

# 一种基于数据驱动链路估计的传感器网络实时路由协议

游绍辉<sup>1,2,3</sup> 刘 强<sup>1</sup> 申雪萍<sup>2</sup>

(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)<sup>1</sup> (北京航空航天大学软件学院 北京 100191)<sup>2</sup>  
(湖南省湘乡市建设局 湘乡 411400)<sup>3</sup>

**摘 要** 提出了一种适用于无线传感器网络的基于数据驱动链路估计的实时路由协议。此协议基于地理位置感知,依据前向路径距离矢量构造路由由下一跳节点的候选集,同时协议引入数据驱动的思想,结合延时、投递率以及单跳距离构造速度矢量,并以速度矢量和剩余能量来选择下一跳节点,提供端到端的软实时数据传输。协议以实时性和能耗作为主要评价指标。利用 ns2 仿真平台实现了此路由协议,当数据速率为 50 数据报文/s 时,此协议比 AODV 和 DSR 的延时减少 50% 以上,能耗降低 30%,可以看出协议可以有效地提高实时性,降低网络能耗。

**关键词** 无线传感器网络,路由协议,实时,能耗,数据驱动

中图分类号 TP393 文献标识码 A

## Real Time Routing Protocol Based on Data Driven Link Estimation in Sensor Networks

YOU Shao-hui<sup>1,2,3</sup> LIU Qiang<sup>1</sup> SHEN Xue-ping<sup>2</sup>

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)<sup>1</sup>

(Software Institute, Beihang University, Beijing 100191, China)<sup>2</sup> (Construction Bureau of Hunan Xiangxiang, Xiangxiang 411400, China)<sup>3</sup>

**Abstract** In this paper, a real-time routing protocol based on data-driven link estimation for wireless sensor networks was presented. This protocol relies on the location information, constructs the next hop nodes set by forwarding path distance vector, combines the data-driven idea to form velocity vector with delay, delivery rate and single hop distance, and provide the soft real time of end to end data. Real time and energy consumption are the primary evaluation target for this protocol. With the ns2 simulation platform, the delay of this protocol reduces above 50% regard as AODV and DSR under the data rate 50 packets per second, energy consumption under 30%. This protocol can effectively improve the real time performance and reduce network energy consumption.

**Keywords** Wireless sensor network, Routing protocol, Real time, Energy consumption, Data driven

## 1 引言

无线传感器网络是一种无线自组织网络,它与传统网络相比,具有以下特点:由大量的传感器节点构成;节点由电池供电,能量、计算能力、存储空间和通信能力有限;网络拓扑变化较快。目前,无线传感器网络领域的研究内容很多,其中路由协议作为无线传感器网络的核心技术,成为国内外研究的热点。无线传感器网络路由协议负责将数据报文从源节点通过网络转发到目的节点,主要包含两个方面的功能:一是选择源节点到目的节点的优化路径,二是沿着选定的路径正确发送(或转发)数据报文<sup>[1]</sup>。

为了减少网络数据流量、节省节点通信能量, Ye Zhen-zhen 等提出了基于数据融合的路由协议,该协议先将各网络节点产生的数据报文就近集中到一些汇聚节点上进行数据融合,然后将融合后的数据通过无线网络送往基站<sup>[2,3]</sup>。为了

减少能量消耗,文献[4,5]通过优化报文传输过程来减少各节点通信能耗,以此来延长网络的整体寿命。Sundar Subramanian 提出了基于地理位置优化的路由调度算法,各网络节点知道自身以及邻居节点的位置信息,各路由由节点在报文转发过程中总是将距离目标节点较近的邻居节点作为路由的下一跳中继节点,从而让数据报文逐步接近目标区域<sup>[6]</sup>。SPEED 协议是一个实时路由协议,通过邻居反馈机制保证网络传输速率在一个全局定义的传输速率阈值之上,实现了软实时路由协议<sup>[7]</sup>。但是在实际的工业应用环境下,利用无线传感器网络系统进行实时控制依然存在着问题,主要是无线传感器网络的实时性很难达到工业控制的要求<sup>[8]</sup>。

本文以提高实时性和降低能量消耗为出发点,通过对传统路由协议的分析,通过提取 MAC 相关信息,设计了一种基于数据驱动链路估计的实时路由协议 DDRT(Data-driven real-time protocol)。通过仿真研究,本协议有效地改善了网络

到稿日期:2009-12-23 返修日期:2010-02-10 本文受国家高技术研究计划(2007AA01Z2A9),中国科学院对外合作重点项目(GJHZ200819)资助。

游绍辉(1978-),男,硕士生,主要研究方向为传感器网络、嵌入式系统、软件工程等, E-mail: liuqiang@ict.ac.cn; 刘 强(1971-),男,副研究员,主要研究方向为传感器网络、嵌入式系统等; 申雪萍(1971-),女,副教授,主要研究方向为软件工程等。

的实时性和能耗。

## 2 协议设计目标

DDRT 协议设计的主要目标如下:

### (1) 软实时

传统的无线传感器网络针对实时性的研究很少,在工业环境下,很多场合对实时性都有一定要求。在多跳情况下,由于多数无线信号收发器只能工作在半双工状态,收发数据只能串行化,对于链状拓扑其吞吐量下降近似服从函数  $O(1/n)^{[9]}$ 。吞吐量的下降严重影响实时性。同时信道干扰引发的重发也是影响实时性的重要因素,所以要保证多跳环境下的实时性,从路由上本文主要考虑降低无线传感器网络数据传输过程中源节点到目的节点的每跳延迟和提高投递率。

### (2) 低能耗

能耗问题是制约无线传感器网络走向实际应用的一个重要约束。无线传感器网络节点通常要求极低的能耗,而其能量消耗主要集中在无线收发器的数据发送当中。据统计,传输 1 比特信息 100m 距离所消耗的能量相当于执行 3000 条计算指令。而能量的路径损耗近似为一个对数-距离模型,在距离  $d$  处接收到的信号强度符合  $P_r(d) \approx P_t \cdot (d_0/d)^\gamma$ , 其中距离  $d$  大于参考距离  $d_0$ ,  $P_t$  为信号发射强度,工业环境下指数  $\gamma$  取值在 2 和 3 之间<sup>[10]</sup>。所以为了降低节点能量消耗,本文从路由上应该考虑如何降低网络节点间的冗余通信量,提高投递率。

### (3) 可靠性高

通常无线传感器网络包含数量众多的传感器节点,它们彼此通过多跳无线信道,把数据传输到目的节点。因此,采用适当的可靠性保证机制显得尤其重要。影响可靠性的主要因素是网络的拓扑结构、通信链路连接性和干扰大小。从路由协议研究端到端的可靠性保证,主要目的就是通过设计高投递率、低跳数的路径来确保传感器节点生成的数据报文能可靠地发送到目的节点。

### (4) 避免网络黑洞

网络黑洞是指当中继节点接收到上一节点发送过来的数据报文无法转发到下一跳节点时,该中继节点形成一个网络黑洞。在一些实际应用的无线传感器网络中,由于网络拓扑分布和各节点能量消耗不平衡,较容易造成网络黑洞现象。要避免网络黑洞,从路由上应该考虑在网络黑洞形成后,避免选择已经形成网络黑洞的节点作为下一跳的节点。

## 3 基于数据驱动链路估计的实时路由协议

根据上述设计目标,本文设计的基于数据驱动链路估计的实时路由协议分为如下部分:协议上层接口、地理位置感知、实时路径处理以及数据驱动链路估计。

协议结构如图 1 所示。上层接口是实现路由协议和上层协议的接口,包括接收上层要传输的数据以及将接收到的数据传送给上一层。地理位置感知部分确定自己的地理位置信息。实时路径处理部分是主路由处理模块,它确定下一跳的选择后,把数据报文提交给媒体介质访问层。数据驱动链路估计部分是为实时路径处理部分服务的,它的作用是根据邻居反馈过来的延迟、能耗、投递率计算邻居集表中的参数,为路由选择的决策提供支持。

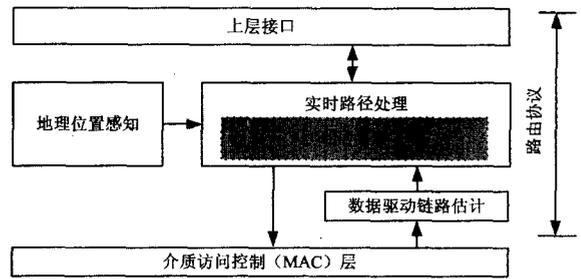


图 1 基于数据驱动链路估计的实时路由协议结构图

### 3.1 上层接口

上层接口实现两部分功能:接收上层发送过来的数据,确定数据发送的目的节点、数据报文序号,提交给实时路径处理部分;接收实时路径处理部分提交的数据,并经过处理,发送上层。

### 3.2 地理位置感知

协议需要节点地理位置信息支持。协议初始化时,节点感知自己的地理位置信息后,通过广播的方式,通知邻居节点其位置信息。关于节点无线定位的方法,可使用 GPS(Global Positioning System),RSSI(Received Signal Strength Indicator),TOA(Time Of Arrival),TDOA(Time Difference of Arrival)等定位方法,此处不详述,假定节点已经获得并存储自己的地理位置坐标。

### 3.3 实时路径处理

这个部分包含如下 3 个相关的定义。

S 节点邻居集(NS):如图 2 所示,S 节点邻居集包含所有的 S 节点无线信号覆盖范围内的节点的集合,即 S 节点发送的无线信号大于或等于邻居节点中接收灵敏度阈值的节点。这个范围类似于一个以 S 节点位置为圆心、S 节点无线电辐射距离为半径  $R$  的圆(球),因为天线方向图以及干扰等因素的问题,不一定是个完整的圆(球)。

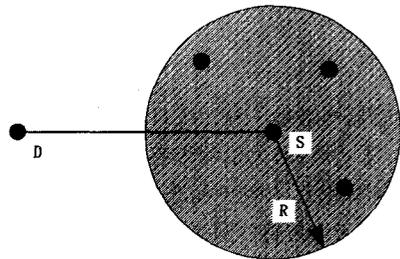


图 2 S 节点邻居集

S 节点下一跳候选集(HS):图 3 所示阴影部分是 S 节点到 D 节点的下一跳候选集。S 节点下一跳候选集是 S 节点邻居集和以目的节点 D 为圆心、S 节点与目的节点 D 距离为半径的圆(球)的交集。集合中所有 S 节点的邻居节点到目的节点 D 的距离均小于 S 节点到目的节点 D 的距离。

速度矢量是路径选择的基本变量,定义为  $Speed^N = distance\_V * DeliveryRate^N / HopDelay^N$ ,如图 3 所示,其中  $distance\_V$  为节点 S 到目的节点 D 的距离,其值为节点 N 的坐标在直线 SD 上的投影点与节点 S 之间的距离; $DeliveryRate^N$  是节点 S 到节点 N 的投递率,该值是后续邻居集表中提到的投递率; $HopDelay^N$  是节点 S 与节点 N 之间的单跳延时值,该值为邻居集表中对应节点的延时。

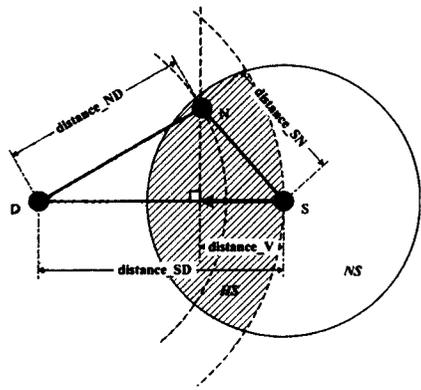


图3 S节点下一跳候选集

该部分中,每个节点包含一个邻居集表(Neighbor Set Table),表中每条记录代表一个邻居,包含如下字段:识别符(NeighborID)、位置(Position)、延时(HopDelay)、能量(Energy)、投递率(DeliveryRate)。其中,识别符为节点的唯一标识符;位置由地理位置感知部分确定,表示为节点的坐标值;延时、能量、投递率由数据驱动链路估计部分计算并反馈。

数据报文发送符合如下规则:

(1)邻居集表分为两部分,一部分单跳路径速度大于或等于预设速度,另一部分单跳路径速度小于预设速度。预设速度是一个系统参数,与该节点的通信带宽和数据要求的实时性要求有关,初始值设定为源节点到目的节点的距离除以实时要求的时间值,数据报文发送时路由只选择前一部分节点作为下一跳候选集。

(2)下一跳节点选择只从节点下一跳候选集中选择,优先选择速度矢量高的节点。若不存在这样的节点,则由该节点反馈信息给上一跳节点,更新上一跳节点邻居集表,避免下一次继续选择该节点作为下一跳节点。

### 3.4 数据驱动链路估计

数据驱动链路估计部分的设计主要依托于网络中MAC层协议和路由协议中的邻居集表,通过对网络中MAC层协议各种帧和函数的修改,实现延时估计、投递率估计、能耗反馈等协议需求数据,并记录在邻居集表中,如图4所示。

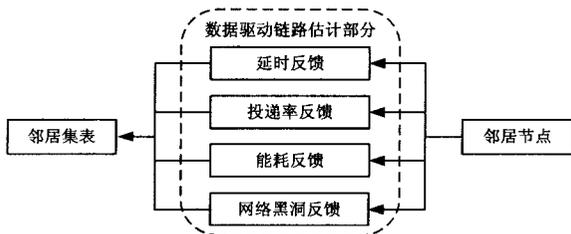


图4 数据驱动链路估计在本节点与邻居节点间关系图

#### 3.4.1 延时估计

延时估计是一种通过延时反馈的估计策略,用以判断网络局部的通信负载状况,解决实时性问题和网络拥塞问题。协议实现延时反馈是通过报文捎带的方法进行测量的:发送节点把数据报文提交给MAC层后,经过RTS>CTS>DATA>ACK完成帧发送,协议在DATA帧中加上路由协议提交数据报文给MAC层时的时间戳后发送;邻居节点接收到DATA帧后,获取DATA帧中的时间戳,并写入ACK帧回传给发送节点;发送节点收到邻居节点发送的ACK帧后,用当前时间减去数据帧中的时间戳,就可以获得这一跳的延时。

当节点更新邻居集表中的延时值时,采用这一跳计算的延时值和原来的延时值的指数加权移动平均EWMA(Exponential Weighted Moving Average)值来生成估计值<sup>[11]</sup>。

#### 3.4.2 网络黑洞反馈

如图5所示,节点2在接收到节点1发送过来的数据报文后,发现自己到目的节点4没有下一跳节点集,此时节点2需要向节点1反馈一个0延时值(见3.4.1节延时估计,修改ACK帧中时间戳为0),以表明自己是网络黑洞。当节点1生成到节点2的延时估计值时,将产生一个比较大的延时估计值。所以,节点1在选择下一跳节点传送数据报文到节点4时,选择节点2的概率大大降低。

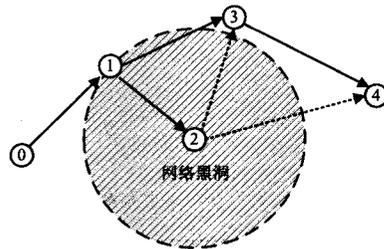


图5 网络黑洞节点示意图

#### 3.4.3 能耗反馈

能耗反馈是一种维护传感器网络节点能量平衡的策略。节点在接收到上一跳节点传来的数据报文后,在回复的ACK报文中捎带该节点的当前能量值。上一跳节点在收到ACK后,更新邻居集表中对应节点的能量值。上一跳节点在保证实时性符合要求的情况下优先选择下一跳候选集中能量值高的那部分节点作为数据报文发送的策略。

#### 3.4.4 投递率估计

投递率是实时路由选择的一个重要参数,它可以直接反映节点间通信链路的质量。节点在发送数据报文给MAC层后,等待MAC层反馈回来的ACK或者NACK来计算投递率。返回ACK,表示数据帧投递成功;返回NACK或者无返回,表示数据帧投递失败,需要重新选择下一跳路径。投递率定义为投递成功的次数和除以总投递次数。当节点更新邻居集表中投递率时,采用这一跳本次计算的投递率和原来投递率的指数加权移动平均值来表示。

### 3.5 协议总体流程

DDRT实时路由协议的总体流程如下:

- (1)节点感知自己地理位置,并通过广播告知邻居节点其位置信息;
- (2)数据发送时,上层接口部分生成数据报文和目的地址;数据报文转发时,实时路径处理部分从MAC层获取数据报文和目的地址;
- (3)计算从本节点到目的节点的距离;
- (4)计算邻居集中节点到目的节点的距离,生成下一跳候选集;
- (5)计算根据实时性要求确定的预设速度;
- (6)计算本节点到下一跳候选集中节点的路径速度,剔除不满足速度要求的下一跳节点;
- (7)从符合速度矢量条件的下一跳候选集中,选择速度矢量前5%中剩余能量高的节点作为下一跳节点;
- (8)将节点时钟值等数据写入MAC层数据帧头;
- (9)发送数据报文给MAC层;

(10)获取 MAC 层反馈的 ACK 或者 NACK,根据 ACK 或者 NACK 计算并选择更新邻居集表中对应节点的延时、投递率、能耗等相关数据。

#### 4 仿真分析

我们通过 Network Simulator2(ns2)仿真平台对 DDRT 进行仿真分析。ns2 提供了高效、可扩展的无线传感网络仿真环境。表 1 描述了仿真中的各项参数设置。

表 1 仿真参数设置

名称	参数
路由协议	DDRT, AODV, DSR
MAC 层协议	CSMA/CA
天线模型	全向天线
无线信号传输模型	TwoRayGround
带宽	11Mb/s
报文数据	32 字节
节点数量	100
节点布置	格网
节点距离	格网点间距 100 米
无线传输半径	250 米

我们通过仿真比较了 DDRT, AODV, DSR 3 种不同路由协议的性能。其中, AODV 和 DSR 协议是两种典型的按需路由协议, AODV 协议是工业界 Zigbee 联盟采用的路由协议之一, 两者都包括路由发现和路由维护两个过程。两者路由的发现过程相似, 当源节点向目的节点发送数据时, 如果不存在未过期的路由, 则启动路由发现过程, 源节点广播路由请求报文。邻居节点依次向周围节点广播此报文, 直到该组被送到一个知道目的节点路由信息的中间节点或者目的节点为止。二者不同的是, AODV 中目的节点只回应最先到达的路由请求报文, 而 DSR 中目的节点回复所有路由请求报文, 源节点有可能存在多条到达目的节点的路径。相比之下, DSR 的开销更大一些。

在仿真性能的比较中, 我们主要比较以下几项参数: 延时-报文/s、丢包率-报文/s、抖动-报文、能耗-报文/s, 其中前 3 项是实时性反映的重要参数。同时, 由于在无线传感网络中, 数据流量不同于其他网络, 它产生的流量比较低, 但同时又必须考虑网络局部拥塞问题, 因此我们仿真产生的数据流量限定在 0~50 报文/s, 时长 50s。测试数据流从左上角节点产生, 目的为右下角节点。

##### 4.1 延时-报文/s

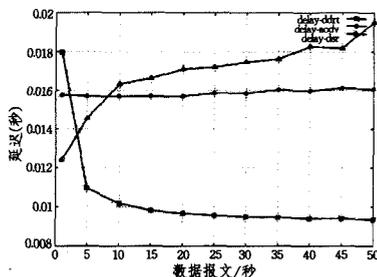


图 6 数据报文延时

图 6 反映的是单位时间内不同数量的数据报文从源节点到目的节点的传输延时平均值。图中, DSR 协议随着单位时间报文数量的增加而增加, AODV 协议一直稳定在 0.016s 左右, 而 DDRT 协议随着单位时间内数据报文数量的增加由比较高的值开始逐步稳定在 0.007~0.009s 之间。显然数据

速率比较高时 DDRT 的延时时间最小, 当数据速率为 50 数据报文/s 时, DDRT 延时比 AODV 和 DSR 的减少 50% 以上。

##### 4.2 丢包率-报文/s

图 7 表示的是假设实时性限制参数为 0.016s, 3 种协议单位时间内不同数量的数据报文的丢包率图。图中, AODV 协议和 DSR 协议的丢包率稳定在 20%~30% 之间。而 DDRT 协议传输开始阶段很高, 然后逐步稳定在 5% 以内。

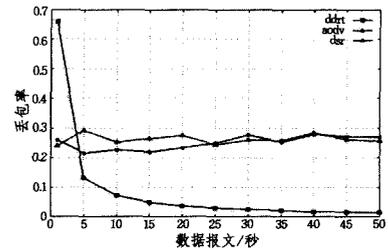


图 7 丢包率

##### 4.3 抖动-报文

图 8 为 DDRT 协议 50s 时间内发送 2500 个数据报文的抖动时间图。显然, 传输开始时, 数据报文的抖动比较大, 然后慢慢稳定。这是因为 DDRT 协议不存储路径, 所以在传输开始时, 协议根据实际环境, 通过数据驱动反馈回来的链路来估计、调整单跳延时, 计算速度矢量, 寻找最优的路径, 因此协议运行的开始延迟抖动比较大一些。

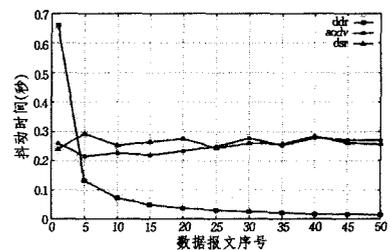


图 8 数据报文抖动

##### 4.4 能耗-报文/秒

图 9 为单位时间发送不同数量数据报文的能量消耗图。显然, 能量消耗 DDRT 协议最小, 当每秒发送 50 个数据报文时, DDRT 协议比 AODV 和 DSR 的能耗减少大约 30% 左右。导致 DDRT 能耗小的原因主要有两个: 一是跳数少, 节省了节点接收和发送数据的耗能; 二是采用了数据驱动, 减少了通信的冗余量。

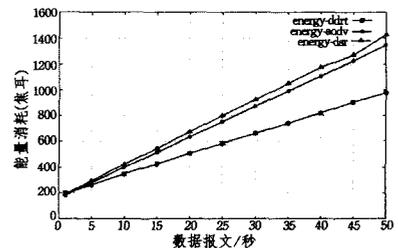


图 9 能耗比较图

结束语 优化传输路径、降低网络能耗是无线传感器网络路由协议设计的主要目标之一。本文通过分析研究分层模型中的路由层和数据链路层, 结合跨层设计的思想, 提出一种以数据驱动为基础的软实时路由协议 DDRT, 并通过 DDRT, AODV 和 DSR 协议的仿真分析, 可以看出 DDRT 路由协议有效地提高了数据传输的实时性, 降低了网络能耗。

## 参考文献

- [1] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174
- [2] Ye Z, Abouzeid A, Ai J. Optimal Policies for Distributed Data Aggregation in Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), May 2007
- [3] Gao J, Guibas L, Hershberger J, et al. Sparse Data Aggregation in Sensor Networks[C]// Information Processing in Sensor Networks(IPSAN), April 2007
- [4] Subramanian S, Shakkottai S, Gupta P. On Optimal Geographic Routing in Networks with Holes and Non-Uniform Traffic[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications(INFOCOM), May 2007
- [5] Shah R C, Rabaey J M. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks[C]// Proceeding of IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC2002), March 2002
- [6] Subramanian S, Shakkottai S, Gupta P. On Optimal Geographic

- Routing in Networks with Holes and Non-Uniform Traffic[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications(INFOCOM), May 2007
- [7] Tian He J. A Stankovica Chenyang Lub Tarek Abdelzaher. SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks[C]// IEEE 23rd International Conference on Distributed Computing Systems(ICDCS'03), May 2003
- [8] Willig A. Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: A Selection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2008, 4(2): 102-124
- [9] Zhang Yan, Luo Jujun, Hu Honglin. Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards[M]. Boca Ration: Auerbach publications Taylor & Francis Group LLC, 2007: 8-13
- [10] Rappaport T S. Indoor radio communications for factories of the future[J]. IEEE Communications Magazine, 1989, 27(5): 15-24
- [11] Kumar R, Wolenz M, Agarwalla B, et al. DFuse: A Framework for Distributed Data Fusion[C]// Proc. 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SenSys'03). Los Angeles, CA, November 2003: 114-125

(上接第 41 页)

累加起来, 将累加的结果按一定的比例参与历史记录的平均值计算中, 这样可以提高证据的合理性和有效率, 且不影响算法的可扩展性。

初始累加证据可以取最低信任临界值  $D$ , 每一个证据的累加都是在原累加证据的基础上进行的, 根据当前要删除的证据  $et_{new}$  来累加原有的累加证据  $et_{old}$ , 如果被删除的证据大于原有的累加证据, 则证据增加, 否则减少。浮动值的大小是以被删除获得的证据值与原有累加证据的差为基数来计算的, 证据累加的计算方法见式(9):

$$\begin{cases} et_{old} + et_{old} * (et_{new} - et_{old}) * \beta^{\alpha_{new} - D + 1/n} & et_{new} \geq D \\ et_{old} + et_{old} * (et_{new} - et_{old}) * \beta^{\alpha_{new} - D} & et_{new} < D \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $0 < \beta < 1$  是主观的信任调节因子,  $\beta^{\alpha_{new} - D + 1/n}$ ,  $\beta^{\alpha_{new} - D}$  分别称为证据信任累加控制部分和证据非信任累加控制部分,  $n$  是节点过期被删除的证据总个数。

此证据累加公式具有如下性质, 我们用一个定理来描述。

**定理 2** 在被删除证据增长幅度相同的情况下, 被删除证据在陌生者证据之上的证据累加幅度一定小于被删除证据在陌生者证据值之下的证据累加幅度。

证明: 设在信任临界值之上的被删除证据为  $et_{new}^a$ , 在信任临界值之下的被删除证据为  $et_{new}^b$ , 由已知得  $|et_{new}^a - et_{old}| = |et_{new}^b - et_{old}|$ , 并且有  $et_{new}^a > D > et_{new}^b$ , 则  $et_{new}^a$  和  $et_{new}^b$  证据累加增长幅度之比为  $et_{old} * (et_{new}^a - et_{old}) * \beta^{\alpha_{new} - D + 1/n}$  和  $et_{old} * (et_{new}^b - et_{old}) * \beta^{\alpha_{new} - D}$  之比, 由于  $|et_{new}^a - et_{old}| = |et_{new}^b - et_{old}|$ , 因此  $|\beta^{\alpha_{new} - D + 1/n}| / |\beta^{\alpha_{new} - D}|$  这是两个指数函数之比, 由于  $0 < \beta < 1$ ,  $et_{new}^a > D > et_{new}^b$ , 因此  $|\beta^{\alpha_{new} - D + 1/n}| < 1$  而  $|\beta^{\alpha_{new} - D}| > 1$ , 故:  $|\beta^{\alpha_{new} - D + 1/n}| / |\beta^{\alpha_{new} - D}| < 1$ 。

本定理说明, 在被删除证据幅度增长相同的情况下, 如果新证据在信任范围内, 则累加速度慢, 体现“日久见人心”的信任积累原则, 如果在不信任范围内, 则信任下降速度加快, 体现对不信任行为的惩罚力度。

**结束语** 本文针对目前在无线传感器网络的节点行为信任评估中很少考虑节点行为价值的现象, 从节点行为证据这个根本依据出发, 论述了证据不全、行为价值不相等的问题, 提出了针对不同价值交往的节点信任评估方法, 重点论述了

不足填充法和权重扩展法。最后通过两个定理和两个性质证明了方法对节点行为信任评估的有效性。

## 参考文献

- [1] Zhan Guoxing, Shi Weisong, Deng Julia. a resilient trust model for WSNs[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Berkeley, California, USA, November, 2009: 411-412
- [2] Zhang Mingwu, Yang Bo, Qi Yu. Using Trust Metric to Detect Malicious Behaviors in WSNs[C]// Proceedings of the 8th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing. Qingdao, China, 2007: 104-108
- [3] Lin Chuang, Wang Yuanzhuo, Tian Liqin. Development of Trusted Network and Challenges It Faces[J]. ZTE Communications, 2008, 6(1): 13-17
- [4] Tian Liqin, Lin Chuang, Ji Tieguo. Kind of quantitative evaluation of user behaviour trust using AHP[J]. Journal of Computational Information Systems, 2007, 3(4): 1329-1334
- [5] Lin Chuang, Pen Xuehai. Research on Trustworthy Networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(5): 751-758
- [6] He Xin, Gui Xisolin. A Heider-Theory Based Reputation Framework for WSN[C]// 2008 10th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications. 2008: 635-640
- [7] Tian Liqin, Lin Chuang, Sun Jinxia. A kind of prediction method of user behaviour for future trustworthy network[C]// 2006 International Conference on Communication Technology. 2006: 199-202
- [8] Tian Liqin, Lin Chuang, Ji Tieguo. Quantitative Analysis of Trust Evidence in Internet[C]// 2006 10th International Conference on Communication Technology Proceedings. 2006: 194-198
- [9] Lin Chuang, Tian Li-qin, Wang Yuan-zhuo. Research on User Behavior Trust in Trustworthy Network[J]. Journal of Computer Research and Development. 2008, 45(12): 2033-2043
- [10] Zhu, Cheng. A secure data fusion algorithm based on behavior trust in wireless sensor networks[C]// International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2008: 191-194