

综 述

doi: 10.3969/j.issn.1673-5692.2016.03.005

## 无线链路质量评估及预测方法综述

翁丽娜, 刘轶铭, 刘 磊, 王兆伟

(中国电子科学研究院 北京 100041)

**摘 要:** 在无线通信系统中, 对无线链路质量进行有效评估和预测是辅助高层协议设计、保障网络性能的基础。然而, 节点移动、多径衰落、噪声和干扰等因素导致无线链路动态变化, 尤其在复杂网络环境下, 实时、准确的链路质量评估和预测面临巨大挑战, 吸引国内外众多学者对此展开深入研究。本文对现有链路质量评估和预测方法进行全面的调研, 对设计思路和建模方法进行分析归类, 探讨其优缺点和适用性。从应用需求角度, 凝练未来链路质量评估与预测领域的发展趋势。

**关键词:** 无线链路特性; 链路质量评估; 链路质量预测

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1673-5692(2016)03-239-06

## Wireless Link Quality Estimation and Prediction: A Survey

WENG Li-na, LIU Yi-ming, LIU Lei, WANG Zhao-wei

(China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

**Abstract:** In wireless communication system, link quality estimation and prediction has a fundamental impact on the network performance and affects as well the design of higher layer protocols. However, it is well known that mobility, multi-path propagation, noise, interference and other unpredictable factors lead to link unreliability. Accurate link quality estimation and prediction are still a difficult task in the complex wireless environments. Therefore, it has been attracting a vast array of research works since ten years. This paper provides a comprehensive survey on representative works, covering modeling methods, merits and limitations. The last part presents the future development trends from the perspective of application.

**Key words:** wireless link characteristics; link quality estimation; link quality prediction

## 0 引 言

在无线通信系统中, 对无线链路质量进行有效评估和预测是辅助高层协议设计、保障网络性能的基础。传统链路质量估计与预测的应用包括辅助路由决策、网络切换、速率自适应等。随着异构网络互联需求的深入, 链路质量评估和预测成为支持不同网络间协作的关键技术之一。例如, 垂直切换是泛在、异构的移动性管理技术中的重要控制功能, 通过

预测链路质量变化趋势, 指导切换决策在合适的时机切换到正确的网络, 链路质量评估和预测的准确性和实时性将直接影响异构网络端到端 QoS 保障能力。不同网络场景, 甚至同一网络场景的不同时刻对链路质量信息的需求是不同的, 链路质量评估与预测既需要在准确性、反应速度、稳定性、能源使用效率、信令开销等指标之间进行权衡和折衷, 又需要根据不同应用需求进行灵活应变, 这为链路质量建模带来严峻挑战。国内外学者在无线网络链路质量方面进行了大量的研究, 本文在分析无线链路的

收稿日期: 2016-03-10      修订日期: 2016-05-10

基金项目: 2016 年国家自然科学基金: 高动态方向性多跳自组网传输调度理论研究(61501415)

固有特性基础上,对现有链路质量评估和预测方法进行全面的深入的调研,对各类方法的设计思路和建模方法进行分析归类,探讨其优缺点和适用性。最后凝练该领域发展趋势。

## 1 无线链路特性

了解无线链路特性是建立链路质量模型的基础。现有研究通常从空间特性、时间特性、非对称性和干扰特性四个方面揭示无线链路的变化规律,空间和时间特性是无线链路最根本特征,下面进行深入分析。

### (1) 无线链路的空间特性

早期研究无线链路划分为好(连通)和坏(中断)两个等级,文献[1]指出了这种二进制划分方法的局限性,并提出数据传输的各向异性特征。文献[2]进一步将链路划分为三个区域:连通区域,链路具有高质量、高稳定性和对称性;过渡区域(或称为灰区),与中等链路对应,链路质量波动较大,且与距离无关,大多不对称;非连通区域:该区域的链路质量较差,无法进行数据通信。链路过渡区域的提出在链路质量评估和预测领域具有重要意义,但因其波动性较大,评估和预测有很大难度。很多研究利用实验数据揭示该区域链路的波动特征。以分组接收率(PRR, Packet Reception Ratio)作为度量,文献[2]研究表明中间链路比例为35%至50%之间,而文献[3]采用了较为先进的无线设备,其结果为6%至60%之间,这说明不同实验设备和场景对中间链路判别有较大影响。

斯坦福大学获得MobiCom2010年度最佳论文奖的研究表明,地理位置接近的节点之间,无线链路分组接收间具有较高的空间相关性,并提出因子 $k$ 量化该特征,并进一步利用因子 $k$ 揭示机会式路由和机会式网络编码协议性能波动的时间特征及原因,这项研究对机会式协议研究领域研究具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。文献[7]将链路相关性出现的原因归结为不同通信技术间干扰(CTI, Cross-Technology Interference)和相关阴影衰落(Correlated Shadowing),指出使用分组是否成功接收进行链路相关性建模不够精细,提出利用粒度更细、携带信息更丰富的信干噪比(SINR, Signal to Interference plus Noise Ratio)捕捉链路相关性,以机器学习中的逻辑回归方法构建链路相关性模型,并将其应用于机会式路由和网络编码中,实验表明分别可以节省25%和15%的

能耗。

### (2) 无线链路的时间特性

多项研究表明在连通和非连通区域,链路质量随时间变化不大,且趋于稳定<sup>[8]</sup>。针对无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Network)的实测研究表明中间链路的数量占长期稳定链路的一半以上,它的一个典型特征为突发性(bursty),其短期波动粒度为亚秒级<sup>[9]</sup>。更进一步地,文献[4]研究了不同分组间隔(IPI, Inter-packet-interval)下,所有链路上PRR的分布。实验结果表明随着IPI的增大,中间链路的数量也随之增加。

中间链路突发性特征的提出,促使对无线链路可用性的理解从连续可用向离散可用转变,启发了学者从小时间尺度解析链路质量,极大地推动了学术界和业界对于中间链路的关注与探索:如何准确、快速识别和预测无线链路质量短期变化,对无线链路变化迅速作出反应,从而显著提升网络性能。

## 2 无线链路质量评估及预测方法

无线链路质量可以从多个角度反映,根据获取方法的不同可以将其分为:硬度量、软度量和混合度量。硬度量是指当节点收到分组时,物理层测量获得的无线参数,包括:接收信号强度(RSSI, Radio Signal Strength Indicator)、信噪比(SNR, Signal to Noise Ratio)、链路质量指示(LQI, Link Quality Indicator)等。软度量则使用数据链路层分组接收和重传的统计情况评估链路质量。经典硬度量、软度量和混合度量是建立复杂链路质量模型的基础,典型链路质量评估及预测方法归类如图1所示。

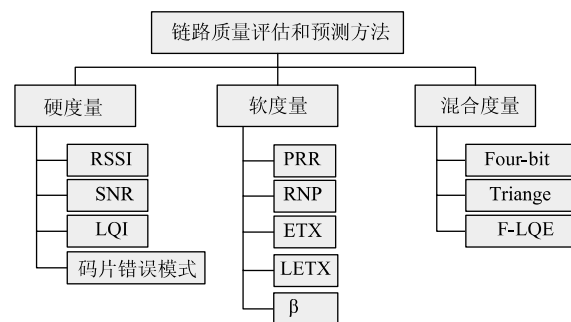


图1 链路质量评估和预测方法分类

### 2.1 经典硬度量、软度量和混合度量

由于物理层参数是对无线信号传输最直接反映,具有开销小、敏感度高的优点,在实际网络应用

中获得了广泛应用。例如,无线局域网以 RSSI 作为速率自适应的标准。文献[3]指出当 LQI 非常高时,可以用来识别高质量链路。然而,对于中间链路,仅使用 LQI 很难判定链路质量。可以通过收集一定数量的 LQI 值取其均值或者应用指数加权平均方法(EWMA, Exponential Weighted Moving Average),但会牺牲 LQI 的敏感性,并且窗口的取值很难确定。

经典硬度量存在以下问题: 1) 硬度量参数是基于接收分组前几个符号位测量的,而非整个分组; 2) 无线链路存在丢包和延迟,底层硬件驱动只有当有分组接收时才测量这些参数,如果对丢包或延迟严重的采样值处理不当,必将影响链路质量判断的准确性; 3) 物理层参数容易受噪声、多径衰落和干扰等影响。尽管硬度量存在诸多缺陷,曾面临过较大争议,但一项著名研究表明 RSSI 作为链路度量的潜力尚未充分挖掘,关键是建立模型时如何克服其固有缺陷<sup>[10]</sup>。特别值得关注的是,尽管问题 2) 很早即被发现,但长期以来硬度量仍旧以成功接收分组的信号强度作为原始信息进行采集和处理,直到近几年有学者提出将信息采集细化到物理层信号解码阶段。文献[11]提出一种很具创新性和启发性的链路质量评估方法,与经典硬度量相反,该方法认为无法成功解码(丢包)所携带的链路信息非常丰富。通过在直接序列扩频系统上,分析同步阶段前导码符号的码片错误模式,对 PDR(Packet Delivery Ratio)进行快速评估。瞬时 PDR 计算公式如下:

$$PDR_{inst}(k) = g\left(\frac{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{|S_k|} (P_{kj}[i] \oplus P[i])}{|S_k|}\right) \quad (1)$$

其中  $P_{kj}[i]$  是分组  $k$  第  $j$  个接收到的前导符号的 32 个码片矢量,  $P[i]$  是正确接收的码片矢量,  $|S_k|$  是接收的分组的前导符号数,  $g(\cdot)$  是通过实验测量拟合的 PDR 和单位前导符号码片错误的映射方程。

典型的软度量包括 PRR、RNP(Required Number of Packet Transmissions) 和 ETX(Expected Transmission Time) 等<sup>[12,13]</sup>。同样地,软度量也存在波动特征,很多早期研究利用 EWMA 方法获得平滑值。软度量优点是与硬件特性无关,能够直接体现网络性能。然而,使用经典软度量的前提是假设分组接收之间是相互独立的,结合对无线链路时间相关性分析可知,经典软度量方法对于长期极好和极差链路的度量较为准确,但判断短期链路质量变化的准

确性和敏感度较差。

## 2.2 构建映射关系的链路质量建模方法

在经典硬度和软度量基础上,寻找物理层参数(硬度量)与距离、PRR 等链路性能参数之间的直接映射关系得到了广泛的研究。文献[14]基于自由空间和对数正态阴影相结合的路径衰落模型,结合误比特率获得 PRR 与通信距离之间的关系。文献[15]提出 LETX(LQI-based ETX)方法,利用分段线性模型建立 LQI 与 PRR 的映射关系,同时指出尽管 LQI 不足以识别中间链路变化,但适用于反应式路由协议。文献[16]考虑到软度量的计算需要一定时间周期,存在敏锐性不足的问题,提出利用预先拟合的 SNR-PRR 映射曲线,以 SNR 为索引获得此时的 PRR。

上述基于统计学和曲线拟合的方法通常需要大量实测数据且以较大的时间窗拟合映射方程,而无线链路的时变特征很难用某一个固定模型刻画,若网络环境变化较大,提前构建的映射方程可能不再适用,并且较大的时间窗很难识别中间链路的短期波动。尤其是随着链路突发性特征的揭示,构建映射关系的链路质量建模方法的局限性更加突出,如何有效识别并高效利用突发链路,逐渐成为近几年的研究热点。

## 2.3 链路突发性评估和预测方法

目前,大多数研究基于软度量方法衡量链路突发性。文献[17]提出多时间尺度链路估计算法,使用 ETX 估计长期链路质量,使用连续正确收包次数估计短期链路质量,通过构建稳定链路和突发链路共存的拓扑结构,实现机会式路由。文献[18]将基于误差的滤波器(EF, Error-based Filter)应用于突发性链路质量评估。文献[19]在此基础上,进一步引入自适应窗口探测机制和瞬时主动探测机制,以提高链路质量估计的稳定性和反应速度。

以上研究刻画链路突发性特征的粒度较粗。斯坦福学者在文献[9]提出著名的链路突发性度量  $\beta$ 。用连续成功接收或连续丢包后,成功接收下一分组的条件概率分布函数表征理想突发链路,  $\beta$  则定义为实际链路 with 理想突发链路的 Kantorovich-Wasserstein 距离。 $\beta$  计算公式如下,

$$\beta = \frac{KW(I) - KW(E)}{KW(I)} \quad (2)$$

其中  $KW(\cdot)$  是与理想突发链路的距离,  $E$  是评估

的实际通信链路的条件概率分布函数,  $I$  是与其 PRR 值相同的理想链路的条件概率分布函数。 $\beta$  值越大, 则链路突发性越高。实验表明, 在  $\beta$  值较高的链路上使用机会式传输, 能够显著降低传输开销。 $\beta$  的计算需要大量样本数据, 因此可能不适用于对链路评估实时性要求较高的场景。

## 2.4 混合多层信息的链路质量建模方法

单一链路质量度量通常代表无线链路某一方面的特性, 为了获得更为全面的链路信息, 很多学者提出了组合不同基本度量的建模方法。Four-bit、Triangle 和 F-LQE 是三种典型的混合链路质量建模方法。

文献[20]提出了综合物理层、链路层和网络层信息的链路质量估计模型 Four-bit。如图2所示, 物理层使用 RSSI 和 LQI 度量(White bit), 链路层使用发送分组是否确认收到作为度量(ACK bit), 网络层则使用 Pin bit 判断是否删除路由表中当前路由, 使用 Compare bit 判断当前链路质量是否优于已有链路。最后, Four-bit 使用 EWMA 方法综合三个协议层信息来判断链路质量。

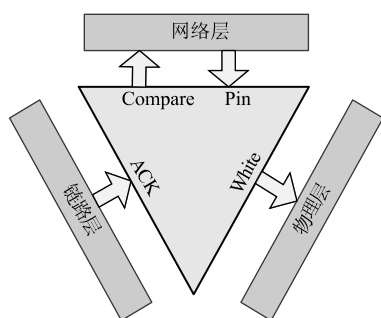


图2 Four-bit 链路质量评估机制

文献[21]巧妙地利用几何学图形理论提出了一种快速链路质量估计方法 Triangle, 建立了 PRR、LQI 和 SNR 三个度量的几何三角关系模型, 将链路质量等价于 SNR 和 LQI 构成的坐标点与原点的等价距离, 通过预先设置的阈值确定链路质量。文献[22]利用模糊逻辑方法组合丢包率、链路不对称性(上下行 PRR 之差)、链路稳定性(PPR 变异系数)、信道质量(SNR 均值)四种链路度量。模糊逻辑作为扩展布尔逻辑的经典方法, 将其应用于综合多种链路属性有一定的优势, 但是在建模过程中, 隶属函数需要人为指定, 一旦场景发生变化, 则需要更改隶属函数。

尽管组合多种链路度量能够获得全面的链路信

息, 但为了输出单一无量纲的新度量, 也在一定程度上损失或压缩了每一个度量的信息。此外, 新度量仅仅能代表某一时刻的链路质量值, 无法获得链路质量变化趋势。针对该问题, 文献[23]提出了包含四种链路特性的方法 HoPS(Holistic Packet Statistics): 1) 短期估计为 EWMA 平滑后的 PRR; 2) 长期估计为二次 EWMA 平滑后的 PRR; 3) 绝对偏差为长期和短期估计的偏差上、下限之和; 4) 趋势项则为长期和短期估计的上、下限之差。其研究思路具有一定启发性, 但每种链路特征仅是对 PRR 的简单处理, 尚未解决其固有缺陷。

## 2.5 基于数据驱动的链路质量建模方法

随着研究的深入, 越来越多的研究表明无线网络的真实链路特性与假设的理想模型有较大差距, 真实无线链路的动态波动性、不对称性、不稳定性等特征, 其差异不仅体现在不同的网络部署下, 同一链路在不同时刻也会表现出不同特征。以参数建模为主的传统方法试图为所有无线链路寻找到某一固定的链路质量映射模型, 其准确性在很大程度上取决于模型参数设置, 并且很难根据动态变化的网络环境进行自适应调整; 另一方面, 异构网络联合资源调度逐渐从用户级别向数据包级别深化。例如, 为了最优化无线资源的利用率和最大化系统容量, 联合无线资源管理(JRRM, Joint Radio Resource Measurement)中提出了分流传输的概念, 将一种业务划分为基本部分和增强部分, 分别由不同链路承载, 这对网络的可重配置性提出了更高挑战, 要求无线链路评估与预测具备更细颗粒度、更高实时性和灵活性<sup>[24-25]</sup>。在链路质量建模技术本身及应用需求的双重推动下, 最新研究将数据驱动思想(data-driven)应用于该领域。

针对节点移动导致的链路质量变化, 文献[26]提出基于模式匹配的链路质量预测机制 XCoPred(using Cross-Correlation to Predict), 如图3所示。采用 Kalman 滤波器剔除 SNR 序列的随机波动, 以此作为模型输入, 利用互相关函数寻找与过去一段时间与当前移动状态相似的 SNR 模式, 显然 XCoPred 适用于移动模式重复度高的场景。

文献[27]提出基于监督学习的链路质量预测机制, 以七种与链路质量有关的特征参数作为特征向量进行训练, 包括: RSSI、发送缓存大小、转发缓存大小、信道负载估计、上行和下行 PRR, 输出的链路质量预测值为 0 至 100 之间一个无量纲数, 并将其

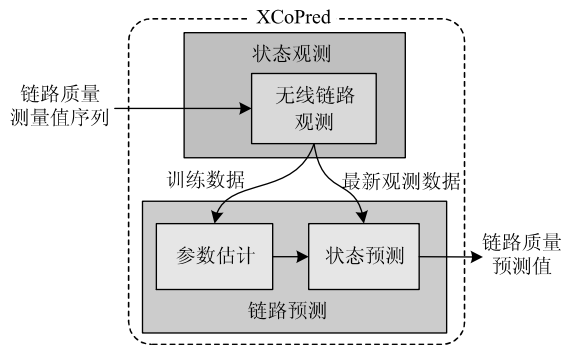


图3 XCoPred 预测机制

应用在 Metric - Map 路由协议中。文献[28]同样使用机器学习方法,将估计的丢失分组携带的信息和成功接收分组携带的信息构成训练数据集,最后选用带有高斯核函数的 SVMlight 工具进行预测,判断下一分组是否能够成功接收。文献[29]则以 LQI 为输入,利用机器学习方法构建链路质量估计的专家系统模型。

该领域的代表性研究为加州大学 ANDES 实验室承担的“Wireless link modeling at different spatial and temporal resolution”和“Wireless link quality estimation, prediction and metrics”项目,发表了一系列有影响力的研究成果<sup>[30]</sup>。研究[31][32]认为无线链路变化存在重复模式,提出基于机器学习的链路质量预测机制 4C,通过收集一定数量的样本(约 1000 个分组)训练预测模型。4C 同时使用物理层参数(RSSI、SNR 和 LQI)和 PRR 作为模型输入,利用贝叶斯分类器、Logistic 回归和 ANN 进行预测,输出下一分组成功接收概率。4C 具有较高预测精度,但当网络条件发生变化,对于首次出现的变化特征,4C 仍使用之前得到的训练模型,不能对网络变化做出调整,无法保证预测精度。此外,收集和存储训练集合需要较大开销。针对该问题,作者进一步提出了实时链路质量预测模型 TALENT(Temporal Adaptive Link Estimator with No off-line Training)<sup>[33]</sup>。TALENT 利用在线学习方法,预测中间链路的短期波动,无需先验知识和人为干预即可实现对网络条件变化的快速自适应。

以上采用机器学习的链路质量评估和预测方法为了获取易于处理的近周期性样本数据,大多采用主动探测方法(周期性广播小尺寸、低速率分组),没有考虑到立即重传和路由转发这类发送间隔不均匀的分组传输,也忽略了不同分组传输速率的影响<sup>[34]</sup>。针对该问题,本文作者考虑到链路的波动性

与干扰模式等多种因素的相关性极其复杂,提出利用非线性时间序列分析中的非参数建模方法构建链路质量评估和预测模型,与现有参数建模和智能化方法(如机器学习)相比,该方法不需要预先假设模型形式,避免参数建模方法的人为偏差,且预测算法在状态域而非时域进行多步预测,能够达到亚秒级的时间分辨率。此外,首次强调数据预处理方法的重要性,对获得的样本数据采用了 Akima 样条插值等预处理方法,与大多数研究直接采用滑动平均的预处理方法相比,提升了对杂乱的样本数据的处理能力,无须频繁的主动探测,并且能在很大程度上降低延迟和丢包导致的链路信息损失<sup>[35][36]</sup>。

通过以上分析可知,随着链路突发性、相关性等特征的揭示,无线链路建模也愈发复杂,数据驱动方法能够从数据集中挖掘信息、寻找规律,从而避开复杂的通信建模,具有很大的研究潜力。

### 3 结 语

本文深入分析了链路质量评估及预测方法的研究现状及发展趋势。链路质量评估与预测经历了从简单地使用物理层或分组接收统计参数、利用实测数据构建映射方程,到利用模糊逻辑、层次分析法等融合多无线特征。随着研究逐渐深入,无线链路的空间、时间特性得到充分揭示。具有里程碑意义的中间链路和链路突发性概念的提出,促使越来越多的学者将研究重点放在如何准确的评估中间链路质量、如何敏锐的发现中间链路变化趋势、如何细粒度、多尺度的表征中间链路特性。针对传统研究方法不足以识别和预测链路变化趋势的问题,近几年最新提出的数据驱动方法在评估和预测中间链路和链路突发性方面展现出极大优势,成为新的研究热点。

需要指出的是,链路质量评估和预测的最终目标是辅助高层协议设计,现有研究大多关注链路质量模型的准确性、稳定性和收敛性等指标,对通信系统整体性能考虑不足。因此,链路质量评估和预测研究需要充分考虑应用场景,提供充分且合适的链路状态信息的同时,联合开展高层协议设计,只有二者紧密结合,才能带来最大的网络性能增益。

#### 参考文献:

- [1] D. Kotz, C. Newport, C. Elliott. The mistaken axioms

- of wireless-network research [Z]. Technical report TR2003-647, Dartmouth CS Department, 2003.
- [2] J. Zhao, R. Govindan. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks [C]. In Proc. of the 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems ( SenSys03 ), Los Angeles, 2003: 1-13.
- [3] K. Srinivasan, P. Dutta, A. Tavakoli, et al. An empirical study of low-power wireless [J]. ACM Transactions on Sensor Networks ( TOSN ), 2010, 6(2): 16: 1-49.
- [4] K. Srinivasan, M. Jain, J. Choi, et al. The k-factor: inferring protocol performance using inter-link reception correlation [C]. In Proc. of the 16th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking ( MobiCom'10 ), New York, 2010, 49(1): 317 - 328.
- [5] S. Wang, A. Basalamah, M. K. Song, et al. Link-correlation-aware opportunistic routing in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 47-56.
- [6] Z. Zhao, W. Dong, J. Bu, et al. Link-Correlation-aware data dissemination in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62: 5747-5757.
- [7] M. K. Song, W. Shuai, H. Tian. Exploiting causes and effects of wireless link correlation for better performance [C]. In Proc. of IEEE Conf. on Computer Communications 2015 ( INFOCOM'15 ), Hong Kong, 2015.
- [8] A. Cerpa, J. L. Wong, M. Potkonjak. Temporal properties of low power wireless links: Modeling and implications on multi-hop routing [C]. In Proc. of the 6th ACM Int. Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing ( MobiHoc 2005 ), Urbana-Champaign, 2005: 414-425.
- [9] K. Srinivasan, M. A. Kazandjieva, S. Agarwal, et al. The  $\beta$ -factor: measuring wireless link burstiness [C]. In Proc. of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems ( SenSys08 ), Chicago, 2008: 29-42.
- [10] K. Srinivasan, P. Levis. RSSI is under appreciated [C]. In Proc. of the 3rd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, Cambridge, 2006: 239-242.
- [11] M. Spuhler, V. Lenders, D. Giustiniano. BLITZ: wireless link quality estimation in the dark [C]. In Proc. of 10th European Conf. on Wireless Sensor Networks ( EWSN'13 ), 2013: 99-114.
- [12] D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing [C]. In Proc. of the 9th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking, San Diego, 2003: 134-146.
- [13] A. Cerpa, J. L. Wong, L. Kuang, et al. Statistical model of lossy links in wireless sensor networks [C]. In Proc. of the 4th IEEE Int. Symposium on Information Processing in Sensor Networks ( IPSN'05 ), Seattle, 2005, 81-88.
- [14] Y. Xu, W. Lee. Exploring spatial correlation for link quality estimation in wireless sensor networks [C]. In Proc. of the 4th Annual IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications ( PerCom'06 ), Pisa, 2006: 200-211.
- [15] G. Carles, B. Antoni, P. Josep. Impact of LQI based routing metrics on the performance of a one-to-one routing protocol for IEEE 802.15.4 multihop networks [J]. EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking, 2010, 6: 1-20.
- [16] M. Senel, K. Chintalapudi, D. Lal, et al. A kalman filter based link quality estimation scheme for wireless sensor networks [C]. In IEEE Global Telecommunications Conference ( GLOBECOM'07 ), Washington, D. C, 2007: 875-880.
- [17] 彭喜元, 潘大为, 彭宇. 无线传感器网络多时间尺度链路估计算法研究 [J]. 电子学报, 2011, 39( S1 ): 80-85.
- [18] 黄庭培, 李栋, 张招亮等. 突发性链路感知的自适应链路质量估计方法 [J]. 通信学报, 2012, 33( 6 ): 30-39.
- [19] 尚凤军, 龚文娟, 耿哲. 基于链路预测和网络编码的 MAC 机制 [J]. 通信学报, 2016( 1 ): 17-27.
- [20] R. Fonseca, O. Gnawali, K. Jamieson, et al. Four bit wireless link estimation [C]. In Proc. of the 6th Int. Workshop on Hot Topics in Networks ( HotNets VI ), Atlanta, 2007.
- [21] C. Boano, M. Zuniga, T. Voigt, et al. The Triangle Metric: fast link quality estimation for mobile wireless sensor networks [C]. In Proc. of the 19th Int. Conf. on Computer Communications and Networks ( ICCCN'10 ), Zurich, 2010: 2-5.
- [22] N. Baccour, A. Koubaa, H. Youssef, et al. F-LQE: A fuzzy link quality estimator for wireless sensor networks [C]. In Proc. of 7th European Conf. on Wireless Sensor Network ( EWSN'10 ), Coimbra, 2010: 240 - 255.
- [23] R. Christian, E. Sebastian, W. Christoph, et al. Prediction accuracy of link-quality estimators [C]. In Proc. of the 8th European Conf. on Wireless Sensor Networks ( EWSN'11 ), Bonn, 2011, 6567: 1-16.
- [24] N. Vučević, J. Pérez-Romero, O. Sallent, et al. Reinforcement learning for joint radio resource management in LTE-UMTS scenarios [J]. Computer Networks, 2011, 55( 7 ): 1487-1497.

( 下转第 267 页 )

邮电大学出版社 2001.

- [7] 蔡亮, 程雅琼. 分布式对象模型应用技术研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2010, 5(5): 19-21.
- [8] 马晓波. EJB 组件技术及其应用研究[J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2008, 26(3): 326-329.
- [9] 张俊军, 章旋. ICE 中间件技术及其应用研究[J]. 计算机与现代化, 2012, 5: 192-194.
- [10] 李敬华, 李倩茹, 贾蓓. 数据中心服务器负载均衡问题研究[J]. 电信快报, 2014, 4: 25-28.
- [11] 吕慎敏. 基于服务器实时性能状态的动态负载均衡算法[J]. 网络安全技术与应用, 2014, 7: 163-164.

## 作者简介



姜邵巍(1986—), 男, 黑龙江人, 博士, 主要研究方向为软件中间件技术;

E-mail: integer@aliyun.com

朱建良(1964—), 男, 江苏人, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为信息系统;

吴永胜(1982—), 男, 河北人, 工程师, 主要研究方向为通信与信息系统。

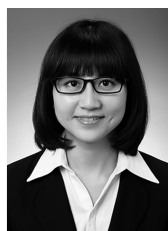
## (上接第 244 页)

- [25] 孙阳, 孙文生. 基于业务类型的异构无线网络选择算法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(4): 337-341.
- [26] Ka. Farkas, T. Hossmann, F. Legendre, et al. Link quality prediction in mesh networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(8): 1497-1512.
- [27] Y. Wang, M. Martonosi, L.-S. Peh. Predicting link quality using supervised learning in wireless sensor networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2007, 11(3): 71-83.
- [28] H. Oh. A link availability predictor for wireless sensor networks[D]. California: Stanford University, 2010.
- [29] D. Marinca, P. Minet. On-line learning and prediction of link quality in wireless sensor networks[C]. In Proc. of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'14), Austin, 2014: 1245-1251.
- [30] ANDES Lab. <http://www.andes.ucmerced.edu/>.
- [31] T. Liu, A. Cerpa. Foresee (4C): Wireless link prediction using link features[C]. In Proc. of the 10th Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'11), Chicago, 2011: 294-305.
- [32] T. Liu, A. Cerpa. Data-driven link quality prediction using link features[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2014, 10(2): 44-66.
- [33] T. Liu, A. Cerpa. TALENT: Temporal Adaptive Link Estimator with No Training[C]. In Proc. of the 10th

ACM Conf. on Embedded Network Sensor Systems (SenSys 2012), Toronto, 2012.

- [34] H. Zhang. Experimental analysis of link estimation methods in low power wireless networks[J]. Tsinghua Science & Technology, 2011, 16(5): 539-552.
- [35] L.-N. Weng, P. Zhang, Z.-Y. Feng, et al. Short-term link quality prediction using nonparametric time series analysis[J]. Science China Information Sciences, 2015, 58(8): 1-15.
- [36] L.-N. Weng, J. Yang. A cross-layer stability-based routing mechanism for ultra wideband networks[J]. Computer Communications, 2010, 33(18): 2185-2194.

## 作者简介



翁丽娜(1984—), 女, 河北人, 博士, 主要研究方向为自组织网络、异构网络融合;

E-mail: beyond07@126.com

刘铁铭(1988—), 男, 辽宁人, 博士, 主要研究方向为高动态自组织网络传输理论;

刘磊(1987—), 女, 河北人, 博士, 主要研究方向为多址接入技术、无线资源管理;

王兆伟(1982—), 男, 天津人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为机载移动通信技术。