

突发性链路感知的自适应链路质量估计方法

黄庭培^{1,2}, 李栋¹, 张招亮^{1,2}, 崔莉¹

(1.中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 提出了一种无线传感器网络中突发性链路感知的自适应链路质量估计方法 EasiLQE。节点周期性地发送控制分组, 采用长周期主动探测机制探测链路的质量; 同时, 节点被动侦听接收到分组的 RSSI 均值, 当低于某一阈值时, 触发短周期链路质量探测过程。最后节点使用基于误差的滤波器估计链路在未来一段时间内的质量。实验结果表明, EasiLQE 既能实时准确地感知突发性链路在短时间内的持续变化, 又能平滑短暂的低幅度波动而保持良好的稳定性, 同时维持较低的估计开销。

关键词: 无线传感器网络; 链路质量估计; RSSI; 突发性链路; 基于误差的滤波器

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)06-0030-10

Bursty-link-aware adaptive link quality estimation method

HUANG Ting-pei^{1,2}, LI Dong¹, ZHANG Zhao-liang^{1,2}, CUI Li¹

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A bursty-link-aware and adaptive link quality estimation method, named EasiLQE, was proposed. The beacon packets are sent by nodes in a long-term period to probe the link quality. Meanwhile, nodes passively measure the mean value of RSSI of received packets. If the mean value of RSSI is lower than a certain threshold, the EasiLQE initiates the link quality estimation process in a short-term period. Finally, the EasiLQE uses error-based filter to estimate the link quality in future. The experimental results show that the EasiLQE can react quickly and accurately to persistent link quality changes in a short time, and also can smooth the occasional link quality fluctuations, which are not acute, to keep the link quality estimator stable, and decrease the estimation costs.

Key words: wireless sensor networks; link quality estimation; received signal strength indicator; bursty links; error-based filter

1 引言

在无线传感器网络中, 高效、准确、实时而又稳定的链路质量估计是保证上层协议性能的基础, 如路由协议选择通信质量高的链路进行数据传输, 链路质量估计的准确性直接影响到路由协议的性能^[1~4]。然而无线链路固有的动态变化性和不可预测

性使得实时、准确的链路质量估计仍然面临巨大挑战, 尤其是在复杂的网络环境下, 如周围有移动的人、各种静止或移动的障碍物、其他无线网络如 802.11、电子通信设备等, 无线链路的状态在短时间内变化很快, 表现出高度的突发性。故宫文物展陈环境监测系统就是一个典型的应用实例, 不同时间不同流量及不同移动程度的游客, 以及其他无线

收稿日期: 2010-09-13; 修回日期: 2011-01-10

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03006-006, 2010ZX03006-003-02); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2011CB302803)

Foundation Items: The National S&T Major Project of China (2010ZX03006-006, 2010ZX03006-003-02); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB302803)

网络及电子通信设备的干扰等，严重影响了无线链路的通信质量。在这类复杂的通信环境中，如何实时感知链路的突发性变化，准确、自适应地估计链路质量，对链路状态的变化做出快速反应显得尤为重要。

目前，大量研究人员对链路质量估计问题展开了深入研究，提出许多链路质量估计方法。已有方法一般可分为2大类：基于硬件的链路质量估计和基于软件的链路质量估计。基于硬件的链路质量估计直接从硬件获取相关信息，如RSSI(received signal strength indicator)、LQI(link quality indicator)、SNR(signal-to-noise ratio)等^[5-7]。这类方法简单、开销小，但不能准确反映链路在一段时间内的状态。基于软件的链路质量估计方法一般通过周期性地发送控制分组来探测链路的质量，如ETX(expected transmission count)^[2]，或统计成功发送一个分组所需要的发送次数，如RNP(requested number packet)^[3]，或使用某种预测机制对链路在将来一段时间内的质量进行预测，如WMEWMA(window mean with exponentially weighted moving average)^[8]、EasiTOD^[9]等。这类方法考虑了分组的丢失情况，能够准确反映当前的链路质量，但存在以下问题：如果统计周期太短会大大增加估计开销，并且频繁的链路质量更新会导致其他网络问题，如频繁的路由更新、路由震荡或路由环等。但是，如果统计周期太长，又不能实时反映链路的当前状态，尤其是在存在大量突发性链路的环境中，不能有效感知短时间内链路的持续变化。然而已有研究表明，无线传感器网络中链路存在突发性特征，即链路不是只有工作好和不工作差2种状态，而是存在一个中间区域(如图1所示)。但是如果能够有效感知并利用这种突发性链路，能够大大提高网络的性能^[10,11]。如果估计算法太复杂，又不能节点上实现在线实时的链路质量预测。

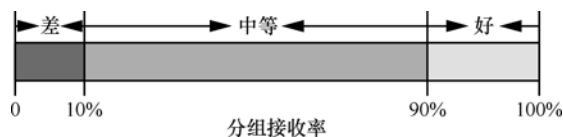


图1 突发性链路

本文针对上述研究工作的不足，结合主动探测与被动侦听机制，提出一种突发性链路感知的自适应链路质量估计方法EasiLQE。节点通过周期性地发送控制分组，使用长周期主动探测机制探测链路

的质量，同时节点被动侦听接收到分组的RSSI均值，有效感知链路的突发性变化，当感知到链路在短时间内持续动态变化时，触发短周期链路质量探测过程。最后节点使用基于误差的滤波器(EF, error-based filter)^[12]估计链路在未来一段时间内的质量。EasiLQE既能对链路状态的变化做出快速反应，又能平滑短暂的链路波动，保持估计器的稳定性，以避免频繁的链路状态波动带来的其他开销。

本文在TinyOS系统下实现了EasiLQE，并使用EZ240v3节点在2种典型的室内环境下进行了测试。与现有无线传感器网络中大量基于WMEWMA的链路质量估计方法进行了比较，验证并分析了EasiLQE的性能。

本文相对已有的研究工作，主要有以下几点贡献。

1) 通过实验分析了复杂无线传感器网络环境下突发性链路的行为特征，验证了当RSSI均值低于某一阈值时链路表现出高度的突发性，针对该问题，使用被动侦听接收到分组的RSSI均值的机制来有效感知网络中的突发性链路，以提高链路质量估计器的准确性。

2) 频繁的周期性链路质量探测会消耗有限的无线信道带宽资源和节点能量资源，针对该问题，本文结合长周期和短周期2种主动链路质量探测机制，能够有效降低链路质量估计的能量开销，并能节约有限的带宽资源。

3) 本文使用EF滤波器，根据过去的链路质量估计值和当前的测量值估计链路在将来一段时间内的质量，既能对短时间内链路的持续变化做出快速反应，又能平滑短暂的链路波动，从而使链路质量估计器保持良好的稳定性，有效权衡链路质量估计器的准确性和稳定性。

2 相关工作

下面从链路质量估计和突发性链路感知2方面对相关研究工作展开论述。

2.1 链路质量估计

目前，研究人员针对链路质量估计问题进行了大量的研究，主要集中在估计链路在较长一段时间内的质量，并提出了2大类链路质量估计方法：基于硬件的链路质量估计方法和基于软件的链路质量估计方法。

基于硬件的链路质量估计方法直接从射频模

块获取相关信息,如 RSSI、LQI、SNR 等。文献[13]指出多个 LQI 的均值(如 120 个)能够很好地反映链路的质量,但单个 LQI 值随时间变化大;同时指出当 RSSI 值高于某个阈值时(CC24240, -87dBm)是一个很好的链路质量衡量指标。M. Lu 等^[5]指出当 RSSI 值高于某一阈值时,几乎能接收到所有的分组。而 D.Lal 等^[14]同样指出当 SNR 值高于某一阈值时,无论实际的 SNR 值是多少,网络都会保持很高的分组接收率,而当 SNR 值低于某一阈值时,分组接收率将会显著下降。该类方法简单、开销小、实时性高,但 LQI 仅仅对接收到分组的前 8 个符号进行测量,并且只对成功接收到的分组进行测量,而没有考虑分组的丢失情况,如果当前网络中的链路有大量的分组丢失,则不能准确地反映当前的链路质量,因而准确性低。

基于软件的链路质量估计模型主要有以下 3 类:通过周期性发送控制分组或侦听网络内的数据分组,主动或被动地统计分组接收率 PRR(packet reception ratio);统计成功发送一个分组需要的次数;采取某种预测机制预测链路在将来一段时间内的质量。ETX 通过周期性地发送控制分组,统计链路双向的 PRR 值来测量当前的链路质量。RNP 统计一个分组在成功接收之前,发送节点发送的总次数,包括重发的次数,指出在同一段时间内,非连续分组丢失的链路要比连续分组丢失的链路传送更多的分组,因此 RNP 倾向于选择长距离离散分组丢失的链路。但是,RNP 在发送次数少,而网络密度大时性能会下降^[15]。WMEWMA、EasiTOD 等都是基于统计 PRR 值的思想,并采用一定的预测方法对将来链路的 PRR 值进行预测。基于软件的链路质量估计方法需要周期性地发送控制分组探测链路的质量,或侦听接收到数据分组的情况,周期太长则不能实时反映链路状态的变化情况,同时不能有效地感知短时间内链路的突发性变化,但周期太短又会增加估计开销,可扩展性差,并且基于时间序列模型的链路质量预测算法^[9]需要大量的历史信息,不能在资源有限的无线传感器网络节点上实现在线预测,从而降低了预测的准确性和实时性。文献[13]结合 ETX 和 RNP,利用物理层、链路层和网络层提供的信息,提出一种与协议无关的链路质量估计器 4Bit。4Bit 使用 LQI 值作为是否使用某条链路的指标,即当 LQI 低于某个阈值时,认为该链路不能正常工作,从而不使用该链路进行数据传输。

但是单个 LQI 值随时间变化大,多个 LQI 的均值与 PRR 值有很好的相关性^[6],但统计大量的 LQI 值会引入大的开销和延时。同时这种固定的黑名单策略对 4Bit 性能影响很大,文献[15]指出当不采用这种黑名单策略时,4Bit 各方面的性能都会显著降低,4Bit 还会导致热点问题,不利于网络负载的均衡。

2.2 突发性链路感知

大量研究表明低功率无线链路并不是简单的二元模型,即并不是只存在好与坏,连通与非连通 2 种状态。文献[16]指出在实际部署的网络中,存在一个过渡区域,在该区域内,存在大量的、临时的、不稳定的链路,链路存在连通、过渡和非连通 3 种状态。文献[11]通过 3 种不同的实验场景测量了 802.15.4 通信链路,将链路分为 3 种:当 PRR 高于 90%时,认为是质量好的链路;当 PRR 低于 10%时,认为是质量差的链路;PRR 在 10%~90%之间的链路为中间型链路(如图 1 所示)。作者指出中间型链路具有突发性,链路质量波动幅度和频率都很大,为此作者使用条件密度分布函数,给出一个衡量链路突发性的指标 β ,即在成功连续接收到 5 个分组后下一个分组丢失的概率或连续丢失一个分组后下一个分组成功接收的概率,其核心思想是当质量好的链路感知到分组丢失时则停止发送,以降低发送的次数,但以增加数据分组的传输延时和降低网络的吞吐量为代价。同时,在复杂的网络环境中,合理利用突发性链路能够有效地均衡网络负载,提升网络的吞吐量,降低网络数据转发的次数等。文献[10]在传统的收集协议 CTP^[17]中,利用侦听机制发现并利用这种突发性链路,以达到降低数据转发次数和传输开销,提高网络吞吐量的目的。

本文结合基于软件的链路质量估计和基于硬件的链路质量估计 2 种机制,采用 EF 对当前测量的链路质量进行估计,设计并实现了一种突发性链路感知的自适应链路质量估计方法 EasiLQE。

3 突发性链路行为分析

本文在 2 种实验场景下,通过大量统计实验,分析了突发性链路的行为特征,指出了网络中存在的突发性链路为链路质量估计带来的问题及对网络性能的影响。

本文使用基于 CC2420 射频芯片^[18]、IEEE

802.15.4 标准^[19]的 Ez240v3 节点^[20], 选取中国科学院计算所办公楼与中国科学院教学楼 2 种室内场景, 分析突发性链路的行为特征。第一种场景选取周末时间段, 流动人员少, 但存在其他无线网络如 802.11、蓝牙、WiFi 及大量的室内障碍物。第二种场景选取学生上课前和下课前后一段时间, 有大量随机流动的学生, 但周围环境空旷。

本文通过统计单个分组的 RSSI 值、短时间内的 RSSI 均值及 PRR 值来分析突发性链路的行为特征。CC2420 芯片给定了 RSSI 计算公式(以 dBm 为单位): $P = \text{RSSI_VAL} + \text{RSSI_OFFSET}$, 其中, RSSI_OFFSET 约为 -45dBm , 并将 RSSI 的测量值存储在 RSSI_VAL 寄存器中。本文通过上述公式被动侦听接收到分组的 RSSI 值。在实验中 CC2420 发射功率设为最大值, 节点间测试距离在 $15\text{m} \sim 20\text{m}$ 之间。发送节点每隔 1s 发送一个数据分组, 接收节点记录每次接收到分组的 RSSI 值, 并统计短时间内节点接收到分组的 RSSI 均值 μ_{rssi} 及 PRR 值。RSSI 均值和 PRR 的计算公式如下:

$$\mu_{\text{rssi}} = \sum_{i=1}^n \text{rssi}_i / n \quad (1)$$

$$\text{PRR} = \frac{\text{num_recv}}{\text{num_send}} \quad (2)$$

其中, rssi_i 表示接收到的第 i 个分组的 RSSI 值, n 是一个统计周期内接收到分组的个数; num_recv 是节点成功接收到的分组总数, num_send 是发送节点发送分组的总数。在本文实验中, 统计周期为 7s 。图 2 和图 3 分别给出了办公楼内和教学楼内的实验结果。

图 2(a)给出了 PRR 的时序, 结果表明 PRR 值在后面一段时间内波动很大, 这主要是因为办公室内的其他无线网络及障碍物对通信链路的影响。图 2(b)给出了单个 RSSI 值随时间的变化情况, 表明单个 RSSI 值随时间波动很大, 不能很好地反应当前的链路质量。图 2(c)给出了 RSSI 均值和 PRR 之间的关系, 从图中可知, 当 RSSI 均值低于 -85dBm 时, PRR 在 $30\% \sim 95\%$ 之间来回波动, 说明链路很不稳定, 同时当 RSSI 均值大于 -85dBm 时, 链路质量也有变化, 但幅度不大。图 3(a)同样表明在没有人走动的前提下, 如在 500s 到 1700s 时间段内, 链路质量好且稳定, 但有 2 个时间段内 PRR 值波动很大, 这主要是在学生上课或下课的一段时间内, 大厅内人多, 移动频繁, 造成链路质量的波动。图 3(b)

也说明单个的 RSSI 值随时间变化很大, 不能反应当前的链路质量情况。图 3(c)同样表明在 RSSI 均值低于 -85dBm 时, 链路表现出高度的突发性, 而 RSSI 均值大于 -85dBm 时, 链路质量波动较小, 表现出很好的稳定性。

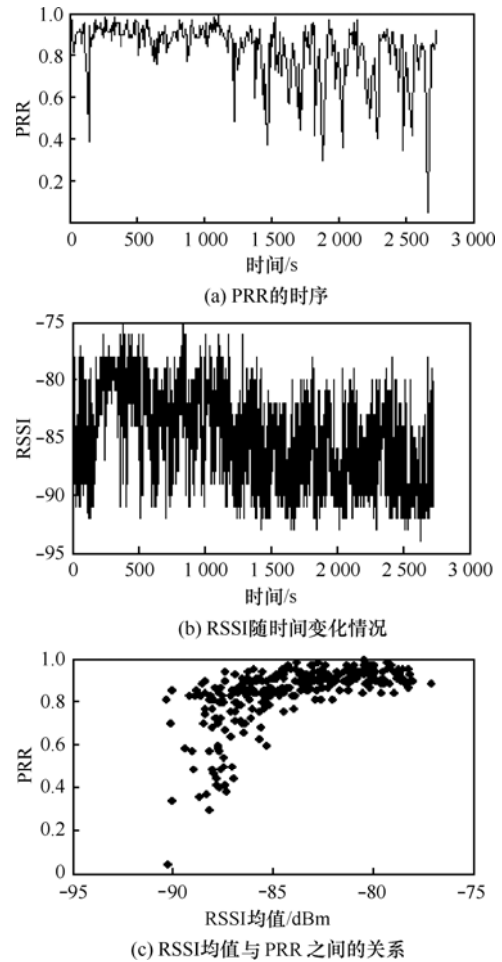


图2 办公楼内的实验结果(发射功率: 0dBm , 距离: 15m 左右)

以上实验结果表明, 当链路受到其他无线网络的干扰或移动障碍物的影响时, 链路在短时间内表现出高度的突发性, 传统的周期性探测方式不能有效感知这种突发性链路, 不能准确地反映当前链路质量的变化。探测周期太长时, 则不能有效感知短时间内链路的波动, 而周期太短, 又不适合于资源有限的无线传感器网络, 特别是随着网络规模的增大, 频繁的周期性探测会消耗大量的能量和带宽资源。以图 3(a)为例, 如果节点每 5min 探测一次, 就会高估 $1800\text{s} \sim 2000\text{s}$ 和 $2700\text{s} \sim 3000\text{s}$ 这 2 个时间段内的链路质量, 从而导致该时间段内大量的分组重发操作, 严重影响网络的性能。同时, 如果使用简单的黑名单过滤策略, 则不能充分利用这种突发

性链路。因此在实际的无线传感器网络应用系统的设计与实现中,需要一种有效的突发性链路识别机制及准确、实时的自适应链路质量估计方法,以保证上层协议的性能。本文提出的 EasiLQE 链路质量估计方法能够较好地解决上述问题。

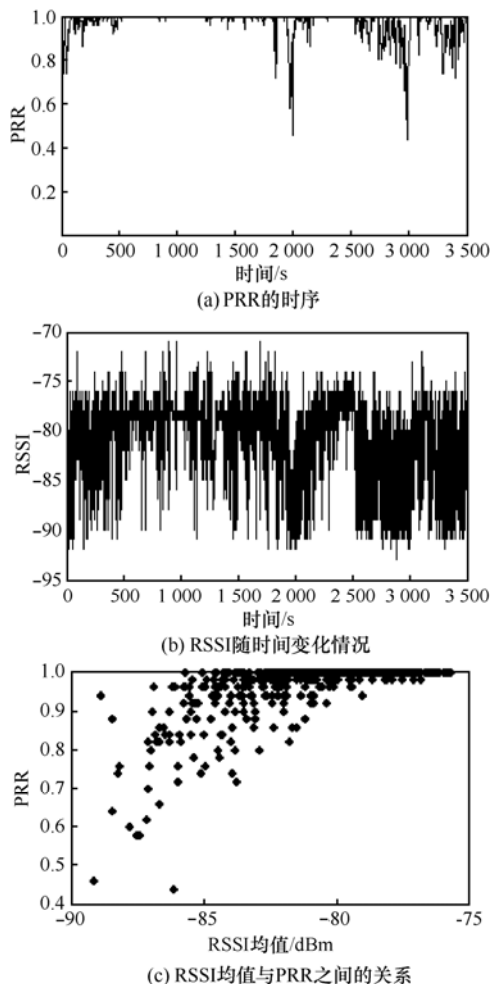


图 3 教学楼内的实验结果(发射功率: 0dBm, 距离: 20m 左右)

4 EasiLQE 链路质量估计方法

4.1 EasiLQE 整体架构

EasiLQE 结合被动侦听和主动探测 2 种机制,根据物理层提供的 RSSI 信息和链路层统计的 PRP 信息,对将来一段时间内的链路质量进行估计。本文采用 PRP 估计值来衡量链路的质量。EasiLQE 主要由 3 部分组成:突发性链路被动感知模块、链路质量主动探测模块和基于 EF 的链路质量估计模块。其中链路质量主动探测模块又分为短周期链路质量探测模块和长周期链路质量探测模块。

突发性链路被动感知模块被动侦听节点接收到分组的 RSSI 均值,包括控制分组和数据分组,当感知到节点间的链路具有突发性即 RSSI 均值低于某一阈值时,则触发短周期链路质量探测模块进行探测。使用被动侦听机制,不需要额外地计算开销和控制开销。链路质量主动探测模块通过周期性地发送控制分组,节点主动探测与邻居节点间的链路质量,并记录当前的 PRP 测量值。由于无线传感器网络信道带宽、能量及计算资源有限,主动探测模块的周期一般会设置得比较长,从第 3 节的分析可知。在复杂的环境下,链路在短时间内表现出高度的突发性,因此长周期性的探测不能实时准确地反映当前的链路状态, EasiLQE 结合突发性链路被动感知模块,只有感知到突发性链路时才启动短周期链路质量探测模块,能够较好地权衡 EasiLQE 的实时性、准确性和开销。基于 EF 的链路质量估计模块根据当前的 PRP 测量值和过去的 PRP 估计值,使用 EF 估计链路在将来一段时间内的质量,既能平滑短暂的链路波动,使得 EasiLQE 保持良好的稳定性,又能对持续的链路波动作出快速的反应,准确地估计链路在将来一段时间内的质量。EasiLQE 的基本工作流程如图 4 所示。

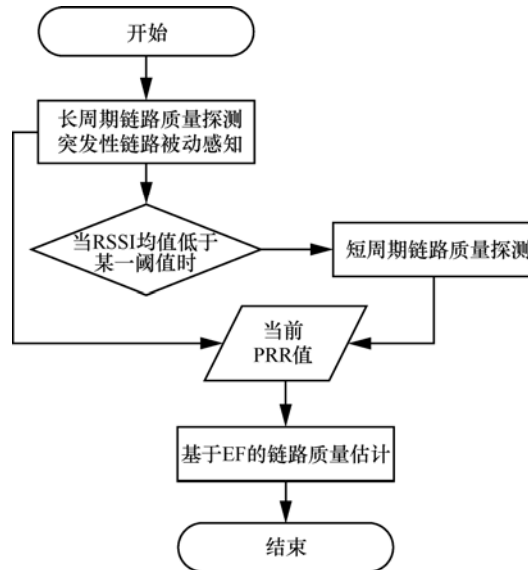


图 4 EasiLQE 工作流程

4.2 被动感知与主动探测

EasiLQE 被动侦听接收到的分组,包括控制分组和数据分组,并根据式(1)计算 $T_{passive}$ 周期内接收到分组的 RSSI 均值 $RssiCurrent_{\mu}$, 当 $RssiCurrent_{\mu}$ 低于某一阈值 $RssiThreshold$ 时,主动

触发短周期 $T_{\text{active}}(\text{short-term})$ 链路质量探测过程, 并估计链路在未来短时间内的质量。 $RssiThreshold$ 的取值与具体应用需求和硬件设备有关, 当需要高的准确性时, 阈值可设得大一些。通过被动侦听 RSSI 均值来感知突发性链路的机制不会增加额外的能量开销, 且计算与存储开销小。同时, 节点通过周期性地发送控制分组主动探测链路的质量, 根据式(2)计算链路当前的 PRR 值 PRR_{current} , 由于传感器网络节点资源有限, 主动探测周期一般都很长, 但周期太长又不有效感知链路在短时间内的持续变化, 因此本文在感知到突发性链路时, 采用短周期链路质量探测机制, 而链路状态稳定时, 采用长周期 $T_{\text{active}}(\text{long-term})$ 链路质量探测机制。EasiLQE 采用被动感知与长、短周期主动探测相结合的机制, 能够较好地权衡链路质量估计的开销与实时性、准确性。

4.3 基于 EF 的链路质量估计

被动感知与主动探测只能测量链路当前的质量, 而无法预测链路在将来一段时间内的质量。因此, 链路质量估计算法就是根据链路过去和现在的状态预测链路将来的质量。由于低功率无线链路的高度动态变化特性和不可预测性, 使得准确预测链路质量仍然是一个难题。当前无线传感器网络中广泛使用的 WMEWMA 滤波器能够快速检测到链路的真实变化情况或者平滑短暂的波动, 但不能同时实现这 2 个目标, 并且在有大量突发性链路的环境中, WMEWMA 的性能会降低^[10]。而在实际的网络环境中, 存在大量的突发性链路, 链路状态变化很快, 因此需要链路质量估计器既能快速感知链路状态的快速变化, 又能保持一定的稳定性, 因为频繁的链路质量波动对上层通信协议的性能有重要影响, 如会导致频繁的路由更新, 路由波动或路由环等问题。本文使用 EF 预测将来一段时间内的链路质量。EF 能够快速感知链路的持续变化, 又能在一定程度上平滑临时的波动, 能够在实时性、准确性和稳定性之间取得较好的平衡。对于上层通信协议如路由协议来说, 实时准确的链路质量信息使得路由选择更加准确, 提高了路由协议的性能, 同时稳定的链路质量信息能够避免频繁的路由变化带来的路由更新开销和路由震荡等问题。

EF 是对指数加权移动平均 (EWMA, exponentially weighted moving average) 滤波器的一

种改进, EWMA 模型的一般表达式如下:

$$E_t = \alpha E_{t-1} + (1-\alpha) M_{\text{current}} \quad (3)$$

其中, E_{t-1} 、 E_t 分别表示前一个周期的估计值和当前的估计值, M_{current} 表示当前的测量值, α 是一个平滑因子。EF 对 EWMA 进行改进, 使得 α 不再是一个固定的值, 能够随着滤波器的预测能力自适应地变化, 如果 EF 的估计值能够很好匹配实际的测量值, 则给予过去估计值更大的权重, 反之, 降低过去估计值的权重, 使得 EF 估计值能够快速反映当前链路状态的变化情况。EF 这种固有的特性能够很好地解决本文提出的问题。在 EF 滤波器中 α 记为 α_t , 其计算公式如下:

$$\alpha_t = 1 - (\Delta_t / \Delta_{\text{max}}) \quad (4)$$

其中, Δ_{max} 是当前观测到的 m 个 Δ_t 中的最大值。 Δ_t 表示估计误差, 单个观察值的误差是当前测量值 M_{current} 与上一个周期的估计值 E_{t-1} 的差值的绝对值。在 EF 滤波器的每一步计算中, 并不是使用绝对的误差值, 而是通过二次指数加权移动平均对绝对误差值进行平滑过滤。 Δ_t 的计算公式如下:

$$\Delta_t = \varepsilon \Delta_{t-1} + (1-\varepsilon) |E_{t-1} - M_{\text{current}}| \quad (5)$$

其中, ε 是一个经验值, 由不同的应用需求和应用环境确定。

本文使用 EF, 根据过去一段时间内估计的链路的 PRR 值和当前测得的链路的 PRR 值, 对将来一段时间内链路的 PRR 值进行估计, 其估计模型如下:

$$E(\text{PRR})_t = \alpha_t E(\text{PRR})_{t-1} + (1-\alpha_t) \text{PRR}_{\text{current}} \quad (6)$$

其中, $E(\text{PRR})_t$ 、 $E(\text{PRR})_{t-1}$ 分别表示当前估计的链路的 PRR 值和上一个周期估计的链路 PRR 值, $\text{PRR}_{\text{current}}$ 表示当前测得链路的实际 PRR 值。

通过 EF 自适应地估计链路在将来一段时间内的质量, EasiLQE 能够提高链路质量估计的实时性、准确性, 同时又能保持良好的稳定性。

4.4 EasiLQE 的实现

本文在 TinyOS2.1 系统下实现了 EasiLQE, 具体实现算法的伪代码如算法 1 所示。

算法 1 EasiLQE

输入: $RssiThreshold$, T_{passive} , $T_{\text{active}}(\text{long-term})$,

$T_{\text{active}}(\text{short-term})$, ε , m

输出: $E(\text{PRR})_t$

1) Initialization

```

2) for every node do
3) timer1 ← T_active(long-term)
4) timer2 ← T_passive
5) while the timer1 is fired
6)   broadcast the probing packets
7)   receive the probing packets and compute
the PRR_current
8) end while
9) while the timer2 is fired
10) read rssi from the CC2420 and save it
11)   compute the RssiCurrent_μ
12)   if RssiCurrent_μ < RssiThreshold then
13)     timer1 ← T_active(short-term)
14)   else
15)     timer1 ← T_active(long-term)
16)   end if
17) end while
18) compute the Δt and αt
19) compute the E(PRR)t
20) end for
    
```

5 EasiLQE 性能评估

为了深入分析 EasiLQE 的性能，本节采用第 3 节所描述的实验方法和设备，在教学楼和办公楼 2 种实验环境下进行了实验，对 EasiLQE 的稳定性、准确性和控制开销 3 个方面的性能进行了评估。在具体实验过程中，发送节点每秒发送 10 个分组，在接收方，节点每隔 7s 统计一次链路的实际 PRR 值，未采用任何估计技术，在本文中记为 ETX。WMEWMA 和 EasiLQE 的探测周期为 60s，但只统计前 7s 内的 PRR 值，即只在前 7s 内发送控制分组进行链路质量探测。EasiLQE 每隔 30s 统计一次 RSSI 均值，当 RSSI 均值低于 -85dBm 时，主动触发短周期链路质量主动探测过程，即每隔 1s 统计一次链路的 PRR 值。

下面从均方误差、协方差和控制开销(包括存储开销、计算开销和能量开销)3 个方面对比分析 EasiLQE 和 WMEWMA 的性能。均方误差(mean square error)反映了链路质量估计器的准确性，而协方差(coefficient of variation)反映了链路质量估计器的稳定性，是标准方差与均值的比值。

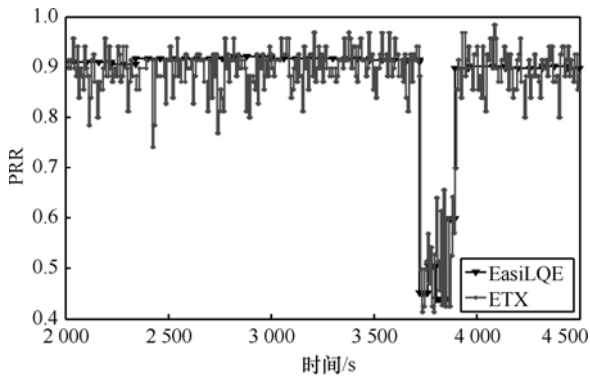
实验过程中所用到参数的取值如表 1 所示，由实际网络环境下实验测量得到的经验值。

表 1 实验配置参数

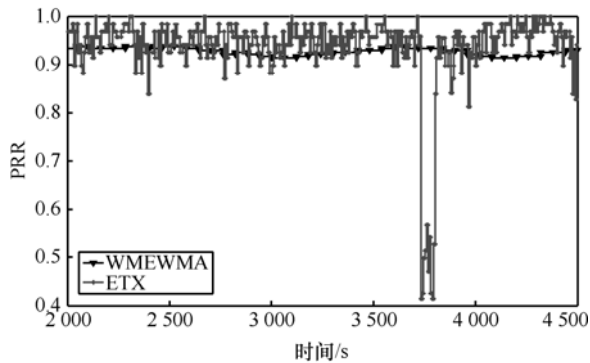
| 参数 | 取值 |
|--------------------------|--------|
| $T_{passive}$ | 30s |
| $T_{active}(short-term)$ | 60s |
| $T_{active}(long-term)$ | 1s |
| $RssiThreshold$ | -85dBm |
| ϵ | 0.6 |
| α | 0.9 |
| m | 8 |

5.1 准确性和稳定性

图 5 给出了教学楼内不同链路质量估计器的 PRR 时序，其中 ETX 是通过实时统计得到的链路真实 PRR 值。结果表明，EasiLQE 能够很好地感知链路在短时间内持续的波动，如图 5(a)所示，在 3 720s~3 790s 时间段内，由于下课时间段内教学楼一楼大厅有大量学生经过，突发出现的移动障碍物导致节点间链路通信质量显著下降，EasiLQE 通过被动感知 RSSI 均值的变化，当 RSSI 均值低于 -85dBm 时，主动触发短周期链路质量主动探测过程，所以能够及时地反映出链路质量的变化，而 WMEWMA 每隔 60s 的周期性统计不能及时地对链路状态的变化做出反应。如图 5(b)所示，WMEWMA 未感知到 3 720s~3 790s 时间段内链路质量的持续变化。同时，从图 6 所示的 EasiLQE 和 WMEWMA 的均方误差结果可知，在环境相对好的教学楼场景下，EasiLQE 相对于 WMEWMA 准确性提高了 27.8%。从上述实验结果分析可知 EasiLQE 能够更加准确地反映链路质量的变化，准确性和实时性要好于 WMEWMA。但图 7 表明在教学楼环境下 EasiLQE 的协方差要高于 WMEWMA，稳定性受到被动探测的影响，这是因为 EasiLQE 一旦检测到 RSSI 均值低于 -85dBm 时，会缩短探测周期，从而更加准确地反映链路的状态，但是一旦没有移动的学生流后，链路又恢复到好的状态。但在链路状态稳定而受到突发性障碍物影响，链路质量急剧下降的环境下，准确性要比稳定性更加重要。比如在故宫文物展陈环境监测应用中，有大批游客持续出现的情况下，系统需要能够感知这种突发性障碍物的出现，并在数据传输时做出相应的选路决策，从而增加数据成功传输的概率，提高网络的整体性能。



(a) EasiLQE和ETX



(b) WMEWMA和ETX

图 5 教学楼内 PRR 时序

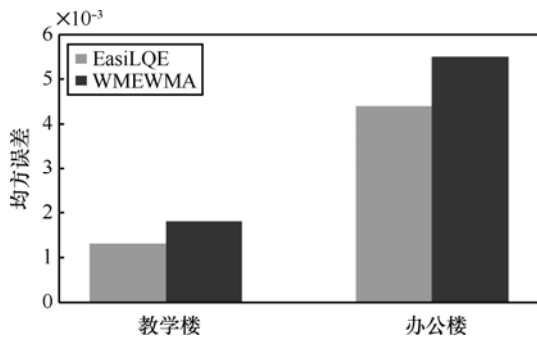


图 6 均方误差

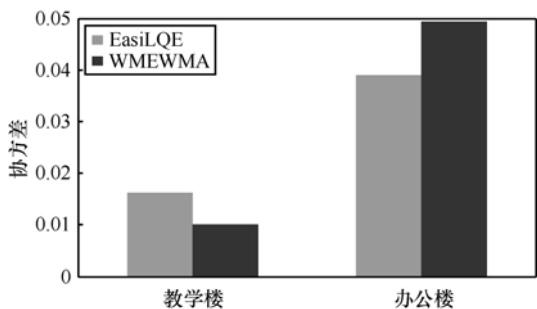
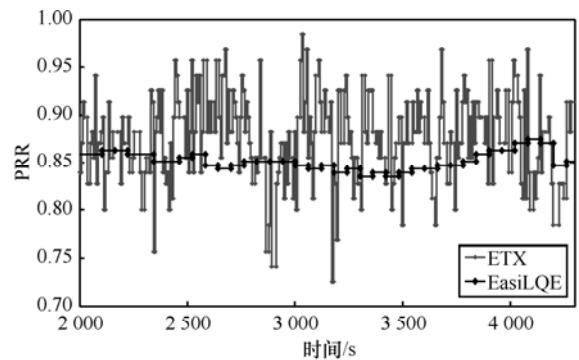


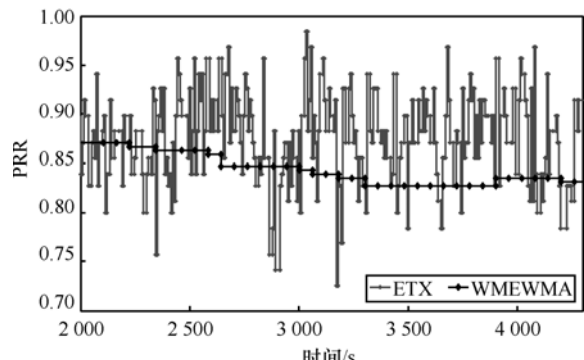
图 7 协方差

图 8 给出了办公楼环境下，在周末时间段内不同链路质量估计器的 PRR 时序，因为办公楼内环境比教学楼内环境更加复杂，PRR 表现出高度的波动性，但大部分时间内 PRR 能保持在 85%~95%之间。

实验结果表明 EasiLQE 和 WMEWMA 都能够保持很好的稳定性，能够很好地平滑链路状态短暂的变化。但图 6 和图 7 结果表明，办公楼环境下 EasiLQE 的准确性和稳定性相对于 WMEWMA，分别提高了约 21%和 20%。这是因为 EasiLQE 采用 EF 滤波器，结合被动感知和主动探测机制，既能够快速感知链路质量的持续变化，同时又能够平滑链路短暂的波动，因为在办公楼内复杂环境下，链路状态变化频繁，需要链路质量估计器保持良好的稳定性，以避免不必要的因频繁链路状态更新导致的其他问题，如频繁的路由更新、路由波动和路由环等问题。结果同时表明在教学楼内链路质量估计器要比办公楼内表现出更好的准确性，这是因为教学楼内在没有大量学生走动的时候，环境好，链路状态稳定，波动小。



(a) EasiLQE和ETX



(b) WMEWMA和ETX

图 8 办公楼内 PRR 时序

5.2 开销

无线传感器网络节点存储资源、计算资源和能量资源有限，在节点上不能实现太复杂的算法，以节约存储开销和计算开销，从而能够在节点上实现在线实时的链路质量估计，同时节点尽可能少发送、侦听和接收数据分组，以节约能量资源。EasiLQE, WMEWMA 算法复杂度低、需要的存储

空间小, 适合于在节点上实现在线的链路质量估计。但在复杂的网络环境下, WMEWMA 存在如何设置探测周期的问题, 周期太长不能有效感知在短时间内链路状态的波动, 而周期太短能量开销太大, 所以需要有效地平衡链路质量估计的准确性和能量开销。EasiLQE 结合被动感知和主动探测机制能够很好地解决上述问题。为了重点考察突发性环境下链路质量估计器的能量开销情况, 本文以教学楼内的链路质量估计开销情况为例, 分析 EasiLQE 和 WMEWMA 的能量开销, 即统计发送和接收控制分组的个数。

图 9 给出了教学楼内 EasiLQE 和 WMEWMA 发送和接收的控制分组的总个数情况。其中, WMEWMA-SHORT、WMEWMA-LONG 分别表示 WMEWMA 的统计周期为 1s、60s。若 WMEWMA 采用 WMEWMA-SHORT 周期, 虽然能够提高链路质量估计的准确性和实时性, 但会带来大的能量开销, 如图 9 所示, WMEWMA 在 2 000s~4 100s 时间段内需要发送和接收 2 100 个控制分组, 则总的能量开销是 4 200 个分组, 而 EasiLQE 发送和接收的总分组数为 490, 但 EasiLQE 被动探测机制主动触发短周期链路质量估计过程后, 探测周期缩短为 1s 钟, 从而增加了额外的 126 个分组, 则 EasiLQE 总的能量开销是 616 个分组, 相对于 WMEWMA 降低了 85.3%。若 WMEWMA 采用 WMEWMA-LONG 周期, 即与 EasiLQE 的探测周期相同, 由于在 3 720s~3 790s 时间段内突发性链路的影响, EasiLQE 总的能量开销相对于 WMEWMA 增加了 25.7%, 但 WMEWMA 是以低的准确性和实时性为代价的。

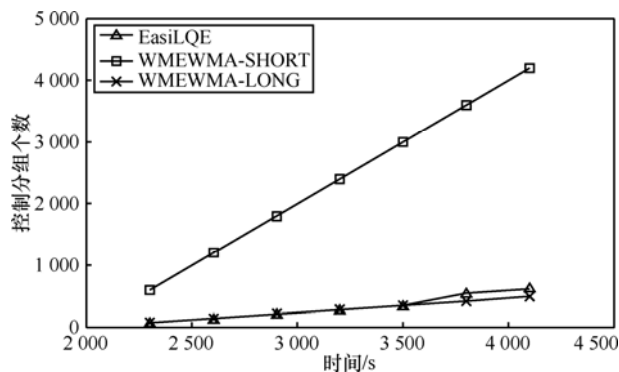


图 9 教学楼内能量开销

从上面的实验结果分析可知, EasiLQE 能够及时准确地感知链路在短时间内的持续变化, 同时在链路状态变化快、但幅度不大、时间短的环境下,

能够平滑链路的短暂变化, 保持良好的稳定性。而 WMEWMA 不能兼顾稳定性与准确性, 同时 WMEWMA 周期性探测机制需要设置合适的探测周期, 周期太长不能有效地感知链路短时间内的持续变化, 周期太短则估计开销太大, EasiLQE 能够较好地权衡链路质量估计的准确性、实时性和能量开销。

6 结束语

高度动态变化和不可预测的低功率无线链路制约着无线传感器网络通信协议的性能, 尤其是在有大量突发性链路的网络环境中, 如何提高链路质量估计的准确性、实时性及稳定性, 同时保持低的估计开销尤为重要。本文提出的突发性链路感知的自适应链路质量估计方法 EasiLQE 能够有效地感知突发性链路在短时间内的持续变化, 同时又能在一定程度上平滑短暂的链路质量波动而保持良好的稳定性, 并能维持低的估计开销。EasiLQE 在复杂网络环境下, 尤其是存在大量突发性链路的网络中取得了较好的效果, 能够有效避免传统链路质量估计的滞后性和不准确性问题, 解决了传统的链路质量估计器不能同时兼顾稳定性和准确性的两难问题及估计开销大的问题。

参考文献:

- [1] WOO A, TONG T, CULLER D. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks[A]. Proc of ACM SenSys'03[C]. New York, NY, USA, 2003.14-27.
- [2] COUTO D S J, AGUAYO D, BICKET J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[A]. Proc of ACM MobiCom'03[C]. New York, NY, USA, 2003. 134-146.
- [3] CERPA A, WONG J L, POTKONJAK M, et al. Temporal properties of low power wireless links: modeling and implications on multi-hop routing[A]. Proc of ACM MobiHoc'05[C]. New York, NY, USA, 2005.414-425.
- [4] NATARAJAN A, SILVA B D, YAP K, et al. Link layer behavior of body area networks at 2.4GHz[A]. Proc of ACM MobiCom'09[C]. New York, NY, USA, 2009.241-252.
- [5] LU M, STEENKISTE P, CHEN T. Design, implementation and evaluation of an efficient opportunistic retransmission protocol[A]. Proc of ACM MobiCom'09[C]. New York, NY, USA, 2009. 73-85.
- [6] SRINIVASAN K, LEVIS P. Rssi is under appreciated[A]. Proc of EmNets'06[C]. 2006.1-5.
- [7] POLASTRE J, SZEWCZYK R, CULLER D. Telos: enabling ultra-low power wireless research[A]. Proc of IEEE IPSN'05[C]. Piscataway, NJ,

- USA, 2005.48-54.
- [8] WOO A, CULLER D. Evaluation of Efficient Link Reliability Estimators for Low-Power Wireless Networks[R]. Technical Report UCB/CSD-03-1270, EECS Department, University of California, Berkeley, 2003.1-20.
- [9] 张乐, 李栋, 崔莉. EasiTOD: 一种降低传感器网络时效障碍物干扰的检测调节机制[J]. 计算机研究与发展, 2009,46(12):2003-2013.
ZHANG L, LI D, CUI L. EasiTOD: a detection and adjustment mechanism to reduce the interference of the timeliness obstacles in sensor networks[J]. Chinese Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(12):2003-2013.
- [10] ALIZAI M H, LANDSIEDEL O, LINK J Á B, *et al.* Bursty traffic over bursty links[A]. Proc of ACM SenSys'09[C]. New York, NY, USA, 2009.71-85.
- [11] SRINIVASAN K, KAZANDJIEVA M A, AGARWAL S, *et al.* The β -factor: measuring wireless link burstiness[A]. Proc of ACM SenSys'08[C]. New York, NY, USA, 2008.29-42.
- [12] KIM M, NOBLE B. Mobile network estimation[A]. Proc of ACM MobiCom'01[C]. New York, NY, USA, 2001. 298-309.
- [13] FONSECA R, GNAWALI O, JAMIESON K, *et al.* Four-bit wireless link estimation[A]. Proc of ACM HotNets'07[C]. New York, NY, USA, 2007.1-6.
- [14] LAL D, MANJESHWAR A, HERRMANN F, *et al.* Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks[A]. Proc of IEEE GLOBECOM'03[C]. Piscataway, NJ, USA, 2003.446-452.
- [15] LIU T, KAMTHE A, JIANG L, *et al.* Performance evaluation of link quality estimation metrics for static multihop wireless sensor networks[A]. Proc of IEEE SECON'09[C]. Piscataway, NJ, USA, 2009. 583-591.
- [16] ZUNIGA M, KRISHNAMACHARI B. Analyzing the transitional region in low power wireless links[A]. Proc of IEEE SECON'04[C]. Piscataway, NJ, USA, 2004. 517-526.
- [17] GNAWALI O, FONSECA R, JAMIESON K, *et al.* Collection tree protocol[A]. Proc of ACM SenSys'09[C]. New York, NY, USA, 2009.1-14.
- [18] ChipCon Inc[EB/OL]. <http://www.chipcon.com>.
- [19] IEEE Standard 802.15.4[EB/OL]. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>.
- [20] Ez240v3[EB/OL].<http://www.easinet.cn/cn/index.htm>.

作者简介:



黄庭培 (1980-), 女, 土家族, 湖北建始人, 中国科学院博士生, 主要研究方向为无线传感器网络和无线自组织网络。



李栋 (1979-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 中国科学院助理研究员, 主要研究方向为无线传感器网络和无线自组织网络。



张招亮 (1982-), 男, 江西奉新人, 中国科学院博士生, 主要研究方向为无线传感器网络。



崔莉 (1962-), 女, 北京人, 博士, 中国科学院研究员、博士生导师, 主要研究方向为传感器技术和无线传感器网络。