \dots v_{ln} v_j$, $\epsilon(P1), \epsilon(P2)$, 分别表示沿这两条路径发送数据所消耗的能量,若当 $m > n$ 时,总有 $\epsilon(P1) > \epsilon(P2)$,则称传感器网络 G 满足广义的能量消耗“三角不等式”. 此时,也称传感器网络 G 具有广义的能量消耗“三角不等式”. 下述定理给出了最小跳

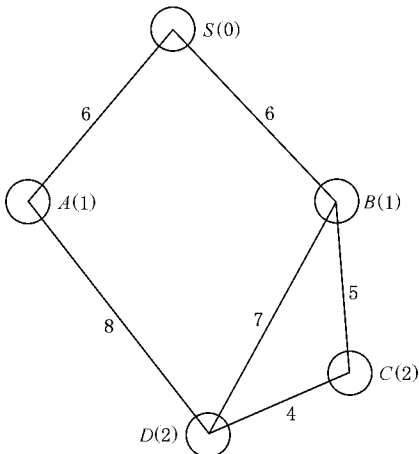


Fig. 1 An example that minimal hop with minimal cost routing is not minimal cost routing.

图 1 最小跳数最小费用路径不是最小费用路径的图例

数最小费用路径是最小费用路径的充要条件.

定理 2. 最小跳数最小费用路径是最小费用路径的充要条件是:传感器网络满足广义的能量消耗“三角不等式”.

证明. 先证充分性. 由广义的能量消耗的“三角不等式”知,跳数的增加不会使数据传送所消耗的总能量降低;另一方面,数据从源到 Sink 节点的跳数又不会减少. 于是最小跳数最小费用路径就是最小费用路径.

再证必要性. 假设传感器网络不具有广义的能量消耗“三角不等式”,那么总可以通过增加跳数的方式来降低路由费用,这与最小跳数最小费用路径就是最小费用路径矛盾.

综上,定理得证.

按照文献 [23-24] 给出的能量消耗模型,把 1 个数据包传送距离 x 所消耗的能量为 $l + \mu x^K$,这里 l 和 μ 为模型参数, K 为传输损失指数,通常取 $2 \sim 4$. 当传感器的传送距离 x 相对较大时,能量消耗模型可进一步简化为 μx^K . 于是由定理可直接得如下推论:

推论 1. 假设传感器网络采用能量消耗模型 μx^K ,最小跳数最小费用路径是最小费用路径的必要条件是:对于任意相邻的 3 点 v_i, v_k 和 v_j ,它们满足 $|e_{ik}|^K + |e_{kj}|^K \geq |e_{ij}|^K$,其中 $|e_{ij}|$ 表示传感器网络中边 $e_{ij} = (v_i, v_j)$ 的长度.

4 能量消耗分析

本节进行算法的能量消耗分析. 假设所有传感器具有相同的感知半径和发射半径,且传感器发射数据包所消耗的能量与数据包的包长成正比. 为方便计,下面我们用相对能量进行分析. 设传感器发送一个跳数信息包所消耗的能量为 ϵ_1 ,发送一个感知到的信息包所消耗的能量为 ϵ_2 ,通常 ϵ_2 要远大于 ϵ_1 . 在下面的分析中,我们假设 $\epsilon_2 = 10\epsilon_1$. 第 2 节所给的 3 种路由算法只存在算法复杂性的差别,它们对能量的消耗却是相同的. 对于一个最大跳数为 H 、每个节点的平均邻居数为 n 的传感器网络,基于动态规划的 3 种路由算法 (DBR) 生成节点跳数阶段所消耗的能量为 $nH\epsilon_1$,而在按 DRB 找到路传送监测数据所消耗的能量为 $H\epsilon_2$,这样,总的能量消耗为 $nH\epsilon_1 + H\epsilon_2$. 对于泛洪路由算法,需要在各跳中向所有的邻居传送监测到的数据包,这样其能量消耗为 $nH\epsilon_2$. 对于方向性扩散 (directed diffusion) 路

由算法 ,在“ 兴趣 ”传播和信息梯度建立阶段泛洪了两次信息包 ,之后进行监测数据包的传送 ,这样其能量消耗为 $2nH\epsilon_1 + H\epsilon_2$. 对于文献 [12] 中的数据前传(data forwarding)路由算法 ,在监测数据包传送之前 ,为了找到最优路径 ,首先进行信息包的泛洪 ,为了保证数据传送的正确性 ,在数据包传送阶段能量消耗的期望值约为 $(2 - p)H\epsilon_2$,其中 p 为传感器节点失效的概率 ,这样该算法总的能量消耗为 $nH\epsilon_1 + (2 - p)H\epsilon_2$.

图 2 给出了 $n = 4$ 和 $H = 10$ 时 ,基于动态规划的 3 种路由算法与泛洪、方向性扩散以及数据前传等路由算法能量消耗的对比情况 ,其中传感器节点失效的概率 p 取 0.2 . 可以看出 ,对于固定的邻居数 n ,虽然这 4 种算法所消耗的能量均随网络最大跳数 H 的增加而增加 ;但和其他 3 种路由算法相比 ,DBR 算法能量消耗最小 ,并且随着最大跳数的增加这种节省越显著 . 而对于固定的最大跳数 H ,虽然这 4 种路由算法消耗的能量均随邻居数 n 的增加而增加 ,但与其他路由算法相比 ,DBR 算法消耗能量最小且增加的幅度最慢 . 这说明 ,基于动态规划的 3 种路由算法能够大幅度改进泛洪路由算法能量消耗过快的不足 ,同时它比方向性扩散以及数据前传等路由算法消耗的能量要小 .

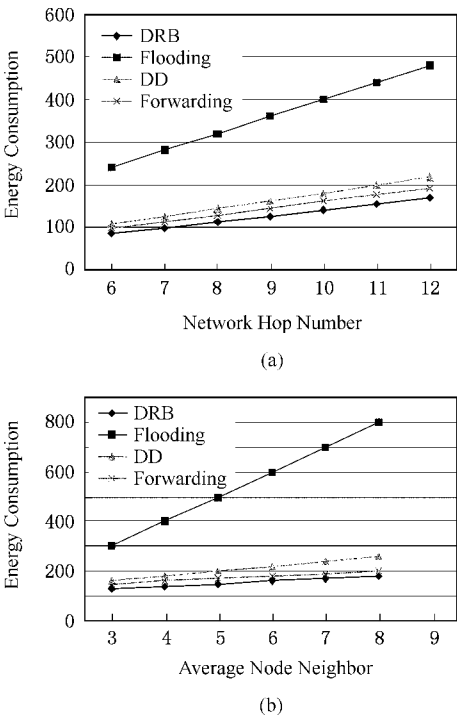


Fig. 2 Comparison results of energy consumption for several routing algorithms. (a) with the network hop number and (b) with the average node neighbor.

图 2 几种路由算法能量消耗的比较结果 . (a) 随网络最大跳数的变化情况 (b) 随平均邻居数的变化情况

5 结 论

无线传感器网络的研究近十几年来刚刚兴起 ,路由问题是其核心问题之一 . 无线传感器网络数据传送的多跳特点使得非常适合用动态规划来设计传感器网络的路由算法 . 基于动态规划 ,本文给出了最小跳数、最小跳数最大剩余能量和最小跳数最小费用 3 种路由算法 . 这些算法设计思想简单 ,在选择下一跳路由节点时仅依赖于局部信息 ,对传感器的硬件配置要求低 ,并能实现大幅度的能量节省 ,因此非常适合大规模的无线传感器网络的路由设计 . 由于传感器网络中能量的消耗通常不满足所谓的“ 三角不等式 ”,最小跳数最小费用路径通常不是最小费用路径 .

应该指出 ,由于传感器网络是应用具体的网络 ,因此设计通用的路由算法难度非常大 . 基于动态规划的传感器网络路由设计紧紧结合传感器网络中数据传送的特点 ,使得设计通用的路由算法成为可能 . 根据不同的具体应用 ,可以设计选择下一跳路由节点的不同准则 . 此外 ,虽然本文给出了判断最小跳数最小费用路径是最小费用路径的一个充要条件 ,但如何设计求解最小费用路径的路由算法仍有待于进一步研究 ,这也是作者今后努力的一个方向 .

致谢 感谢几位匿名审稿专家对本文提出的修改意见 !

参 考 文 献

[1] Ren Fengyuan , Huang Haining , Lin Chuang . Wireless sensor network [J] . Journal of Software , 2003 , 14 (7) : 1282-1291 (in Chinese)
(任丰原 , 黄海宁 , 林闯 . 无线传感器网络 [J] . 软件学报 , 2003 , 14 (7) : 1282-1291)

[2] Cui Li , Ju Hailing , Miao Yong , et al . Overview of wireless sensor networks [J] . Journal of Computer Research and Development , 2005 , 42 (1) : 163-174 (in Chinese)
(崔莉 , 鞠海玲 , 苗勇 , 等 . 无线传感器网络研究进展 [J] . 计算机研究与发展 , 2005 , 42 (1) : 163-174)

[3] I F Akyildiz , W Su , Y Sankarasubramaniam , et al . A survey on sensor networks [J] . IEEE Communications Magazine , 2002 , 40 (8) : 102-114

[4] X B Hou , D Tipper , J Kabara . Label-based multi-path routing (LMR) in wireless sensor networks [C] . The Int ' l Symp on Advanced Radio Technologies (ISART) , Boulder , CO , 2004

- [5] W R Heinzelman, A Chandrakasan, H Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol wireless microsensor networks [C]. IEEE Hawaii Int'l Conf on System Sciences, Maui, Hawaii, 2000
- [6] A Manjeshwar, D P Agrawal. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks [C]. IEEE Int'l Parallel and Distributed Processing Symposium, San Francisco, USA, 2001
- [7] A Manjeshwar, D P Agrawal. APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks [C]. IEEE Int'l Parallel and Distributed Processing Symposium, Fort Lauderdale, Florida, 2002
- [8] C M Okino, M G Corr. Best effort adaptive routing in statistically accurate sensor networks neural networks [C]. IJCNN, Hawaii, USA, 2002
- [9] F Ye, A Chen, S Lu, *et al.* A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks [C]. The Int'l Conf on Computer Communications and Networks, Scottsdale, USA, 2001
- [10] C Intanagonwiwat, R Govindan, D Estrin. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks [C]. International Conf on Mobile Computing and Networking (MobiCOM), Boston, USA, 2000
- [11] W R Heinzelman, J Kulik, H Balakrishnan. Adaptive protocols for information dissemination protocol in wireless sensor networks [C]. ACM MOBICOM, Washington, 1999
- [12] D Tian, N D Georganas. Energy efficient routing with guaranteed delivery in wireless sensor networks [C]. WCNC2003, New Orleans, USA, 2003
- [13] D Braginsky, D Estrin. Rumor routing algorithm for sensor networks [C]. The 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks & Applications, Atlanta, USA, 2002
- [14] R C Shah, J M Rabaey. Energy aware routing for low energy AD Hoc sensor networks [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Orlando, USA, 2002
- [15] M A Youssef, M F Younis, K A Arisha. A constrained shortest-path energy-aware routing algorithm for wireless sensor networks [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Orlando, USA, 2002
- [16] F Ye, S Lu, L Zhang. Gradient broadcast: A robust, longlived sensor network [OL]. [Http://irl.cs.ucla.edu/papers/grab-techreports.ps](http://irl.cs.ucla.edu/papers/grab-techreports.ps), 2001
- [17] D Ganesan, R Govindan, S Shenker, *et al.* Highly-resilient, energy-efficient multi-path routing in wireless sensor networks [J]. ACM Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(4): 11-25
- [18] Shi Gaotao, Liao Minghong. Stochastic sleeping for energy-conserving in large wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2006, 43(4): 579-585 (in Chinese)
(石高涛, 廖明宏. 大规模传感器网络随机睡眠调度节能机制 [J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(4): 579-585)
- [19] A Srinivas, E Modiano. Minimum energy disjoint path routing in wireless ad-hoc networks [C]. In: Proc of the 9th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2003. 122-133
- [20] G Singh, S Das, S V Gosavi, *et al.* Ant colony algorithms for steiner trees: An application to routing in sensor networks [G]. In: L N de Castro, F J von Zuben, eds. Recent Developments in Biologically Inspired Computing. 2003. 183-206
- [21] W G Yang, T D Guo. An ant colony optimization algorithms for the minimum Steiner tree problem and its convergence proof [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2006, 29(2): 352-361 (in Chinese)
(杨文国, 郭田德. 求解最小 Steiner 树的蚁群优化算法及其收敛性 [J]. 应用数学学报, 2006, 29(2): 352-361)
- [22] X Z Jiang. Dynamic Programming Principle and Its Application [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988 (in Chinese)
(姜衍智. 动态规划原理及应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988)
- [23] V Mhatre, C Rosenberg, D Kofman, *et al.* A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2005, 4(1): 4-15
- [24] W B Heinzelman, A P Chandrakasan, H Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670



Yang Wenguo, born in 1974. Lecturer. He received his M. A's. degree and the Ph. D. degree in operation research and control theory from Beijing Jiaotong University in 2003 and from Graduate University of the Chinese Academy of Sciences in 2006 respectively. His main research interests include wireless sensor network, traffic network flow analysis, and optimization methods.

杨文国, 1974 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、交通网络流分析、最优化方法。



Guo Tiande, born in 1964. Ph. D. He is now a professor and also the director of College of Mathematics Science, Graduate University of the Chinese Academy of Sciences. His current research interests include wireless sensor network, computer communications, pattern

recognition, non-linear optimization, etc.

郭田德, 1964 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为无线传感器网络、计算机通信、模式识别、非线性最优化等。



Zhao Tong, born in 1976. Lecturer. He received his Ph. D. degree from Beijing Jiaotong University in 2004. His main research interests include optimization design of wireless sensor network, analysis and design of city traffic network, etc.

赵 彤 ,1976 年生 ,博士 ,讲师 ,主要研究方向为无线传感器 网络最优设计、城市交通网络分析与设计等.

Research Background

Recent advance in wireless communications and microelectronic-mechanical systems have motivated the development of wireless sensor network , which has extensive applications. The feature that distinguishes the sensor networks from the traditional distributed systems is that sensor networks are very sensitive to the energy. Although different routing algorithms and protocols are designed in recent years , routing problem is still one of the most important issues to the wireless sensor network. In sensor network , data is transmitted from source to sink node in a multi-hop mode , so dynamic programming principle lends itself well to design routing algorithms of sensor network. Based on dynamic programming , three algorithms , that is minimal hop routing , minimal hop with maximal residual energy routing and minimal hop with minimal cost routing algorithms , is presented. The relationship between minimal hop with minimal cost routing and minimal cost routing is studied and a necessary and sufficient condition are given. Energy consumption analysis shows that the routing algorithms we proposed can be energy saving to a great degree. This work is supported in part by the National Natural High Technology Development 863 Program (3T Net) of China under grant No.2002AA103061 ; the Presidential Foundation of the Graduate University of Chinese Academy of Sciences under grant No. yzjj200503 and the Scientific Research Startup Foundation of the Graduate University of Chinese Academy of Sciences under grant No. 055101A.

中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会
第 2 届 Agent 理论与应用学术会议(Agent2008)
征文通知

由中国计算机学会模式识别与人工智能专业委员会主办、南京大学承办、苏州大学协办的第 2 届 Agent 理论与应用学术会议定于 2008 年 4 月中旬在江苏南京举行. 本次会议将聚集国内从事 Agent 理论与应用的研究人员和工程技术人员 , 广泛开展学术交流 , 研究发展战略 , 共同促进 Agent 理论与技术的发展和应. 本次会议录用的论文将在《计算机研究与发展》、《模式识别与人工智能》、《南京大学学报》、《计算机科学》和《广西师范大学学报》正刊上发表.

征文范围(包括但不限于)

- Agent 和多 Agent 结构
- Agent 和多 Agent 系统的形式模型
- 基于 Agent 的软件工程与方法学
- Agent 协商与协调
- Agent 拍卖与电子市场
- Agent 组织与联盟
- Agent 通信和语言
- Agent 学习与规划
- Agent 系统的计算复杂性
- 多 Agent 系统环境与性能评价
- Agent 仿真
- 人工社会系统
- 移动 Agent
- Agent 与网格计算
- Agent 与数据挖掘
- Agent 和多 Agent 系统应用
- 其他 Agent 理论与技术方面的内容

论文要求

论文未被其他会议或期刊发表 ; 论文包括题目、中英文摘要、关键字、正文、参考文献等 , 论文参照《计算机研究与发展》的格式 , 发电子邮件至 agent2008@nju.edu.cn , 并注明作者姓名、单位、通信地址、邮政编码、联系电话、电子邮件地址.

重要日期

征文截止日期 2007 年 10 月 31 日 ; 录用通知日期 2007 年 12 月 31 日

联系方式

通信地址 : 江苏省南京市鼓楼区汉口路 22 号 南京大学计算机系

邮政编码 210093 联系人 : 王崇骏 , 商琳

联系电话 (025) 83593163 83686556

会议网址 : http://cs.nju.edu.cn/agent2008 ; 电子邮件 : agent2008@nju.edu.cn