

具有局部特性的传感网链路质量估计方法

李君伟 李士宁 张羽

(西北工业大学计算机学院 西安 710072)

摘要 重编程是实现无线传感器网络中软件更新的重要手段。传统的重编程协议性能评价方法仍然存在通过实验床和仿真平台评价其性能的优劣。目前,通过对重编程协议的软件更新过程建模并建立分析模型的性能评价方法,相对于传统的实验床和仿真平台,既能准确灵活地评价大规模部署的网络的性能,又能快速高效地给出性能分析结果,是当前重编程协议性能评价方法的新领域。然而,这一分析模型依赖于传感网链路质量的估计值。当前的传感网链路质量估计方法没有考虑到软件更新过程存在的局部特性,因而网络适应性差,无法广泛使用。提出了一种具有局部特性的网络链路质量估计方法,将软件更新过程中任一节点的局部邻居区域的链路质量期望作为这一节点的局部链路质量,能够更准确地反映软件更新过程的网络特征。使用这一具有局部特性的网络链路质量估计方法计算的估计值,将使得分析模型所计算出的重编程性能指标即完成时间与实验床运行时间的吻合度提高。将这一估计方法应用于分析模型,对线型和网格型网络的分析结果显示,分析结果与实验床的运行结果的误差低于5%。因此,与现有的估计方法相比,提出的方法在线型和网格型网络中适用性更强。

关键词 无线传感器网络,网络链路质量,局部特性,软件更新,重编程

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.12.042

Network Link Quality Estimation with Local Characteristics in WSNs

LI Jun-wei LI Shi-ning ZHANG Yu

(School of Computer Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Reprogramming (i. e. code dissemination) is one of the key technologies to enable software update in wireless sensor networks. Traditional code dissemination protocols are evaluated for performance comparisons by simulations and testbed experiments. Recently, the analytical model was proposed to characterize software update and evaluate performance of state-of-the-art code dissemination protocols because the analytical model is both lightweight and accurate for performance evaluation in large scale networks. However, the analytical model depends on estimation of network-wide link quality. The methods used to calculate network-wide link quality in previous analytical models ignore local characteristics in software update, thus the calculated network-wide link qualities are not scalable in different topologies of networks and are not accurate enough. By this observation, a novel method with local characteristics for estimation of network-wide link quality was proposed, which takes the averaged expectation of link qualities of neighborhood nodes from any node as local link quality for that node. Therefore, the proposed method can reflect network-wide software update accurately. When taking the estimated network-wide link quality of this proposed method as input for the analytical model to predict the performance of reprogramming, i. e. completion time of software update, the analytical results match that of testbed experiments with high accuracy. The prediction error of the analytical results is below 5% in linear and grid networks. Therefore, the proposed method is robust and adaptive in both linear and grid networks, compared with existing methods for estimating network-wide link quality.

Keywords Wireless sensor networks, Network link quality, Local characteristics, Software update, Reprogramming

1 引言

随着机电系统(MEMS)技术的进步,微型传感器、处理器,以及微型电池等技术得到发展。在这一背景下,无线传感器网络(传感网)应运而生,其应用领域越来越广泛,已经在精

准农业^[1]、森林监测^[2]、医疗护理^[3]等领域成功部署。传感网在发展过程中逐渐形成了一些关键技术^[4],如时间同步、定位、数据融合等,在这些关键技术的基础上可以建立多种多样的应用系统。这些应用系统在长期运行过程中不可避免地会出现软件 Bug、安全漏洞等,此时,需要通过软件更新^[5-7](重

到稿日期:2014-11-26 返修日期:2015-04-27 本文受国家科技重大专项(2012ZX03005007)资助。

李君伟(1988-),男,博士,主要研究方向为物联网/无线传感网络、重编程协议性能分析与优化等,E-mail:ljw@mail.nwpu.edu.cn;李士宁(1967-),男,博士,教授,CCF会员,主要研究方向为物联网/无线传感器网络、移动计算、网络化嵌入式系统;张羽(1975-),男,博士,副教授,CCF会员,主要研究方向为物联网/无线传感器网络。

编程)升级节点软件,保证应用系统可以持续、安全、可靠运行。重编程协议是重编程在节点软件中的实现形式。由于需要更新的软件较大,Deluge^[8]协议提出了将软件划分成一定数量的相同大小的页,这些页可以在网络中的不同区域并行传输,实现页流水(page pipelining)。在Deluge协议提出的并行传输机制上,MNP^[9]、Freshet^[10]、CORD^[11]、Rateless Deluge^[12]、SYNAPSE^[13,14]、ReXOR^[15]等协议进一步提升了软件的传输性能。

为描述重编程协议的性能,以及对比分析它们之间性能的优劣,研究人员将重编程协议在仿真平台和实验床上实现,通过实验的定量分析给出它们的性能评价结果。Deluge协议使用了TOSSIM^[16]仿真平台和实验床实验,给出了Deluge在网格型和线型网络拓扑下的性能指标结果。MNP和Freshet协议分别使用了仿真平台TOSSIM,并在不同大小的网格型网络中总结了Deluge与MNP、Freshet的性能对比结果。Rateless Deluge在16个节点组成的单跳和多跳实验床实验中给出了与Deluge的性能对比分析,同时也在TOSSIM仿真平台下给出了类似的对比结果。SYNAPSE在30个节点组成的实验床中分析了与Deluge的性能对比结果。然而,仿真平台和实验床实验具有一定的评估局限性,如传感器网络常用仿真器TOSSIM仿真非常耗时,效率低下;通用仿真器NS-2^[17]不能准确刻画重编程过程的链路特性;现有的实验床往往规模较小^[18],只有十几或者几十个节点,难以灵活部署,维护较为麻烦。

针对仿真平台和实验床在重编程协议性能评价方面的不足,研究人员最近提出了分析模型这一高效准确的评价手段。分析模型需要刻画两方面的内容:1)重编程协议的行为;2)网络的动态特征。其中,网络的动态特征即网络中各节点对之间的链路质量,以及整个网络的链路质量估计值。在基于分析模型对重编程协议的行为刻画方面,Jonathan W. Hui等人首次提出了一种可以在线型网络中评估重编程协议Deluge的分析模型^[8]。Mark D. Krasniewski等人则针对Freshet建立了一个较为简单的分析模型^[10]。董玮等人^[19,20]则将分析模型对重编程协议的行为建模扩展到MNP协议和CORD协议。在本文作者的前期工作^[21]中,进一步将分析模型扩展到对Rateless Deluge协议、SYNAPSE协议以及ReXOR协议的重编程行为建模。在对重编程协议的分析模型建模过程中,网络的链路质量估计值将直接影响分析模型的评估结果的可靠性,同时也将反映这一估计值对实际网络的链路质量估计的准确性。在前述建模过程中,Jonathan W. Hui等人在Deluge协议建模时将整个网络所有节点对的丢包率的平均值(数学期望)作为链路质量的估计值。这一平均值方法同样应用在本文作者的前期工作^[21]中。董玮等人^[19,20]在扩展分析模型时将TOSSIM仿真器的参数位错误率(Bit Error Rate, BER)转换为重编程协议中节点对接收一个数据包的接收成功率(Packet Reception Rate, PRR),并进一步为每一个节点对的PRR赋予不同的权值,然后计算出一个带权值的PRR平均值作为整个网络链路质量的估计值。然而,目前的链路质量估计方法都没有考虑到重编程过程具有的局部特性。

通过大量的实验床实验观察,我们发现任何一个发送节点在传播软件更新时,若它和周围节点之间的链路质量都好,软件更新速度就快,进而导致整个网络的重编程时间缩短;若它和周围节点之间的链路质量不均衡且有好好坏,软件更新

速度就会由较慢的那些链路的传播速度决定,进而导致整个网络的重编程时间变长。另一方面,由于不同发送节点的周围节点链路质量相互独立,因此任何一个发送节点的周围节点链路质量较差时也会导致整个网络的重编程时间变长。由以上实验发现可以看出,整个网络的软件更新是受各节点的局部节点对的链路质量影响的,表明重编程具有局部特性。通过计算全部节点对的PRR平均值的网络链路质量估计方法^[5]忽略了这一特性;这一计算方法有时会导致一个链路质量较好的网络的PRR平均值比一个链路质量较差的网络的PRR平均值小^[19,20],因而这一估计方法适用性差。通过为每一个节点对的PRR赋予一个权值的方法虽然能够避免前述PRR平均值的计算方法的缺陷,但是这一网络链路质量估计方法得出的估计值是由所占比重较大的大多数网络链路质量决定的。当网络链路质量分布不均衡时,尤其是某一个局部区域链路质量都较低时,整个网络的重编程时间必然会延长,此时网络链路质量的估计值应该较低才合适,而如果使用上述带有权值的链路质量估计方法会使得估计值偏高。基于以上实验观察和分析,当前的网络链路质量估计方法网络适应性差,本文提出一种利用局部特性的网络链路质量估计方法,使得这一估计方法在不同的网络中具有更广泛的适用性。这一方法的简单计算结果已经应用在了作者的前期工作^[22]中。

本文第1节为引言部分,介绍研究背景和论文写作动机;第2节说明相关工作;第3节给出网络链路质量估计的背景;第4节叙述本文的核心内容,即具有局部特性的网络链路质量估计方法;第5节给出网络链路质量估计方法的实验和分析结果;最后总结全文并未来工作进行展望。

2 相关工作

在传感器网络中,重编程协议是实现节点软件更新的关键手段。Deluge^[8]协议首次在重编程过程中引入流水线机制实现软件的并行传输。这一并行传输机制极大地缩短了软件的更新完成时间,然而在软件并行传输过程中却产生了严重的消息冲突。MNP^[9]在Deluge的基础上提出了一种具有贪婪特性的发送者选择算法,该算法减轻了重编程过程中的“隐藏终端”问题,一定程度上减轻了消息冲突。Freshet^[10]协议则实现了多源重编程,允许多个拥有新版本镜像文件的网关节点存在并同时重编程过程。另一方面,CORD^[11]协议则通过建立连通支配集(Connected Dominating Set, CDS)将整个网络划分成一系列的逻辑子网(subset),实现了一种基于CDS的两阶段重编程。通过在一个网络中建立若干个逻辑子网,消息冲突的发生被限制在更小的范围内,但是网络中的骨干节点的通信和计算负载将会增加。当网络链路较差时,以上协议会产生大量的重传消息,导致网络性能变差,甚至不可用。Rateless Deluge^[12]协议将网络编码的一种形式——随机线性码引入到页的传输过程,用于缓解较差的链路引起的数据包丢失的情况。然而,相对于传感器网络的节点计算能力来说,随机线性码具有较高的计算复杂度。SYNAPSE^[13,14]协议则在页的传输过程中引入LT码用于提升在数据包丢失情况下的重编程性能。LT码虽然仅利用了异或操作实现编码,但是参与异或操作的数据包需由度分布决定,同样引入了额外的计算开销。ReXOR^[15]协议与Rateless Deluge、SYNAPSE不同的是,它仅在数据包丢失后将网络编码应用在数据包的重传过程中,因而减少了大量的计算开销。

为了评价重编程协议的性能,研究人员通过仿真平台和实验床实验分析软件更新的不同性能指标。然而,仅仅通过仿真平台和实验床这两种评价手段很难完全准确地分析重编程协议的性能指标。因而研究人员提出了为重编程协议建立分析模型用于全面评价重编程协议在各种网络配置下的性能,同时也能实现不同协议之间的性能对比。Jonathan W. Hui 等人首次针对 Deluge 协议建立了适用于线性网络中的分析模型^[8]。当前,分析模型工作^[10,19-22]已经将其应用范围扩展到 Freshet、MNP、CORD、Rateless Deluge、SYNAPSE、ReXOR 等协议。

在建立分析模型的过程中,需要刻画整个网络的链路质量估计值。而整个网络的链路质量估计值是建立在单个节点链路质量估计值基础上的。描述网络中单个节点的链路质量的统计量有 RSSI(Receiver Signal Strength Indicator)、LQI(Link Quality Indicator)、PRR 等。文献^[23]认为,RSSI 统计量依赖于接收信号强度这一特性,因而容易受到环境噪声影响,其统计结果不具有普遍性;文献^[24]中通过实验结果发现均值 LQI 统计量能够反映出链路的通信质量,文献^[25]提出了一种基于 LQI 窗口均值的估计方法。通过转换可以将 RSSI 和 LQI 统计值对应到 PRR 这一链路质量统计量,进而能够更加直观地反映数据包的接收/丢失情况。与以上单个节点的链路质量估计方法不同,本文的网络链路质量估计方法是在他们工作的基础上,已知单个节点的链路质量估计值,建立整个网络中所有节点的链路质量的估计值。

文献^[8]针对线型网络中的所有节点,将全部节点的链路质量取平均值,从而建立整个网络的链路质量估计值。文献^[19,20]发现上述链路质量估计方法在网络中存在大量中等链路质量的链路时得出的估计值不能够反映实际情况,因而提出一种带权值的链路质量估计方法。本文提出了一种利用局部特性的链路质量估计方法,将重编程过程的局部特性引入到节点的邻居域链路质量估计值中。

3 分析模型背景

在介绍重编程的局部特性之前,先给出网络链路质量估计的背景知识:分析模型。在前期工作^[21,22]中,作者建立了针对基于网络编码的重编程协议的分析模型,用于计算整个网络的重编程完成时间 T ,如图 1 所示。

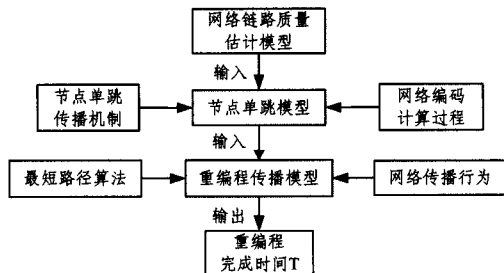


图 1 分析模型结构

在图 1 中,重编程传播模型的输出为完成时间 T 。重编程传播模型刻画了重编程协议的网络传播行为,并由 Dijkstra 最短路径算法根据网络拓扑特征以及节点单跳模型作为输入来计算传播路径。节点单跳模型刻画重编程在单个节点上的计算和通信过程,包括重编程的节点单跳传播机制和网络编码计算过程。节点单跳传播机制需要网络链路质量估计模型作为输入才能计算单跳节点模型的总时间。网络链路质量估

计模型正是本文的研究内容,即具有局部特性的网络链路质量估计方法。

4 具有局部特性的链路质量估计方法

4.1 重编程的局部特性

本文通过线型网络和网格型网络说明重编程过程具有的局部特性。

图 2 所示为一个典型的线型网络,其中软件更新由节点 a 发起,向节点 f 的方向传播。节点对 (a,b) 的链路质量 PRR 为 0.8,节点对 (b,c) 的 PRR 为 0.9,节点对 (c,d) 的 PRR 为 0.6,节点对 (d,e) 的 PRR 为 0.8,节点对 (e,f) 的 PRR 为 0.9。任意一个节点对之间的软件更新速度由其各自的 PRR 决定,而节点对 (c,d) 之间 PRR 较低。软件更新尽管从节点 a 到 c 较快,但仍会被节点对 (c,d) 的 PRR 所拖延,因而估计整个网络的链路质量时这种局部特性需要考虑。

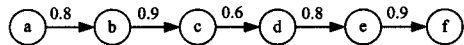


图 2 线型网络

若采用平均值法估计整个网络的链路质量,则各个节点对之间的 PRR 对软件更新的影响均等地体现在计算的平均值上。然而,若采用带权值的平均值法估计整个网络的链路质量,因为具有较高的 PRR($PRR \geq 0.8$)的节点对较多,所以节点对 (c,d) 的 PRR 的影响将被降低,导致整个网络的链路质量被高估(相对于平均值法来说)。而本文提出的具有局部特性的估计方法当仅考虑 1 跳范围内的邻居区域时,所计算的估计值与平均值法相同。

在图 3 的网格型网络中,节点 0 的局部区域节点对 $(0,1)$, $(0,6)$ 和 $(0,7)$ 的 PRR 分别为 0.7, 0.9 和 0.8,因而节点 0 的局部区域中的软件更新会由链路质量较差的节点对 $(0,1)$ 决定。另外,节点 0 的局部区域的软件更新相对于节点 4 或者节点 20 的局部节点对来说,也是在估计整个网络的链路质量时需要考虑的局部特性。在图 3 中,如果节点 0 的软件更新能够直接传播到节点 2, 8, 12, 13, 14, 则节点 0 的局部节点对的数量也相应增加。

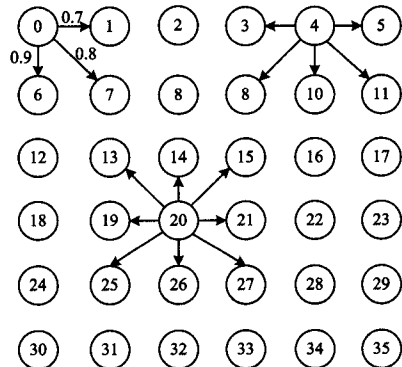


图 3 网格型网络

如图 3 所示,当网络中的节点对较多且具有中等链路质量的节点对的比重较大时,平均值法^[8]的计算值将由这些链路质量决定,有时会导致一个“较好”的网络的网络链路质量计算值比一个“较差”的网络的计算值高,因而不符合实际^[19,20]。其中,“较好”和“较差”分别对应于在一个相同拓扑的网络中节点间距的较小和较大。由此,带权值的平均值法将这些中等链路质量的节点对再由高到低划分层次,使那些

较高链路质量的节点对具有较高的权重,因而使得计算的链路质量估计值更符合实际(相对于平均值法来说)。本文的计算方法则考虑局部特性,通过为任意一个节点计算其局部链路质量,使得任何一个节点的局部邻居区域(n 跳范围)对软件更新的影响体现在该节点的局部链路质量上,如果该节点的局部邻居节点对的链路质量较好,则局部链路质量就好,反之亦然。由此,本文方法和带权重的平均值法的结果相同,避免了平均值法的缺陷。本文方法的灵活性则体现在对邻居区域的选择即跳数的确定上。

4.2 网络链路质量估计方法

以一般情况下的网格型网络作为示例,如图3所示,网络中有 L 个节点,对于任意一个节点 u ,其周围节点数量是 $N(u)$,分别为 $k_1, k_2, \dots, k_{N(u)}$ 。节点 u 周围的节点对 (u, k_j) 的链路质量PRR为 $p(u, k_j)$,并满足 $j \in [1, N(u)]$, $p(u, k_j) \in [0, 1]$ 。据此,节点 u 的周围节点对的链路质量可以估计为各节点对链路质量的平均值,记为 $p(u)$,且有

$$p(u) = \frac{\sum_{j=1}^{N(u)} p(u, k_j)}{N(u)} \quad (1)$$

整个网络的链路质量估计值为所有局部节点对链路质量估计值的平均值,记为 P ,且有

$$P = \frac{\sum_{u=1}^L p(u)}{L} \quad (2)$$

同时,可以计算这些局部节点对的链路质量估计值的均方差:

$$D_s(P) = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^L (p(u) - P)^2}{L}} \quad (3)$$

均方差 $D_s(P)$ 用于说明整个网络的链路质量估计值的波动范围,并给出估计值的上限和下限。均方差 $D_s(P)$ 的作用在于确定跳数的选择。令均方差的上限为 D_{\max} ,下限为 D_{\min} 。若当前选择的跳数所计算的均方差 $D_s(P) \leq D_{\min}$ 或者 $D_s(P) \geq D_{\max}$,则增加跳数,直到满足预设条件。

下面计算一般情况下节点 u 的周围节点数 $N(u)$ 。在网格型网络中,如图3所示,假设发送节点的软件更新可以传播 h 跳的距离(物理距离)。对于 $h \geq 1$ 的情况,当 u 是顶点时,其周围节点数量为 $C_h(u) = h(h+2)$;当 u 是边缘节点时,其周围节点数量为 $S_h(u) = h(2h+3)$;当 u 是内部节点时,其周围节点数量为 $I_h(u) = 4h(h+1)$ 。当 $h=0$ 时,节点 u 的周围节点数为1,即其自身,有 $C_h(u) = S_h(u) = I_h(u) = 1$ 。构造一个函数 $\varphi(h)$,使得

$$\varphi(h) = \begin{cases} 1, & h=0 \\ 0, & h \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

由上述计算过程可知,节点 u 的周围节点数 $N(u)$ 是与跳数相关的,记为 $N_h(u)$,且有

$$N_h(u) = \begin{cases} (1-\varphi(h))C_h(u) + \varphi(h), & u \text{ 在顶点} \\ (1-\varphi(h))S_h(u) + \varphi(h), & u \text{ 在边缘} \\ (1-\varphi(h))I_h(u) + \varphi(h), & u \text{ 在内部} \end{cases} \quad (5)$$

在线型网络中,如图2所示,有

$$N_h(u) = \begin{cases} h, & h \geq 1 \\ 1, & h = 0 \end{cases} \quad (6)$$

在图2中,节点 a 的1跳周围节点数为1,是节点 b ;其2跳周围节点数是2,为节点 $\{b, c\}$ 。在图3中,对于节点0,由于它是顶点节点,其0跳的周围节点数为1,是其自身;其1

跳的周围节点数为3,是节点 $\{1, 6, 7\}$;其2跳的周围节点数为8,是节点 $\{1, 2, 6, 7, 8, 12, 13, 14\}$ 。对于节点4,由于它是边缘节点,其1跳的周围节点数为5,是节点 $\{3, 5, 9, 10, 11\}$ 。在网格型网络中,当一个节点的跳数较大时,比如最外围节点已到达网络边缘,其周围节点数的增加值会发生变化,可以是当 h 取不同值时 $C_h(u)$, $S_h(u)$ 和 $I_h(u)$ 三者的叠加,因此在实现本文提出的链路质量估计方法时,如果需要计算节点较大跳数情况下的周围节点数,则需要判断最外围节点是否到达网络边缘。另外,如果在计算周围节点数 $N_h(u)$ 时需要添加约束条件,如删除PRR低于某一阈值的节点对,则有

$$N_h'(u) = N_h(u) - D_h(u) \quad (7)$$

其中, $N_h'(u)$ 表示更新后的节点 u 的周围节点数, $D_h(u)$ 表示PRR低于某一阈值 p_T 的节点对数量,且有

$$D_h(u) = \sum_{p(u, k_j) < p_T} p(u, k_j) \quad (8)$$

经过如上过程,即可计算出网络链路质量的估计值,完整的计算过程如算法1所示。其中,二维数组 $PRR[L][L]$ 表示网络中 L 个节点中任意两个节点之间的链路质量估计值,输出为 P ,表示网络链路质量估计值。

算法1 具有局部特性的网络链路质量估计

输入: $PRR[L][L]$

输出: P

0. 选择跳数 $h = 0$;

1. 对任意一个节点 u ,计算 $D_h(u) = \sum_{p(u, k_j) < p_T} p(u, k_j)$;

2. 计算节点 u 的邻居节点数目 $N_h(u)$;

3. 得出 $N_h'(u) = N_h(u) - D_h(u)$;

4. 则节点 u 的 h 跳邻居数目为 $N(u) = N_h'(u)$;

5. 节点 u 的局部链路质量为 $p(u) = \frac{\sum_{j=1}^{N(u)} p(u, k_j)}{N(u)}$;

6. 则 $P = \frac{\sum_{u=1}^L p(u)}{L}$;

7. 计算均方差 $D_s(P) = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^L (p(u) - P)^2}{L}}$;

8. 如果 $D_s(P) \leq D_{\min}$ 或者 $D_s(P) \geq D_{\max}$, 增加跳数 h , 执行步骤1;

9. 算法结束。

5 实验与分析

通过实验床实验观察本文提出的重编程的局部特性,然后计算具有局部特性的网络链路质量。为了说明本方法的有效性,将在局部特性实验基础上分别给出重编程的实验床实验结果以及应用了具有局部特性的网络链路质量估计值的分析模型的分析结果。

5.1 局部特性观察

实验床中使用了两种节点:MicaZ和TelosB。MicaZ配备有Atmel ATmega128L微处理器, TelosB配备有TI MSP430微处理器,二者都配置了Flash存储、CC2420无线收发器和两个AA电池。为了获取任意两个节点间的链路质量,让每一个节点轮流发送200个数据包,每一轮每个节点发送数据的总时间相同。实验中,为了准确控制发送顺序和每一轮周期,额外使用了一个节点作为控制节点,专门负责每隔固定的时间广播一条控制消息,每一次的控制消息中包含下一轮的发送节点、发送的数据包数量。当一个节点发送完数据包后,所有节点收到控制消息时统计当前已经收到的任意一个节点发送的数据包总量,并存储到微处理器的EEPROM

中,实验结束后,由 PC 收集这些统计数据。实验的源代码采用 nesC 语言编写,节点运行 TinyOS 操作系统。

实验床由 16 个节点布置成 4×4 的网格型网络,节点编号从左到右、从上到下依次为 1 到 16。所有节点使用 13 号信道,控制 CC2420 射频输出功率的寄存器 TXCTRL_PA_LEVEL 值为 2,统计结果如图 4 和图 5 所示。图 4 的网络中节点为 MicaZ,所有节点 RSSI 区间为 $(-90, -84)$ dBm。图 5 的网络中节点为 TelosB,所有节点 RSSI 区间为 $(-91, -79)$ dBm。在统计结果中,发送节点和接收节点相同时其统计值被设置为 0,以区别于正常情况。

在图 4 中,当节点 1(顶点节点)发送数据包时,节点 2,5,6 收到并统计,可以看出,节点对(1,2)及(1,6)的链路质量好于(1,5),且都是其 1 跳的周围节点,并有 $C_1(1)=3$ 。节点 3(边缘节点)发送数据包时,节点 2,4,6,7,8 收到并统计,且都是其 1 跳周围节点,并有 $C_1(3)=5$ 。

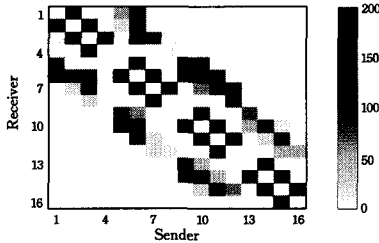


图 4 MicaZ 节点间数据包接收统计

在图 5 中,节点 1(顶点节点)发送数据包时,节点 2,3,5,7,9,10,15 收到并统计,且是其 2 跳的周围节点(除去节点 15),并有 $C_2(1)=6$,2 跳范围内的节点对(1,6)和(1,11)链路质量较差。

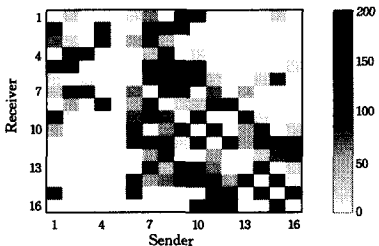


图 5 TelosB 节点间数据包接收统计

5.2 实验床与分析模型结果

在考虑局部性这一特点之后,计算的链路质量估计值可以代入分析模型^[21,22],通过对比实验床实验结果和分析模型结果观察估计值的适用性。同时,在不同的网络条件下,利用已有研究工作的方法给出了链路质量估计值的计算结果,与本文提出的具有局部特性的链路质量估计方法做了充分的对比。

我们选择了两种类型的实验床,分别是线型和网格型。首先观察局部特性是否能够适用于较长时间运行、较短时间运行的情形。在 4×4 网格型网络中,节点间 RSSI 的区间为 $(-87, -82)$ dBm,实验床运行结果与分析模型结果的对比即完成时间(Completion Time)的对比结果如图 6 所示。在 4×4 网格型网络中,节点间 RSSI 的区间为 $(-91, -79)$ dBm,实验床运行结果与分析模型结果的对比即完成时间(Completion Time)的对比结果如表 1 所列。在 9×2 线型网络^[22]中,节点的间距有两种,其节点间 RSSI 的区间分别为 $(-67,$

$-65)$ dBm 和 $(-93, -84)$ dBm,实验床运行结果与分析模型结果的对比如表 2 所列。实验中 3 个不同大小的软件需要更新(Software to Update),运行时间长短随着软件大小的增大而增长,Blink 大小为 2102 字节,Oscilloscope 大小为 12340 字节,GoldenImage 大小为 31346 字节。

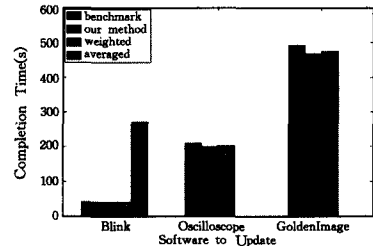


图 6 网格型网络实验床与分析模型完成时间的对比,节点间 RSSI 的区间为 $(-87, -82)$ dBm

在图 6 中,通过对比实验床和分析模型发现,代入具有局部特性的网络链路质量估计值后,在不同的软件大小条件下,分析模型计算的运行时间(图中“our method”)与实验床的运行时间(图中“benchmark”)吻合,且误差低于 5%。同时,代入平均值法的分析模型结果(图中“averaged”)与实验床结果的差距明显,而且在软件大小增加时更加恶化(因数值太大,故图中未标出),因而平均值法在这一网络条件下不适用;代入带权值的平均值法的分析模型结果(图中“weighted”)和实验床结果的吻合度与本文方法一致。这一结果说明具有局部特性的网络链路质量计算方法稳定性较好,在软件大小变化时仍能准确给出分析结果,虽然无线网络中的节点对链路质量是时变的^[26],但是这一方法仍然能够适用。

表 1 网格型网络实验床与分析模型完成时间的对比,节点间 RSSI 的区间为 $(-91, -79)$ dBm

网络类型	完成时间(s)			
	实验床	本文方法	平均值法	带权值平均值法
4×4 网格型	1182.0	1176.0	468.24	180.70

在表 1 所列的网格型网络中,当更新 Blink 时,代入本文方法的分析模型计算的运行时间与实验床的运行时间吻合,误差约为 0.5%。相对于本文方法的准确性,代入平均值法和带权值平均值法的分析模型计算的运行时间与实验床的运行时间较为悬殊,说明这两种方法均无法适用于这一网络。与图 6 中的网络类型相比,这一网络类型中节点对的链路质量变化范围较大,容易出现较多的中等链路和某个局部邻域区域出现的较差链路,导致带权值的平均值法适应性差。

表 2 线型网络实验床与分析模型完成时间的对比(Blink)

网络类型	完成时间(s)			
	实验床	本文方法	平均值法	带权值平均值法
9×2 线型	172.710	200.602	326.755	168.959

在表 2 中,当更新 Blink 时,代入本文方法的分析模型计算的运行时间与实验床的运行时间也同样吻合,误差比网格型网络略大,这是因为这一网络部署在实验室长廊的天花板上,人员来回走动,而且天花板上有多个 WiFi 热点在工作,所以存在干扰。

上述结果对比说明了本文提出的计算链路质量估计值的方法的准确性,下面将本文提出的方法与已有研究工作做对比,分别计算各个网络的链路质量估计值,计算结果如表 3 所列。

表3 多种链路质量估计值计算方法在不同网络中的结果对比

网络类型	RSSI 区间 (dBm)	网络链路质量估计值		
		本文方法	平均值方法	带权重的平均值方法
4×4 网格	(-87, -82)	0.8960	0.4193	0.8745
4×4 网格	(-90, -84)	0.5246	0.1866	0.8502
4×4 网格	(-91, -79)	0.5593	0.2631	0.7440
9×2 线型	(-67, -65), (-93, -84)	0.6495	0.3797	0.7903

将本文方法计算的链路质量估计值代入分析模型中,其计算的软件更新完成时间与实验床运行时间较为吻合。在表3中,平均值方法将所有链路的链路质量都考虑在内,由于存在大量不具有局部特性的链路,而且采用这些链路质量较差又对整个网络的软件更新影响较小,导致计算的链路质量估计值偏低,如在4×4网格型网络中,RSSI区间为(-90,-84)dBm和(-91,-79)dBm时,平均值方法^[8]计算的估计值严重偏离本文方法计算的估计值。带权重的平均值方法^[19,20]由于能够为具有中等链路质量的链路赋予较高的权值,提高了整体的估计值,在网络状况好的情况下,与本文方法计算的估计值较为接近,如4×4网格型网络中RSSI区间为(-87,-82)dBm的情形。但是带权值的平均值法不能够反映网络中容易出现的某一局部邻居区域存在较差链路的情况,如4×4网格型网络中RSSI区间为(-91,-79)dBm的情形。另外,在较差的网络中,同样存在大量具有中等状况链路质量的链路,导致采用这一方法计算的估计值都偏高。带权重的平均值方法虽然在仿真环境下能够较好地计算出网络链路质量估计值,但是在实验床环境下其表现较差。由以上实验结果可以看出,与已有的研究成果相比,本文提出的方法适用性最好。

结束语 本文提出了一种利用局部特性计算链路质量估计值的方法。与已有的研究相比,我们考虑了软件更新具有的局部特性,在计算链路质量估计值时,考虑的重点是任一节点周围的节点对链路质量对整个网络的影响。通过实验床实验与分析模型的结果对比,说明本文提出的方法要优于已有的平均值方法以及带权重的平均值方法,计算的估计值能够更为准确地刻画网络的链路质量,因而适用性强。在后续的工作中,将考虑本文提出的方法在网络随机部署或者均匀部署时的适用性。

参考文献

[1] Jao J, Sun Bo, Wu Kui. A Prototype Wireless Sensor Network for Precision Agriculture[C]//Proceedings of IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW). 2013;280-285

[2] Liu Yun-hao, He Yuan, Li Mo, et al. Does Wireless Sensor Network Scale? A Measurement Study on GreenOrbs[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 2013,24(10):1983-1993

[3] Zhang Jing-jing, Wang Rui, Lu Shi-long, et al. EasiCPRS: Design and Implementation of a Portable Chinese Pulse-wave Retrieval System[C]//Proceedings of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). 2011;149-161

[4] 李士宁,等. 传感网原理与技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2014
Li Shi-ning, et al. Sensor Networks: Principles and Technologies [M]. Beijing: China Machine Press, 2014

[5] Wang Qiang, Zhu Yao-yao, Cheng Liang. Reprogramming wireless sensor networks: challenges and approaches[J]. IEEE Network, 2006,20(3):48-55

[6] 张羽,蒋泽军,周兴社. 无线传感器网络重编程技术研究[J]. 计算机科学,2008,35(5):66-68
Zhang Yu, Jiang Ze-jun, Zhou Xing-she. Reprogramming in Wireless Sensor Networks[J]. Computer Science, 2008,35(5):66-68

[7] Zhao Zhi-wei, Dong Wei, Bu Jia-jun, et al. Exploiting link correlation for core-based dissemination in wireless sensor networks [C]//Proceedings of Eleventh Annual IEEE International Sensing, Communication, and Networking (SECON). 2014;372-380

[8] Hui Jonathan W, Culler D. The Dynamic Behavior of a Data Dissemination Protocol for Network Programming at Scale[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). 2004;81-94

[9] Kulkarni S, Wang Li-min. Energy-efficient Multihop Reprogramming for Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2009,5(2):777-781

[10] Krasniewski M D, Panta R K, Bagchi S, et al. Energy-efficient on-demand reprogramming of large-scale sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2008,4(1):700-705

[11] Huang Lei-jun, Setia S. CORD: Energy-Efficient Reliable Bulk Data Dissemination in Sensor Networks[C]//Proceedings of IEEE 27th Conference on Computer Communications (INFOCOM). 2008;1247-1255

[12] Hagedorn A, Starobinski D, Trachtenberg A. Rateless Deluge: Over-the-Air Programming of Wireless Sensor Networks Using Random Linear Codes[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). 2008;457-466

[13] Rossi M, Zanca G, Stabellini L, et al. SYNAPSE: A Network Reprogramming Protocol for Wireless Sensor Networks using Fountain Codes[C]//Proceedings of 5th Annual IEEE International Sensing, Communication, and Networking (SECON). 2008;188-196

[14] Rossi M, Bui N, Zanca G, et al. SYNAPSE++: Code Dissemination in Wireless Sensor Networks Using Fountain Codes[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC), 2010,9(12):1749-1765

[15] Dong Wei, Chen Chun, Liu Xue, et al. A Lightweight and Density-Aware Reprogramming Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC), 2011,10(10):1403-1415

[16] Philip L, Nelson L, Matt W, et al. TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). 2003;126-137

[17] The Network Simulator (ns-2) [OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

[18] Doddavenkatappa M, Chan M C, Ananda A L, Indriya; A Low-Cost, 3D Wireless Sensor Network Testbed[C]//Proceedings of Tridentcom. 2011;302-316

[19] Dong Wei, Chen Chun, Liu Xue, et al. Performance of bulk data dissemination in wireless sensor networks[C]//Proceedings of Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). 2009;356-369

3)直接解算算法在定位精度上稍逊于LS算法,因为无需迭代解算过程,其比LS稳定。

结束语 本文充分考虑多星座可见星数目较多的有利条件,以GPS/GLONASS/COMPASS系统为例,提出一种适用于多星座的直接解算算法,并就“3+2+2”以及“3+3+2”形式的直接解算进行了详细的推导和证明,同时推导出9颗及以上可见星时充分利用冗余观测测量将非线性方程线性化的直接解算方法。通过仿真实验和数据分析将本文提出的直接解算算法与LS算法进行了比较,结果表明本算法的定位精度与LS算法相当,并且由于本文提出的直接解算算法不需要预先假设接收机初始坐标,避免了LS算法的线性迭代过程,因此其计算量远小于LS算法。所以本文提出的多星座直接解算算法是有效可行的。

参 考 文 献

- [1] 常强,侯洪涛,曾祥辉,等. GNSS合作定位研究综述[J]. 宇航学报,2014,35(1):13-20
Chang Qiang, Hou Hong-tao, Zeng Xiang-hui, et al. A Survey of GNSS based Cooperative Positioning [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(1): 13-20
- [2] 张智,周桂贤. 一种农机车载GPS的准确定位算法的仿真研究[J]. 计算机科学,2012,39(12):216-219
Zhang Zhi, Zhou Gui-xian. Farm Machinery on-board GPS Location Accuracy Simulation and Research[J]. Computer Science, 2012, 39(12): 216-219
- [3] 郑春锋,徐扬. 一种基于方位角和网络拓扑的定位算法及应用[J]. 计算机科学,2014,42(6A):273-275
Zheng Chun-feng, Xu Yang. Localization Algorithm Based on Azimuth Angle and Network Topology[J]. Computer Science, 2014, 42(6A): 273-275
- [4] 杨迪. GNSS多星座组合导航关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012
Yang Di. Research on key technologies of GNSS Multi-constellation Integrated Navigation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012
- [5] 张利,袁本银. GNSS多星座导航定位算法研究与实现[J]. 测

- 绘,2012(5):195-197
Zhang Li, Yuan Ben-yin. Algorithm Research and Implementation of GNSS Multi-Constellation Navigation Positioning [J]. Surveying and Mapping of Sichuan, 2012(5): 195-197
- [6] Teng Y L, Wang J. New characteristics of geometric dilution of precision (GDOP) for multi-GNSS constellations[J]. Journal of Navigation, 2014, 67(6): 1018-1028
- [7] Martini I, Rippl M, Meurer M. Advanced RAIM architecture design and user algorithm performance in a real GPS, GLONASS and Galileo scenario[C]//Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville, Tennessee, 2013: 2624-2636
- [8] Wellenhof H, Wasl L. GNSS—Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2009: 1-10
- [9] Liu B, Tan Y K, Dempster A G. Using two global positioning system satellites to improve wireless fidelity positioning accuracy in urban canyons [J]. IET Communications, 2011, 5(2): 163-171
- [10] John B, Lundhber G. Alternative algorithms for the GPS static positioning solution [J]. Applied Mathematics and Computation, 2001(119): 21-34
- [11] 张强,刘红雨,汪大宝. 双系统卫星接收机定位方程直接解算方法研究[J]. 系统仿真学报,2014,26(1)
Zhang Qiang, Liu Hong-yu, Wang Da-bao. Study of Position Equation Direct Solving Method in Double Mode Satellite Receivers[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(1)
- [12] Yu X L, Sun Y R, Liu J Y, et al. Multiple satellite integrated navigation system based on self-adaptive soft-switch technology [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4): 1435-1442
- [13] Li X, Wu M P, Zhang K D, et al. High accuracy acceleration determination by using multiple GNSS reference stations [J]. Measurement, 2013, 46(4): 1607-1615
- [14] Zhang Miao-yan, Zhang Jun. A fast satellite selection algorithm beyond four satellites [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(5): 740-747
- [15] Yan Q. Numerical analysis (Third Edition) [M]. Beijing: Beihang Press, 2006

(上接第200页)

- [20] Dong Wei, Chen Chun, Liu Xue, et al. Bulk data dissemination in wireless sensor networks: Modeling and analysis[J]. Computer Networks, 2012, 56(11): 2664-2676
- [21] Li Jun-wei, Li Shi-ning, Zhang Yu, et al. Analytical model of coding-based reprogramming protocols in lossy wireless sensor networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013: 1867-1871
- [22] Li Jun-wei, Li Shi-ning, Zhang Yu, et al. Analytical Model of coding-Based Reprogramming Protocols in Lossy Wireless Sensor Networks[C]//2013 IEEE International Conference on Communications(ICC), 2013: 1867-1871
- [23] 舒坚,刘琳岚,樊磊磊,等. 无感知分组丢失下的无线传感器网络链路质量评估模型[J]. 通信学报,2011,32(4):103-111
Shu Jian, Liu Lin-lan, Fan You-lei, et al. Link quality estimation model for wireless sensor networks under non-perceived packet loss[J]. Journal on Communications, 2011, 32(4): 103-111

- [24] 张希元,赵海,朱剑,等. 基于LQI的链路评估算法及其在WSN中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版),2008,29(12):1693-1696
Zhang Xi-yuan, Zhao Hai, Zhu Jian, et al. LQI based link evaluation algorithm and its application in wireless sensor networks [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008, 29(12): 1693-1696
- [25] 段磊,刘琳岚,湛业滨. 基于窗口均值的WSNs链路质量评估方法[J]. 南昌大学学报(理科版),2011,35(5):495-499
Duan Lei, Liu Lin-lan, Chen Ye-bin. Link quality estimation method for WSNs based on window mean[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2011, 35(5): 495-499
- [26] Umit B C, Ergen S C. Spatio-temporal characteristics of link quality in wireless sensor networks[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012: 1152-1157