

无线传感器网络多时间尺度链路估计算法研究

彭喜元, 潘大为, 彭 宇

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘 要: 针对无线传感器网络链路存在的不稳定性和不对称性问题, 提出多时间尺度链路估计算法, 通过长期和短期两种时间尺度估计节点间的链路质量, 构建稳定链路和突发链路共存的拓扑结构, 并采用突发链路发现策略实现机会路由; 同时又针对由突发链路的不对称性引起的复制数据包问题, 提出了多路径 ACK 策略, 通过稳定链路和突发链路共同形成的多条路径传递 ACK, 提高 ACK 的到达率, 减少复制数据包的数量. 实验结果证明, 多时间尺度链路估计算法使无线网络的平均路径长度减少且在一定程度上能节省能量并提高包接收率, 同时多路径 ACK 策略也很好的解决了包复制问题.

关键词: 链路估计; 多时间尺度; 多路径 ACK; 无线传感器网络

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 3A-080-06

On Multiple Time Scales Link Estimation in Wireless Sensor Network

PENG Xi-yuan, PAN Da-wei, PENG Yu

(Automatic Test and Control Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: According to the link instability and asymmetry of wireless sensor network, the multiple time scales link estimation (MTSLE) algorithm which takes into account long and short time scales link estimation is proposed. In MTSLE, building the topology structure by both stable link and bursty link, a bursty links discovery strategy is designed to achieve opportunistic routing. Meanwhile, the algorithm also considers a multi-path ACK policy for packet duplication cause by the asymmetry bursty links, reduces the number of duplicate packets. Experimental results show that MTSLE algorithm not only reduces the average path length but also saves energy and improve the packet reception rate to some extent, while multi-path strategy also solves the problem of packet duplication.

Key words: link estimation; multiple time scale; multi-path ACK; wireless sensor networks

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)已经在工业、农业、环境监测等领域具有一定程度的应用^[1,2]. 在实际部署和应用中, 研究人员发现无线链路具有不稳定和不对称的特性, 特别是中等质量链路^[3,4]. 路由算法的目标是在复杂链路环境下维持网络拓扑的连通, 并寻找相对稳定可靠的通讯链路, 而链路估计是完成此目标的重要环节. 为了减少链路不稳定和不对称特性引起的相关问题, 国内外的学者对链路估计器做了许多研究工作, 并提出了一些基于 TinyOS 平台可以实际应用的具体方法, 如 Couto 等人提出的 ETX^[5] (Expected Transmission Count), 通过双向信标帧估计的包接收率以及数据帧发送的成功率来进行双向链路估计. LIFENG SANG 等人提出的 ETf^[6] (Expected Number of

Transmissions Over Forward Link), 对前向链路进行估计, 并提出了单向链路发现方法和动态重发阈值. Baccour 等人提出的 F-LQE^[7] (Fuzzy Link Quality Estimator), 应用模糊的方法构建链路估计器, 文章中采用包接收率、双向包接收率的差值、链路稳定性和信号信噪比四个参数经过模糊推理得出链路估计值, 但这些协议大都仅通过单一长期的链路代价来选择下一跳父节点, 没有充分考虑无线链路的不稳定性, 不能发现更有效率的短期可靠链路. 鉴于此, 本文提出了基于多时间尺度的链路估计器, 通过对短期链路质量的准确估计在由长期链路估计参数构建的稳定拓扑结构上进行机会路由发现, 并针对突发链路上存在的不对称链路导致的复制数据包问题提出了多路径 ACK 策略. 全部算法在 TinyOS 系统上完成了代码实现, 并部署到哈佛大学的 Motelab^[8] 开放测试床进行实验.

2 多时间尺度链路估计器

2.1 多时间尺度链路估计器设计思想

无线传感器网络的应用中多数采用同一类型节点,节点间通信性能差别不大,在仅基于长期链路代价的路由协议中,父节点选择的倾向行明显,只关注累计链路质量最好的前向连接,意图建立稳定的拓扑结构,但其忽视了中等链路质量的连接,如图 1 所示,节点 5→节点 4→节点 3→节点 2→节点 1→基站构成了稳定的链路,但由于无线链路的不稳定性和不对称性在链路中可能存在节点 5→节点 2 或节点 5→节点 3 的短时稳定链路,如果能准确发现并利用这样的突发链路,就可以更有效率地进行数据转发。

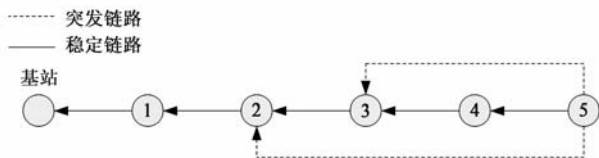


图1 突发链路示意图

由上述可以考虑提出一种新型的链路估计器向路由引擎提供两种时间尺度的链路参数:长期相对稳定的链路参数用于建立稳定可靠的拓扑结构;短期相对突变的链路参数用于发现突发链路。在长期参数建立的相对稳定的拓扑结构的基础上,通过短期链路参数使用突发路径发现策略进行机会路由选择,这样就可以进一步利用中等质量链路,达到均衡节点能量和减少数据发送量的目的。在进行机会路由的同时,由于突发链路中存在不对称链路甚至单向链路,使得发送节点可能丢失接收节点发送的 ACK,造成包重复现象。所以考虑提出多路径 ACK 策略,通过稳定链路和突发链路形成的多条路径发送 ACK,提高 ACK 包到达率,抑制包重复问题。

2.2 短期链路估计参数选择

多时间尺度的链路估计器需要的短期链路估计参数应满足如下条件:

(1)准确估计短时链路质量。

(2)不增加额外信令消耗。

(3)不需要长期测试获取,且关注前向链路,可发现长期、双向链路估计忽视的前向突发链路,降低链路不对称性的影响。

本文基于实际的链路实验发现节点间长期链路质量较差时,仍然存在节点可以连续正确的收取数据包,也就是短期链路较好的情况,从而可以尝试使用节点的连续正确收包次数 (Consecutive Correctly Received packets Number, CCRN) 作为短期链路质量的估计值,下面通过实际链路实验对参数进行评估。

在链路测试中使用克尔斯博公司的 TelosB 节点。发送节点以 100ms 为周期广播信标帧,接收节点获取信标帧后,通过数据包中的包序列号计算 WMEWMA^[9] (Window Mean Exponentially Weighted Moving Average Estimator) 和记录连续接收次数大于 3 次情况,并统计正确接收 4 次后第五个数据包的接收率。首先计算包接收率 (Packet Reception Rate, PRR), 其通过接收端在一定窗口内成功接收的数据包数和实际发送的总包数计算。

$$PRR(w) = \frac{\text{接收到数据包的数量}}{\text{发送数据包的数量}} \quad (1)$$

式(1)中 w 为窗口大小,取值为 10。

然后通过窗口指数滑动平均的方式进行新值更新,从而获得 WMEWMA 估计值。

$$WMEWMA(\alpha, w) = \alpha \times WMEWMA + (1 - \alpha) \times PRR(w) \quad (2)$$

式(2)中 α 为滑动参数,取值为 0.9。

由图 2 可见当长期链路估计值 WMEWMA 在 20%~40% 时,仍然存在 $CCRN > 3$ 的情况,并且通过数据统计可知当连续 4 次正确接收数据包后的第 5 个数据包的接收率为 86%,由此可见短期链路估计参数 CCRN 能准确发现当前链路质量较好,并且其可以通过已有的长期链路估计的信标帧同步获取,不增加额外的信令消耗。另外,此参数采用的是单向估计,仅估计对发送成功与否起决定性作用的前向链路^[6],能有效的发现被忽视的单向有效链路。由以上可见,连续正确收包次数 CCRN 具有短时链路估计参数的特点,能较好的进行突发链路发现。在后续算法中,当 $CCRN > 3$ 时认为发送节点与接收节点间具有较好短时前向链路质量。

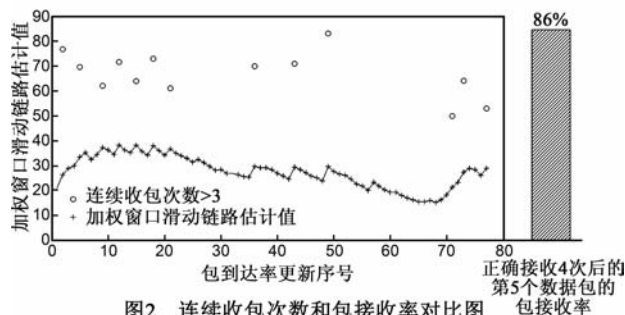


图2 连续收包次数和包接收率对比图

2.3 突发链路发现策略

本文提出的多时间尺度链路估计器应用 ETX 作为长期链路估计参数,并使用链路估计交换协议 (Link Estimation Exchange Protocol, LEEP) 交换节点间的链路信息,采用标准 LE 链路估计器进行长期链路估计。路由引擎和转发引擎采用与汇聚树协议^[10] (Collect Tree Protocol, CTP) 相同架构,路由引擎通过长期链路估计参数选择根节点传输代价最小,也就是路径 ETX 最小的节点作为父节点,转发引擎都使过节点的父节点进行数

据转发,并构成稳定可靠的拓扑结构.在此同时,节点通过 CCRN 可以准确的估计两节点间前向短时链路质量,结合通过 ETX 构建的稳定拓扑结构获取的自身跳数,就可能发现比通过父节点转发路径长度短的突发链路,在长期稳定拓扑结构的基础上实现一定比例的机会路由,达到降低通讯的平均路径长度和降低能耗的目的.

下面就对如何进行突发链路发现进行详细描述,对于长期链路参数的获取、稳定拓扑结构的维护以及节点跳数的计算等与 CTP 协议相同就不再赘述.在提出突发链路发现策略前,先给出以下定义:

(1)连续收包次数 $CCRN_{j \rightarrow i}$ 为节点 i 连续正确接收到节点 j 的数据帧的次数.

(2) Hop_i 为节点 i 到 sink 节点数据转发的节点数.

(3) S_i 为节点 i 的所有邻居节点的集合, SN_i 为节点 i 邻居节点列表, SO_i 为节点 i 记录其邻居节点的突发链路信息列表.

(4) B_i 为节点 i 发送信标帧, BN_i 为节点 i 信标帧所携带的其邻居节点列表. BO_i 为节点 i 发送信标帧携带的邻居节点间突发链路信息列表.

邻居节点列表 SN 的表头如表 1, 信标帧携带的其邻居节点列表 BN 的表头仅包括邻居节点 ID 和反向突发标志两项.

表 1 邻居节点列表 SN 的表头格式

邻居节点 ID	前向突发标志	反向突发标志	跳数	连续正确收包次数
ll_addr	$outburstflag$	$inburstflag$	hop	$ccrn$

邻居节点间突发链路信息列表 SO 的表头如表 2, 信标帧携带的邻居节点间突发链路信息列表 BO 的表头与 SO 相同.

表 2 邻居节点间突发链路信息列表 SO 的表头格式

邻居节点 ID	突发节点 ID	突发标志
ll_addr	$burst_addr$	$burstflag$

假设节点 B 发送信标帧,当节点 A 接收到此数据包时,如果节点 A 发现 $SN_A(i).ccrn = CCRN_{B \rightarrow A} > 3$ 且 $Hop_B - Hop_A > 2$,则判定节点 A 为节点 B 的 $Hop_B - Hop_A - 1$ 跳突发节点,发现反向突发链路,并将此信息记录到 SN_A 中, $SN_A(i).ll_addr = B$, $SN_A(i).inburstflag = Hop_B - Hop_A - 1$,其中 i 为邻居节点的序号.若要节点 B 选择节点 A 进行数据转发,从而实现机会路由,需要将突发信息从节点 A 传递到节点 B ,使节点 B 发现此前向突发链路.可分为两种情况:

(1)情况 1:节点 A 和节点 B 互为邻居节点,且节点 A 、 B 可正常相互通讯.

此种情况比较简单,只需要通过信标帧交换节点

间的链路信息,节点 B 就可以得知节点 A 为其 $Hop_B - Hop_A - 1$ 跳突发节点.

(2)情况 2:节点 A 为节点 B 的邻居节点,但节点 B 到节点 A 的链路质量很差或节点 A 并不在节点 B 的邻居节点集合中.

这种情况就很难通过简单的信标帧交互来发现突发链路.由于节点 A 到节点 B 方向上链路质量很差或根本无法连通,使得节点 B 不能及时或根本不能收到节点 B 到节点 A 方向的信标帧,这样就需要邻居节点的协助来发现突发链路.某节点 C 在接收到节点 A 发送的信标帧时,如果发现 $B \rightarrow A$ 之间存在突发链路且 $B \in S_C$,则将此信息记录到节点 C 的 SO_C 中, $SO_C(i).ll_addr = A$, $SO_C(i).burst_addr = B$,其中 i 为此信息记录的序号.在通过信标帧进行链路交互时,携带此信息,这样节点 B 就可以通过节点 C 获取前向突发链路的信息,从而发现节点 A 为其前向突发节点,从而进行机会路由.由于无线节点的存储空间以及信标帧长度有限,将节点记录和转发邻居节点的突发链路信息最大数量限制为 5.

对上述的过程通过伪代码进行简单描述,分为接收信标帧时和发送信标帧前两大部分:

On receiving a beacon-packet B_j

1. Found/insert item k that $SN_i(k).addr = j$
2. If $B_j.seq_lastseq = 1$ Then
3. $SN_i(k).ccrn = SN_i(k).ccrn + 1$
4. If $SN_i(k).ccrn > 3 \ \&\& \ SN_i(k).hop_my_hop > 2$ Then
5. $SN_i(k).inburstflag = SN_i(k).hop_my_hop - 1$
6. Else
7. $SN_i(k).inburstflag = 0$
8. Found item k that $BN_j(k).addr = i$
9. If $BN_j(k).inburstflag > 0$ Then
10. Found a burst link from myself to node j
11. Scan all item in BN_j
12. If $BN_j(k).inburstflag > 0 \ \&\& \ BN_j(k).ll_addr \in S_i$ Then
13. Found/insert item h in SO_i
14. $SO_i(h).ll_addr = j$
15. $SO_i(h).burst_addr = i$
16. $SO_i(h).burstflag = BN_j(k).inburstflag$

Before sending a beacon-packet

1. $seq = seq + 1$
2. Add seq to header of beacon-packet
3. For $k = 0 ; k < 5 ; k++$
4. $BO_i(k).ll_addr = SN_i(k).ll_addr$
5. $BO_i(k).burst_addr = SN_i(k).burst_addr$
6. $BO_i(k).burstflag = SN_i(k).burstflag$
7. Add Burst Message to footer of beacon-packet
8. For $k = 0 ; k < maxItems ; k++$
9. $BN_i(k).inburstflag = SN_i(k).inburstflag$
10. $BN_i(k).ll_addr = SN_i(k).ll_addr$
11. Add Neighbor Message to footer of beacon - packet

2.4 多路径 ACK 策略

数据包通过机会路由进行传送时,特别是通过突发的单向链路进行传送,会造成大量的复制数据包,其主要原因是存在反向链路质量较差或不能连通的情况,导致发送节点没有收到反向链路返回的 ACK,因此发送节点会重复发送数据包,从而在接收节点处造成包重复现象.抑制复制数据包一般有两种思路:

(1)在接收端保存原始转发的数据包,接收到新数据包后同原始转发数据包进行比较,如发现已转发则不在转发新接收到的数据包.此方法可以抑制复制数据包在网络中继续传播,但不能解决复制数据包的产生.

(2)解决 ACK 传输的问题,此方法可以从根本上解决复制数据包的问题.

本文提出的多时间尺度链路估计方法可同时构建稳定拓扑结构和突发链路,在通过突发链路进行机会路由时,也可利用同时存在两种拓扑结构通过多条路径发送 ACK,已提高 ACK 的到达率,从而解决包复制问题,且此方法不会影响节点的前向转发,故不会对数据包的传输时延造成影响.

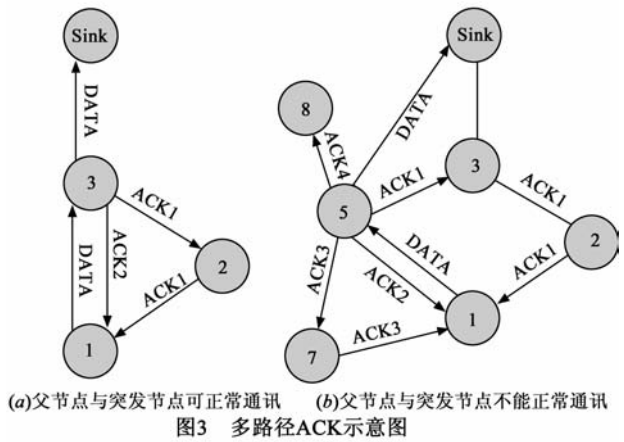
在进行机会路由时,出现一跳突发路径的可能性较大,所以下面主要分析这种情况的多路径 ACK 发送.

(1)情况 1 发送节点的父节点为突发节点的邻居节点且节点间链路质量较好,见图 3(a).

节点 1 的正常数据发送路径为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \text{sink}$,当节点 1 发现节点 3 可以进行机会路由时,选择路径 $1 \rightarrow 3 \rightarrow \text{sink}$ 进行数据转发.节点 3 收到数据后可得到发送节点的父节点 ID 为 2,若节点 2 为其邻居节点,则可以通过 $3 \rightarrow 1$ 和 $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 两条路径同时发送 ACK,这样就可

缓解 $3 \rightarrow 1$ 链路质量较差导致的 ACK 丢失.

(2)情况 2 发送节点的父节点为突发节点的邻居节点但节点间链路质量较差或发送节点的父节点不为突发节点的邻居节点,见图 3(b).



节点 1 的正常数据发送路径为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \text{sink}$,当节点 1 发现节点 5 可以进行机会路由,选择路径 $1 \rightarrow 5 \rightarrow \text{sink}$ 进行数据转发.若节点 1 的父节点 2 并没有在节点 5 的邻居节点中,则节点 5 广播 ACK.其邻居节点收到后查询,若是节点 1 或节点 2 为其邻居节点且节点间具有较好的链路质量,则转发 ACK.见图 3(b),节点 5 的邻居节点 3 发现节点 1 的父节点 2 为其邻居节点且链路质量良好,则转发 ACK;节点 5 的邻居节点 7 发现节点 1 为其邻居节点且链路质量良好,则转发 ACK;节点 5 的邻居节点 8 的邻居节点内不包括节点 1 和节点 2,则不转发 ACK.所以图 3(b)中存在 $5 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 、 $5 \rightarrow 1$ 和 $5 \rightarrow 7 \rightarrow 1$ 三条 ACK 发送路径.

算法流程图如图 4 所示.

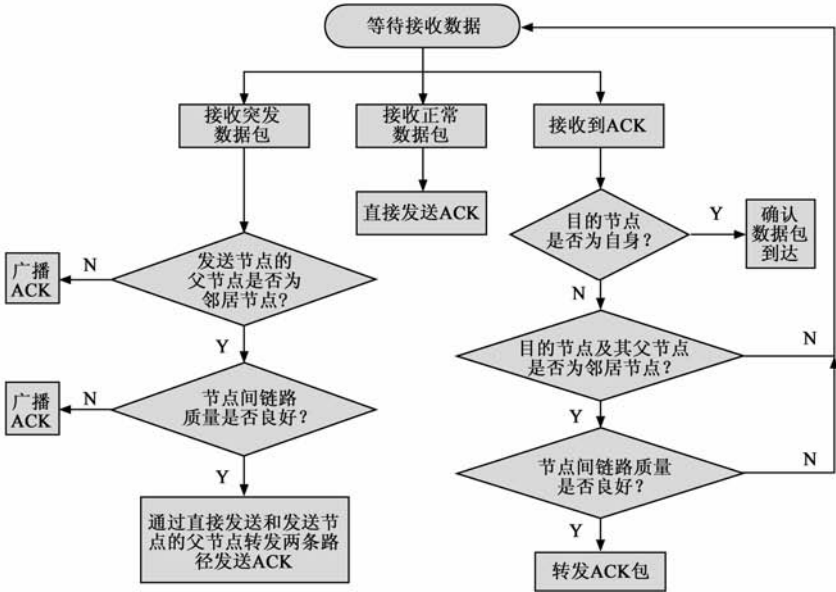


图4 多路径ACK策略流程图

3 实验过程及结果分析

3.1 测试床

Motelab^[8]是哈佛大学开发的一个开放的无线传感器网络实验环境,其硬件结构主要由两部分构成:(1)无线传感器节点,Motelab 具有 190 个 Telosb 节点,每个节点具有光强、温度和湿度传感器;(2)静态有线链路,每个节点都是通过墙壁电源进行供电,并且连接到以太网,可方便地对节点进行烧写、控制以及收集数据.软件部分主要是完成节点重新编程、数据收集功能,并提供网络接口和时间片调度策略实现多个用户共享测试床.本文后续实验都是通过此测试床完成.下面首先进行单独突发链路发现测试,验证突发链路发现策略的有效性,然后进行多时间尺度链路估计算法的综合实验,与标准 LE 链路估计器进行对比分析.

3.2 突发链路发现测试

本文提出通过 CCRN 来进行短期链路估计,并通过突发链路发现策略寻找突发路由机会.在实验中,测试床中所有节点都进行链路信息交换,并在固定周期通过静态有线链路获取节点前向和反向的突发链路数量.若是所有节点间的信标帧都是双向可达的,则所有节点的前向突发链路数量的和与所有节点的反向突发链路数量的和应该相同,但由于链路的不稳定性和不对称性,节点不能发现所有前向突发链路,而反向突发链路的数量依然等同于全部前向突发链路的数量.下面通过三种方式获取突发链路机会并进行比较.

- (1)反向突发链路.
- (2)仅通过链路交换获取前向突发链路.
- (3)通过突发链路发现策略获取的前向突发链路.

表 3 突发链路发现对比表

方式	1 跳突发	2 跳突发	3 跳突发	突发总和
反向突发链路	1531	892	53	2476
前向突发链路-链路交换	642	416	21	1079
前向突发链路-突发链路发现策略	1324	654	27	2005

从表 3 可以看到,仅通过链路交换获取前向突发链路时,只能获取 43.6%的前向突发链路,其中 1 跳突发链路为全部的 41.9%;2 跳突发链路为全部的 46.6%;3 跳突发链路为全部的 39.6%;使用突发链路发现策略后,可获取 81%的前向突发链路,其中 1 跳突发链路为全部的 86.5%,提高了 44.6%;2 跳突发链路为全部的 73.3%,提高了 45.9%.由此可见突发链路发现策略利用邻居节点的协助能有效的进行突发链路发现.

3.3 多时间尺度链路估计方法实验验证

本实验分为以下四种方式:

- (1)Standard LE 采取标准 LE 估计器,使用 ETX 估计

链路质量.

(2)MTSLE-NALF 采取多时间尺度链路估计器,但仅通过链路交换进行路由发现.

(3)MTSLE-NMA 采取多时间尺度链路估计器,但不使用多链路 ACK 策略.

(4)MTSLE 采用多时间尺度链路估计器.

实验程序采用 TinyOS2.x 嵌入式操作系统,采用 nesC 语言进行编写,并使用 TinyOS2.x 中自带的汇聚协议 CTP 协议的框架(转发引擎基本没有改动,路由引擎和链路估计器根据不同方式的实验进行调整).

由表 4 中结果可见,四种方式中采用完整 MTSLE 算法的实验结果最优.下面就分别进行对比分析,MTSLE-NALF 方式的平均跳数高于 MTSLE 和 MTSLE-NMA 方式且低于 Standard LE 方式,是因为 MTSLE-NALF 方式没有采用突发链路发现策略,不能充分的利用突发链路进行机会路由,特别是具有单向特性、难于通过基于双向、长期的链路估计发现并利用的突发链路,使得其减少网络平均跳数的效果有限;MTSLE-NMA 方式的平均跳数基本与 MTSLE 方式持平,但平均路径长度较长,并具有严重的复制包问题,主要原因是其利用突发链路发现策略能发现更多的突发路径,可采用比 MTSLE-NALF 更优的突发路径进行数据通讯,所以得到更小的网络平均跳数,但由于其未采用多链路 ACK 策略,不能解决单向链路 ACK 丢失的问题,产生大量复制包,并使平均路径长度因重发而变长.综上,使用多时间尺度链路估计算法为路由引擎提供多时间尺度的链路数据,在长期链路质量维持的稳定拓扑结构上采用突发链路发现策略进行机会路由选择,并采用多路径 ACK 策略进行数据发送确认,可以降低通讯链路的平均跳数,进而使平均路径长度较低,减少数据转发次数,达到延长生命周期,提高包接收率的目的.

表 4 四种方式数据比较(白天)

算法	包接收率	平均路径长度	平均跳数	复制包数	总收包数
Standard LE	89.1%	4.64	4.58	519	6880
MTSLE-NALF	88.7%	4.25	4.15	450	6769
MTSLE-NMA	89.5%	4.27	3.64	1145	7490
MTSLE	91.1%	3.54	3.47	297	6810

4 结论

针对无线链路的不稳定性和不对称性造成的问题,论文采用长期和短期两种时间尺度估计节点间的链路质量,构建稳定链路和突发链路共存的拓扑结构,并采用突发链路发现策略实现机会路由,从而设计出多时间尺度链路估计算法;同时又针对复制数据包问题,又补充提出了多路径 ACK 策略,通过稳定链路和突发链路共同形成的多条路径传递 ACK,提高 ACK 的到

达率,控制包复制问题.实验对平均链路长度和复制包数两方面特性进行研究,结果表明多时间尺度链路估计算法能有效地降低平均链路长度,并且能较好的抑制包复制问题.文中利用 CCRN 估计短时链路参数时采用固定阈值 3,在后续的工作中还需要对此阈值的动态取值进行进一步研究.

参考文献

- [1] 李建中,高宏.无线传感器网络的研究进展[J].计算机研究与发展,2008,45(1):1-15.
- [2] Marko P. Wireless technologies in process automation-a review and an application example[R]. Report A, ISSN 1238-9390, Control Engineering Laboratory, University of Oulu, Oulu, Finland, 2008. 1-63.
- [3] Srinivasan, K M Kazandjieva, et al. The beta factor: measuring wireless link burstiness[A]. Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. ACM New York, NY, USA, 2008. 29-42.
- [4] D Ganesan, D Estrin, A Woo, et al. Complex behavior at scale: an experimental study of low-power wireless sensor networks[R]. Technical Report UCLA/CSD-TR 02-0013, Department of Computer Science, University of California, Los Angeles, 2002. 1-11.
- [5] De Couto, Douglas S J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[A]. Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. MOBICOM, San Diego, CA, United States, 2003. 134-146.
- [6] Sang, L, Arora, A, Zhang, H. On link asymmetry and one-way estimation in wireless sensor networks[J]. ACM Trans. Sensor Network, 2010. 6(2):1-25.
- [7] N Baccour, A Koubaa, H Youssef, et al. F-lqe: A fuzzy link quality estimator for wireless sensor networks[A]. Proceedings of 7th European Conference on Wireless Sensor Networks[C]. IEEE Press Coimbra, Portugal, 2010. 240-255.
- [8] Geoffrey Werner-Allen, Patrick Swieskowski, Matt Welsh. MoteLab: a wireless sensor network testbed[A]. Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks[C]. IEEE Press Piscataway, NJ, USA, 2005. 483-488.
- [9] A Woo, D Culler. Evaluation of Efficient Link Reliability Estimators for Low-Power Wireless Networks[R]. Technical Report CSD-03-1270, University of California, Berkeley, 2003.
- [10] O Gnawali, R Fonseca, K Jamieson, et al. Collection Tree Protocol[A]. Proc. of the 7th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems[C]. ACM New York, NY, USA, 2009. 1-14.

作者简介



彭喜元 男,教授、博士生导师,1961 年生于内蒙古四子王旗,哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院院长,主要研究方向为自动测试技术和智能故障诊断理论等。

E-mail: pxy@hit.edu.cn



潘大为 男,1982 年 1 月出生于黑龙江大庆,哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士研究生,主要从事自动测试与仿真、嵌入式系统以及无线传感器网络技术研究工作。

E-mail: tianxiapdw@163.com