

文章编号:1001-9081(2006)02-0295-04

## 传感器网络中基于角度的数据汇集多径路由算法研究

彭 静,林亚平,余建平,夏 巍,董 婷  
(湖南大学 计算机与通信学院,湖南 长沙 410082)  
(990802130@sohu.com)

**摘 要:**传感器网络具有严格的能量限制,冗余的低速数据流和多对一的通信方式等不同于传统 Ad Hoc 网络的特点,针对这些特点,提出一种新的基于角度的数据汇集多径路由算法。算法结合数据汇集技术和基于角度的多径路由方法进行数据转发。理论分析和模拟实验表明,新算法在很大程度上节省了节点能量,具有良好的路由性能。

**关键词:**传感器网络;路由算法;数据汇集;多径路由

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## Angle-based and data-centred multi-path routing algorithm for wireless sensor networks

PENG Jing, LIN Ya-ping, YU Jian-ping, XIA Wei, DONG Ting  
(College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

**Abstract:** Sensor networks differ from traditional networks in several ways: sensor networks have severe energy constraints, redundant low-rate data, and many-to-one flows. Based on these characteristics, a novel angle-based and data-centred routing algorithm (ADC) was proposed, which take advantage of both data aggregation and routing angle-based multi-path routings. Theoretic analysis and simulation results show that, the new algorithm can achieve load balancing to avoid premature power drains on specific sensors and eliminate data redundancy to reduce the number of data transmissions, So it has good routing performances.

**Key words:** sensor networks; routing algorithm; data aggregation; multi-path routing

## 0 引言

无线传感器网络是由一组传感器节点通过无线介质连接构成的无线网络,它采用 Ad Hoc 方式配置大量微型的智能传感节点,通过节点的协同工作来采集和处理网络覆盖区域中的目标信息<sup>[1]</sup>。无线传感器网络在环境与军事监控,地震与气候预测;地下、深水以及外层空间探索等许多方面都具有广泛的应用前景<sup>[2,3]</sup>。由于无线传感器网络与传统网络相比有许多不同的特性<sup>[4,5]</sup>,因而传统 Ad Hoc 网络中的路由协议不适用于无线传感器网络。

考虑到传感器网络所具有的特点,目前流行的传感器网络路由协议着重于节能以延长网络的生存时间。文献[6]提出了一种多路径路由算法,在算法中,多条路径被预先构建好,算法维护几条不相交的路径以保证在主干路径失效时使用。尽管该方法对洪泛区域进行了限制,但是发现和维持多条路径带来大量负荷。文献[7]提出了一种具有能量感知功能的负载平衡路由算法来预先寻找多条最短路径,中间节点在数据转发时根据每条路径上节点所剩余的能量来选择下一跳节点,但是连续监测和收集邻居节点的即时能量信息将会导致传感器节点能量的额外损耗。文献[8]提出一种基于角度的动态路由构造算法(ADPC),以保证较小的延迟和能耗。文献[9]提出了一种基于位置信息的路由协议 BeamStar,在

无线传感器网络中和基站协同工作来提高可靠性和能量有效性。然而,在上述算法中都未考虑数据冗余,为了解决这个问题,簇<sup>[10,11]</sup>和数据汇集<sup>[12,14]</sup>相继被提出,但是这种以数据为中心的算法中没有考虑负载平衡问题,因此将导致网络中某些传感器节点因能量耗尽而过早失效。考虑到上述两个方面,本文提出一种基于角度的带有数据汇集的多径路由协议(ADC),算法中,多个源节点首先将监测数据发送至某一汇聚源节点,经过数据汇集后,此节点将汇集后的数据包沿多条路径被发送到 sink 节点。

## 1 路由模型

### 1.1 无线传感器网络中的基本路由模型

传感器网络中主要存在两种简单的路由机制,即数据中心路由(DC)和地址中心路由(AC)。其中,AC是每个源节点依据所收到的数据请求,各自将数据信息沿最短路径发送给 sink 节点,这是一种端一端的路由;DC则是源节点发送数据信息给 sink,但是路径中的转发节点会“查看”信息中的内容,依据内容先对相同数据信息进行汇集。一般来说,源节点发送的数据中包含一些中转的、不确定的数据信息,导致 sink 节点不能请求源节点停止发送数据,但是多个源发送的信息中存在一定的相似信息,这种数据信息的冗余会造成节点能量的不必要损耗。因此,采用数据汇集的方法解决此问题是

收稿日期:2005-09-02;修订日期:2005-11-09 基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(03JJY3098)

**作者简介:**彭静(1980-),女,河南许昌人,硕士研究生,主要研究方向:计算机网络; 林亚平(1955-),男,湖南邵阳人,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机通信网络、机器学习; 余建平(1979-),男,湖南怀化人,博士研究生,主要研究方向:计算机通信网络; 夏巍(1963-),男,湖南长沙人,博士研究生,主要研究方向:无线网络、移动通信; 董婷(1979-),女,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向:计算机网络。

一个很好的策略,DC 算法也是利用了这个思想。

## 1.2 传感器网络的网络模型

一般将传感器网络模型分为事件半径模型(ER)和随机源节点模型(RS)两类。在事件半径模型中,以要监测的事件为圆心,则在半径为  $L$  的圆内的所有非 sink 节点的传感节点都被选择作为数据源,由此得到源节点的平均数目近似于  $\pi * L^2 * \alpha$ ,其中  $\alpha$  是网络中节点密度。在随机源节点模型中,随机选取  $k$  个非 sink 节点的传感节点作为数据源。本文主要基于 ER 模型对路由协议性能进行评价和分析。

## 1.3 基于数据汇集的 DC 路由算法

数据汇集是将多个源节点的数据进行信息整合,由于用理想的数据汇集算法实现 DC 路由协议是个 NP 问题<sup>[14]</sup>,文献[14]中提出了一种次理想的数据汇集树生成策略,即最近源节点中心树(CNS):选取距离 sink 节点最近的源节点作为数据汇集点,其他源节点直接将数据信息发送给汇集节点,然后此节点将汇集后的数据包发送给 sink。

在事件半径模型下,DC 协议的路由过程是:一旦事件发生,即确定事件驱动半径  $L$ ,在驱动半径范围内的节点将作为源节点产生此事件的相关数据包;DC 协议根据 CNS 策略,在源节点中选择一个距 sink 最近的节点作为汇集节点,其他源节点将数据信息发送给此节点;汇集节点根据最短路径路由算法,将汇集后的信息发送给 sink 节点。

## 1.4 基于角度的 AC 路由算法(AAC)

本文所描述的无线传感器网络(WSN)<sup>[6]</sup>是一个无向图  $G = (V, E)$ ,  $V$  表示节点集合(包括传感器节点和 sink 节点),  $E$  表示链路的集合,传感器节点  $v_i$  在平面图上可表示为  $(v_i^x, v_i^y)$ 。图中的边可构成一条路径  $P = ((v_1, v_2), \dots, (v_{i-2}, v_{i-1}), (v_i, v^*))$ ,满足  $1 \leq i \leq |V| - 1$ ,其中  $v^*$  是 sink 节点,因此,  $P$  是一条包含多跳的路径。 $V$  中的每个节点  $v_i$  都有确定的通信半径  $R$ ,可与在此范围内的其他节点直接通信。令  $A_{v_i}$  为  $v_i$  的通信区域,  $K(v_i)$  表示  $v_i$  的邻居节点集,直达边  $e^* = (v_i, v^*)$  被认为是  $v_i$  和  $v^*$  之间的一条逻辑路径,  $e^*$  的距离由欧式公式(1)得到,记为  $d(v_i, v^*)$ 。路由角  $\theta_{v_i}$  表示沿  $e^*$  方向对称形成的夹角,且  $\theta_{v_i}$  满足  $0 < \theta_{v_i} < \pi$ 。

$$d(v_i, v^*) = \sqrt{(v_i^x - v^{*x})^2 + (v_i^y - v^{*y})^2} \quad (1)$$

路由角区域被定义为  $A_{v_i}^{v_i} = A_{v_i} * \theta_{v_i} / 2\pi$ ,是由  $\theta_{v_i}$  确定的  $A_{v_i}$  的一个子域,一组路由节点集合定义为  $W_{v_i}$ ,是  $K(v_i)$  的子集,所有在  $W_{v_i}$  中的节点都位于  $A_{v_i}$  范围内,这些节点会动态地加入到从源节点到 sink 的路径中去。若传感器节点  $v_j \in W_{v_i}$ ,则有  $F_{v_i}^{v_j}$  作为  $v_j$  的路由因子来表示转发数据给  $v_i$  的邻居节点个数,此信息由  $v_i$  维护。

### 1.4.1 路由节点集的形成

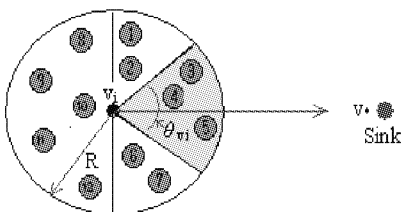


图1 路由角确定的路由节点集  $W_{v_i}$

在 AAC 协议中,节点间通过邻居发现机制建立自己的邻居列表。交换信息如下:  $\{ID, (v_i^x, v_i^y), d(v_i, v^*)\}$ ,基于路由角  $\theta_{v_i}$  和所收到的邻居信息,从本地邻居列表中选择节点构造一个路由节点集  $W_{v_i}$ 。如图1,设  $v_i$  是发送者,它的邻居节点集

$K(v_i) = \{1, 2, \dots, 10, 12\}$ ,根据  $\theta_{v_i}$  可得到  $v_i$  的路由器节点集合  $W_{v_i} = \{3, 4, 5\}$ 。

### 1.4.2 基于角度的路径构建

网络的路由是在数据传输过程中从已确立的路由节点集中选取某些路由节点动态构成的,选取的原则主要依据此节点是否收到了需要继续转发的数据包。在 AAC 协议中,当一个传感器节点  $v_j$  收到某个节点发送的数据包后,便向其邻居发送消息声明自己承担了新的转发任务,如果  $v_j$  的邻居节点不是数据发送方且  $v_j$  在其邻居节点的路由节点集内,那么这些邻居节点一旦收到此声明,便将自己的  $F_{v_i}^{v_j}$  值加1,否则丢弃该声明信息。当数据源节点将数据信息沿多条路径传播时,选择数据发送方的路由节点集中具有最小  $F_{v_i}^{v_j}$  的节点作为下一跳。如果有多个节点具有相同的  $F_{v_i}^{v_j}$  值,则选择到 sink 最近的节点作为下一跳。当某个节点  $v_j$  能量不足时,它便会在全网中广播自己即将失效的消息,原本要将  $v_j$  作为下一跳路由节点的  $v_i$  的邻居节点收到此消息后,将自己的  $F_{v_i}^{v_j}$  改为最大值,并从自己的路由节点集中重新选择最佳的下一跳节点。图2说明了多径路由如何构建和解决节点失效问题。在图2(a)中,源节点在  $A_{v_i}$  区域内有三个路由节点,假设初始化了三条不相交的路径。在图2(b)中,中间节点  $S_2$  发出其失效消息,邻居节点收到此消息后,  $S_2$  的前一跳节点  $S_1$  便开始寻找另一个最佳路由节点。假设在  $S_1$  的邻居节点集中  $x$  具有最小的  $F_{S_1}^{x}$ ,则选其作为节点失效时的下一跳节点。由此可知:高密度和大角度可以在节点失效时提供较高的可靠性。

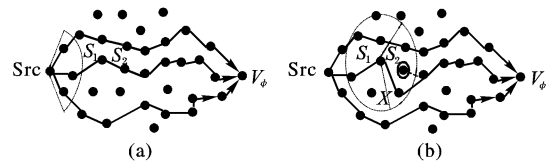


图2 动态路由构建和维护

## 2 ADC 路由算法

以数据为中心的路由算法(DC)和基于角度的以地址为中心的以路由算法(AAC)各有优劣。DC 协议所具有的容错性和低的路由开销的特点只能有利于本地优化<sup>[8]</sup>,而不能达到全局优化;AAC 协议会因数据的冗余性而传输较多的无用信息,其中间节点也会因转发数据而大量耗能。以上两种算法在节省能量方面并不十分显著,因此本文提出一种新的应用于无线传感器网络的带有数据融合的基于角度的路由算法(ADC)。

### 2.1 ADC 协议的数据汇集

为描述方便,首先给出以下定义:

**定义1** 在网络拓扑结构  $G$  中,一组节点集  $S$  的直径  $Z$  定义为  $\max_{v_i, v_j \in S} D(v_i, v_j)$ ,是任意两节点间最短距离(用跳数衡量)中的最大值,其中  $D(v_i, v_j)$  是从  $v_i$  到  $v_j$  的最小跳数。

**定义2** 假设感应区域内有  $k$  个源节点,节点  $v_i$  和  $v_j$  均属于  $S$ ,它们之间的距离为  $d(v_i, v_j)$ ,数据冗余度用  $RD(v_i, v_j)$  表示,且  $RD(v_i, v_j) = [1 - d(v_i, v_j) / 2L] * 100\%$ ,  $L$  是感应半径。

**定义3** 假设网络中每个节点都有相同的能量初值  $E_{ini}$ (节点可支持的数据传输次数),定义能量警告门限  $E_{war} = \eta E_{ini}$  ( $0 < \eta < 1$ ) 为节点执行一定量数据转发后的剩余转发次数。当节点当前能量值  $E_{cur}$  低于这个门限值时,将停止转发数据并提醒邻居节点寻找其他有效节点代替自己进行数据转

发。参数  $\eta$  作为能量因子在数据汇集和路由选择中起一定的作用。

**定义4** 定义  $Q(v_i)$  为  $v_i$  的暂停次数,  $v_i$  可以是网络中的任意节点。一旦  $v_i$  的当前能量值低于能量警告门限,  $Q(v_i)$  的值加1, 此值会影响汇集节点的重选和路由重建等。

本文将采用 CNS 策略解决数据汇集问题。在 ADC 协议中, 所有的源节点都将数据信息直接发送给数据汇集点, 由汇集节点将汇集后的数据包传送到 sink, 根据公式(2)可知, 这个过程可有效减少数据冗余。

$$B(agg) = B(v_k) + B(v_1) * [1 - RD(v_1, v_k)] + B(v_2) * [1 - RD(v_2, v_k)] + \dots + B(v_{k-1}) * [1 - RD(v_{k-1}, v_k)] \quad (2)$$

其中,  $B(v_i)$  是源节点  $v_i$  产生的数据包大小,  $RD(v_i, v_j)$  是节点  $v_i$  和  $v_j$  间的冗余度,  $v_1, \dots, v_i, \dots, v_j, \dots, v_k$  都是  $S$  中的节点,  $v_k$  是数据汇集点,  $B(agg)$  是汇集后的数据包大小。当汇集点的能量低于警告门限时, 即被多个源节点中能量较高的、且离 sink 较近的节点代替。如果有多个数据包需要汇集且所有的源节点都至少暂停传输过一次, 那么在选择新的汇集点时还需考虑节点的  $Q(v_i)$  值, 这种汇集思想可以显著提高网络的生命周期和不匹配性。

## 2.2 ADC 动态路由的形成

当网络中某事件触发后, 所有在感应区域的源节点都会收集相应的环境数据信息并发送给汇集点进行数据汇集。ADC 算法的路由形成过程类似于 AAC 的形成过程, 其中, 当中转节点广播其即将失效的消息时, 在  $W_{vi}$  中原本将此点作为下一跳节点的那些邻居节点听到广播后, 不但将发送此广播消息节点的  $F_{vi}^q$  值更改为最大值, 而且将  $Q(v_j)$  加1, 然后继续从  $W_{vi}$  中选择最佳节点作为下一跳。假设下一跳节点变为  $v_k$ , 那么  $v_k$  必然是  $W_{vi}$  中具有最小  $Q(v_k)$  值和  $F_{vi}^{qk}$  值的节点。值得注意的是能量因子  $\eta$  在路由形成过程中是一个重要因素, 能量因子越小, 更换下一跳节点的频率越低, 反之亦然。如果更换频率增长,  $W_{vi}$  中将有越多的节点被使用以保持整个网络内的节点能量平衡, 所以我们要选择合适的  $\eta$  值。

## 2.3 ADC 算法原理

假设网络中所有节点的通信半径相同且知道自己的能量值以及 sink 节点和邻居节点的位置。基于角度的以数据为中心的路由协议 ADC 可分为以下几个步骤:

- 1) 网络中的事件发生, 在驱动范围内确定源节点;
- 2) 数据汇集采用 CNS 策略进行:

a) 如果事件驱动半径大于等于  $R$ , 那么从源节点到数据汇集点至少需要一跳, 传送数据采用最短路径路由且冗余数据在到达指定的汇集点前可进行聚集; 否则, 带有冗余的数据信息将直接被传送到汇集点;

b) 在数据汇集过程中, 负载过重会导致汇集点的当前能量低于门限能量值, 算法将会从剩下的源节点中选择离 sink 最近且能量值大于门限值的节点作为新的汇集点。

3) 数据汇集完成后, 汇集点根据给定的路由角  $\theta_{vi}$  从  $W_{vi}$  中选择作为下一跳节点, 为了平衡负载, 选择多个下一跳节点形成多径路由;

4) 汇集点沿多条路径发送聚集后的信息, 最终此数据包沿多条路径被传送到 sink;

a) 如果汇集节点当前的能量值低于门限警告值, 将被其他源节点代替, 同时算法会依据路由角重构路由, 另外, 可根据路由表中的历史信息加速路由的形成;

b) 如果中间的转发节点发现其当前能量低于门限警告值, 将选择另一个后继节点, 更换的频率主要依赖于能量因子的大小。

## 2.4 关于 ADC 协议的理论分析

网络的生存时间:

本文定义网络的生存时间为整个网络失效的时间, 即网络中没有路径可供源节点将数据传送给 sink 节点的时间。生存时间越长, 网络的吞吐量越大, 网络性能也越好, 因此算法应尽可能地延长网络生存时间。节点因能量耗尽不能传输数据时认为此节点失效, 有效的路由算法应保证在模拟时间内让足够多的节点存活。

**结论1** ADC 算法中, 网络的生存时间比 AC 或 DC 算法长。

**证明** 计算在某段时间内, 发送一定量冗余数据后存活的节点数目。由于能量因子  $\eta$  通过影响数据汇集和多径路由来达到能耗平衡, 在一定程度上可以延缓节点的死亡。所以, 在网络生存时间方面, ADC 算法优于 DC 和 AC 算法。

能耗:

能耗可用传输数据包需要的跳数衡量, 它是判断算法有效性的一个重要标准, 体现了算法节省能量的能力。

假设感应区域内有  $k$  个源节点, 根据网络拓扑定义  $d_i$  为源节点  $S_i$  到 sink 的最小跳数,  $b_i$  为  $S_i$  产生的带有冗余信息的数据包,  $1 \leq i \leq k$ 。令  $S_k$  为数据汇集点,  $Y_i$  代表数据冗余度, 汇集后的数据包为  $b'$ 。那么利用 AC 协议需要的传输跳数(称为  $N_A$ )为:

$$N_A = b_1 * d_1 + b_2 * d_2 + \dots + b_k * d_k = \text{sum}(b_i * d_i) \quad (3)$$

**定理1** 如果 ADC 协议需要的传输跳数为  $N_D$ , 那么在一定条件下满足  $N_D < N_A$ 。

**证明** 设  $b_1 = b_2 = \dots = b_k = b = 1$ , 则:

$$N_A = d_1 + d_2 + \dots + d_k = \sum_{i=1}^k d_i \quad (4)$$

汇集后的数据包  $b' = b_k + \sum_{i=1}^{k-1} b_i * (1 - Y_i)$ , 当  $b_1 = b_2 = \dots = b_k = b = 1$  时, 令  $m$  为平均冗余度(即  $Y_i$  的平均值), 可得:

$$b' = 1 + (k - 1) * (1 - m) \quad (5)$$

从而  $N_D$  满足不等式:

$$N_D \geq b * (k - 1) + b' * \min(d_i) \quad (6)$$

$$N_D \leq b * (k - 1) * Z + b' * \min(d_i) \quad (7)$$

其中,  $Z$  如定义1中所说的直径, 假设  $Z = q * \min(d_i)$ ,  $q$  为一变量, 且  $0 < q < 1$ , 则由(5), (7)可得:

$$N_D \leq (k - 1) * q * \min(d_i) + [1 + (k - 1) * (1 - m)] * \min(d_i) = (k - 1) * (q - m) * \min(d_i) + k * \min(d_i) \quad (8)$$

显然,  $k > 1$ , 如果  $q < m$ , 有  $(k - 1) * (q - m) * \min(d_i) < 0$  和:

$$N_D < k * \min(d_i) < \sum_{i=1}^k d_i = N_A \quad (9)$$

一般来说, 网络中源节点离 sink 较远、传感半径较小且  $q$  值很小均以满足  $q < m$ , 因此有结论  $N_D < N_A$ 。

**定义5** 定义  $FS$  为节余度表示 ADC 协议优于 AC 协议在跳数方面的比率:

$$FS = (N_A - N_D) / N_A \quad (10)$$

以下是由公式(6), (7)和一些相关定义得到的结论:

推论 1 节余度  $FS$  满足以下不等式:

$$FS \geq [b * (k-1) + b' * \min(d_i)] / \text{sum}(d_i) \quad (11)$$

$$FS \leq [b * (k-1) * Z + b' * \min(d_i)] / \text{sum}(d_i) \quad (12)$$

为验证上述两式,假设所有源节点到 sink 都有相同的最短路径,即  $\min(d_i) = \max(d_i) = d$  和  $Z = q * \min(d_i)$  ( $0 < q < 1$ ),由此可得:

$$\frac{(m-q) * (k-1)}{k} \leq FS \leq m - \frac{m}{k} - \frac{k-1}{k * d} \quad (13)$$

推论 2 设  $k$  为定值,则当  $d$  趋于无穷大(即源节点距离 sink 无穷远)时有:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} FS = \frac{m(k-1)}{k} \quad (14)$$

证明 考虑极限情况: $q$  趋近于 0 和  $k$  远小于  $d$ ,式(13)不等式两边分别变为(15),(16)式:

$$\lim_{q \rightarrow 0} \frac{(m-q) * (k-1)}{k} = \frac{m(k-1)}{k} \quad (15)$$

$$\lim_{d \rightarrow \infty} (m - \frac{m}{k} - \frac{k-1}{k * d}) = \frac{m(k-1)}{k} \quad (16)$$

所以,当 sink 和源节点之间的距离远远大于源节点间的距离时,数据的平均冗余度  $m$  越大,可节省的节点能量越多。

健壮性:

我们从两个方面讨论这项指标:给定能量值内,参与数据转发的节点个数和给定时间内,参与路由的节点的存活率。数据整合可以减少多个源节点带来的冗余开销,在一定程度上提高了无线网络的健壮性;在 ADC 协议中通过调整能量因子  $\eta$  的值可以延长传感器节点的生命周期。

### 3 实验仿真

本文采用 ER 源节点模型来模拟提出的 ADC 算法性能以及和 AAC、DC 算法进行比较:在一个  $500 \times 500$  的区域内随机放置  $N$  个节点,每个节点的初始能量为 200(支持 200 次数据转发),在区域内发生某一事件,sink 节点距离事件位置较远。

首先比较各算法中网络的生存时间。模拟结果如图 3 所示:ADC 算法相对于 AAC 和 DC 来说具有较长的生存时间。这是因为 ADC 算法中引入了能量因子  $\eta$ ,使得能耗相对平衡。在 DC 算法执行过程中,汇集节点最先失效,然后是单路径上的节点;AAC 算法中提出的多径路由思想使节点节省一定的能量,性能略优于 DC 算法。图 4 显示了 ADC 算法中能量因子和路由角对网络寿命的影响,结果表明随着能量因子和路由角的增大,网络寿命延长。

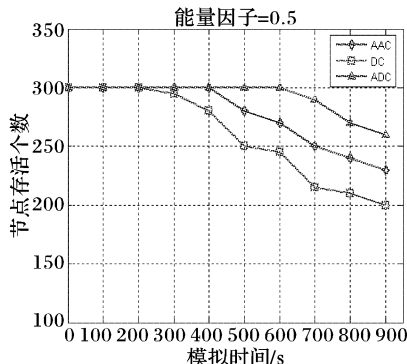


图 3 各算法网络的平均寿命比较

由于能耗是体现算法性能的一个重要指标,对网络的性能影响最大,所以主要关心的指标是各算法中的能耗问题(用传输数据包需要的跳数表示)。实验环境同上,各算法下传输数

据包需要的跳数随节点传输范围的变化如图 5 所示。从图中可以看出,两种算法的变化规律基本相同,在节点传输范围较小时,需要的跳数较多,当节点的传输范围增加时,传输需要的跳数随之减少,ADC(X) 表示 ADC 算法在路由角度  $X$  下的性能。此外,从实验结果中还可明显观察到两种算法性能的差别,AAC 算法需要的能耗明显大于 ADC 算法,因为该算法没有采用数据汇集技术,传输的数据中包含了大量冗余信息,造成许多额外开销。文中没有比较 DC 算法,这是因为它的能耗接近于 ADC 算法,但是其网络寿命小于 ADC 算法。

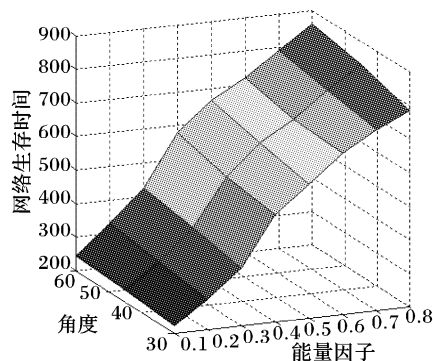


图 4 ADC 协议下的网络寿命

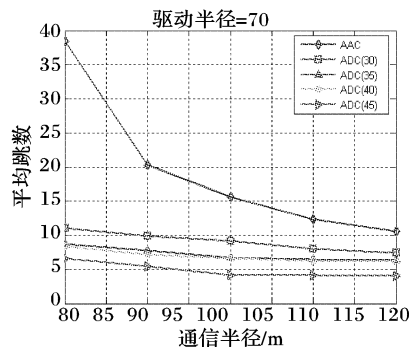


图 5 平均能耗比较

最后研究 ADC 算法在不同路由角度下,能耗随平均冗余度的变化。结果如图 6 所示,传输需要的平均跳数随着平均冗余度的增加而减少。

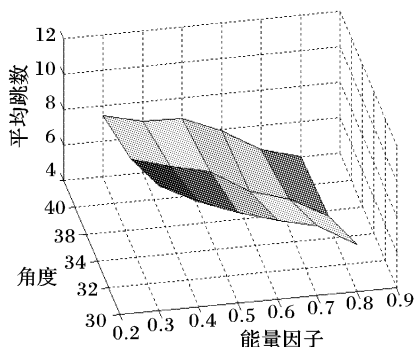


图 6 不同冗余度下 ADC 算法需要的平均跳数

### 4 结语

本文详细分析和比较了几种应用于无线传感器网络的路由算法的优缺点,并提出一种基于角度的带有数据融合的路由算法(ADC)来提高网络性能。由于构造理想的数据汇集树是个 NP 问题,本文采用次理想的数据汇集策略并引入数据冗余度的概念来解决数据汇聚问题,基于角度的多径路由技术和对能量因子的选择在算法中有着重要的影响。实验仿

(下转第 302 页)

RCoA 的 DAD 操作,从而减少了 95% 以上的 IP 层切换延时,不过需要指出的是这种改善是有一定代价的。MN 维护 LCoA 相比 HMIPv6 需要多发送 LCoA-Req 和 LCoA-Ack 消息以及定期发送 LCoA-Ref 消息,但 LCoA-Ref 消息的发送频率不会很高。AR 和 MAP 维护地址池需要消耗处理时间,一定程度上会增加网络的负荷。但是通常的实际情况是,一个 AR 或 MAP 上连接的 MN 数量有限,所维护的地址池也不需要很大,因此地址池维护的代价较小。

## 5 结语

在 HMIPv6 协议中,对 LCoA 和 RCoA 的 DAD 操作所需要的时间占切换延时的绝大部分(95% 以上),CoAP-HMIPv6 协议在 AR 引入 LCoA 地址池,在 MAP 引入 RCoA 地址池,从而不再需要对 LCoA 和 RCoA 进行 DAD 操作,缩短切换延时 96% 以上,显著改善了 IP 层切换性能。CoAP-HMIPv6 协议的域内平均切换延时 12.4ms,域间平均切换延时 119.9ms,加上 IP 层以下的切换延时(40ms ~ 50ms<sup>[10]</sup>),总体切换延时能够控制在 200ms 以内,满足 MN 的实时应用对切换延时的要求。今后我们将改进地址池维护算法,提高地址池维护效率,减少地址池维护所需要的网络信令,支持更大的地址池。

### 参考文献:

- [1] JOHNSON D, PERKINS C, ARKKO J. Mobility Support in IPv6 [EB/OL]. IETF RFC 3775. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3775.txt>, 2004.
  - [2] SOLIMAN H, CATELLUCCIA C, EL MALKI K, *et al.* Hierarchical Mobile IPv6 mobility management (HMIPv6) [EB/OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4140.txt>, 2005.
  - [3] MOORE N. Optimistic Duplicate Address Detection for IPv6 [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ipv6-optimistic-dad-06.txt>, 2005.
  - [4] HAN Y, CHOI J, PARK S. Advance Duplicate Address Detection [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-han-mobility-adad-01.txt>, 2003.
  - [5] YOUNG JUNG H, JOO KOH S, YOUNG KIM D, Address Pool based Stateless NCoA Configuration for FMIPv6 [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-jung-mipshop-stateful-fmipv6-00.txt>, 2003.
  - [6] KOODLI R. Fast Handovers for Mobile IPv6 [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mobileip-fast-mipv6-06.txt>, 2003.
  - [7] THOMSON S. IPv6 Stateless Address Autoconfiguration [EB/OL]. IETF RFC 2462, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2462.txt>, 1998.
  - [8] NELSON R, DALEY G, MOORE N. Implementation of Hierarchical Mobile IPv6 for Linux [A]. Proceedings of The Sixth International Symposium on Communications Interworking (IFIP Interworking 2002) [C]. 2002.
  - [9] BAGNULO M, SOTO I, GARCIA-MARTINEZ A, AZCORRA A. Random generation of interface identifiers [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-soto-mobileip-random-iids-00.txt>, 2002.
  - [10] SCHMIDT T, WAHLISCH M. Roaming Real-Time Applications-Mobility Services in IPv6 Networks [EB/OL]. <http://www.rz.fhtw-berlin.de/projekte/mipv6/terena03.pdf>, 2003.
- 
- (上接第 298 页)
- 真表明新的算法具有较好的性能、较高的灵活性和健壮性,在一定程度上改善了网络的性能。下一步问题是如何更好的达到无线传感器网络路由算法时延和节能的折衷。
- 参考文献:
- [1] TILAKK S, ABU-GHAZALEH NB, HEINZELMAN W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2002, 1(2): 1-8.
  - [2] ESTRIN D, GOVINDAN R, HEIDEMAN J, *et al.* Next century challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks [A]. In: Proc. of the 5th annual ACM/IEEE international Conference on Mobile computing and networking [C]. Seattle, Washington, 1999. 263-270.
  - [3] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络 [J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1290.
  - [4] AKYILDIZ IF, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.* A Survey on Sensor Networks [J]. IEEE Communications Magazine, August 2002, 40(8): 102-114.
  - [5] 林亚平, 王雷. 传感器网络中一种分布式数据汇聚层次路由算法 [J]. 电子学报, 2004, 32(11): 1801-1805.
  - [6] GANESAN D, GOVINDAN R, SHENKER S, *et al.* Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(4): 11-25.
  - [7] HONG X, GERLA M, WANG H. Load Balanced, Energy-Aware Communications for Mars Sensor Networks [A]. In Proceedings of IEEE Aerospace 2002 [C]. Mar. 2002.
  - [8] CHOI W, DAS SK, BASU K. Angle-based Dynamic Path Construction for Route Load Balancing in Wireless Sensor Networks [A]. Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) [C]. May 2004.
  - [9] MAO S, HOU YT. BeamStar: A new low-cost data routing technology for wireless sensor networks [A]. in Proceedings of IEEE GLOBECOM 2004 [C]. Dallas, TX, Nov./Dec. 2004.
  - [10] HEINZELMAN WR, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks [A]. In Proceedings of the 33rd HICSS'00 [C]. Jan. 2000.
  - [11] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems [J]. in IEEE Aerospace Conference, March 2002, 3: 3-1130.
  - [12] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks [A]. In Proceedings of MOBI-COM'00 [C]. 2000. 56-67.
  - [13] KRISHNAMACHARI B, ESTRIN D, WICKER S. The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks [A]. In Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'02) [C]. 2002. 575-578.
  - [14] KRISHNAMACHARI B, ESTRIN D, WICKER S. Modelling Data-Centric Routing in Wireless Sensor Networks [A]. In Proceedings of the 21th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies [C]. New York, NY, USA, June 2002.