

无感知分组丢失下的无线传感器网络链路质量评估模型

舒坚^{1,2}, 刘琳岚^{1,3}, 樊佑磊^{1,2}, 李君^{1,2}

(1. 南昌航空大学 物联网技术研究所, 江西 南昌 330063;

2. 南昌航空大学 软件学院, 江西 南昌 330063; 3. 南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063)

摘 要: 针对现有链路质量评估方法没有考虑到不完整分组对链路产生的影响, 将无线传感器网络的链路分组丢失分为感知分组丢失和无感知分组丢失, 分析了无感知分组丢失产生的原因, 在对无感知分组丢失进行度量的基础上, 提出一种无感知分组丢失下的链路质量评估模型。该模型采用卡尔曼滤波对获取的 CCI 进行降噪处理, 基于 Cubic 模型、最小二乘法拟合出 CCI 与无感知分组丢失率的关系模型。实验结果表明, 无感知分组丢失下的链路质量评估模型是合理的, 通过该模型求得的无感知分组丢失率与实测值接近。

关键词: 无线传感器网络; 链路质量评估; 无感知分组丢失; CCI; 卡尔曼滤波器

中图分类号: TP393

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2011)04-0103-09

Link quality estimation model for wireless sensor networks under non-perceived packet loss

SHU Jian^{1,2}, LIU Lin-lan^{1,3}, FAN You-lei^{1,2}, LI Jun^{1,2}

(1. Internet of Things Technology Institute, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. School of Software, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

3. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: For the existing link quality estimation with no consideration of the incomplete packet impact on link quality in wireless sensor networks, the packet loss was divided into two categories-perceived packet loss and non-perceived packet loss. A link quality estimation model under non-perceived packet loss has been proposed on the basis of the analysis of the causes for the non-perceived packet loss and the measurement of the non-perceived packet loss. When the model is being built, Kalman filter is introduced to denoise the acquired CCI (chip correlation indicator). The cubic model and the least squares method are employed in the fitting relationship between CCI and non-perceived packet loss ratio. The experiment results show that the link quality estimation model is reasonable, and non-perceived packet loss ratio coming from this model is very close to the measured value.

Key words: wireless sensor networks; link quality estimation; non-perceived packet loss; CCI; Kalman filter

收稿日期: 2010-06-17; 修回日期: 2010-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60773055); 江西省自然科学基金资助项目 (2009GZS0089); 江西省科技支撑计划重点基金资助项目 (2009BGA01000)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60773055); The Natural Science Foundation of Jiangxi Province (2009GZS0089); Jiangxi Key Technology R&D Program (2009BGA01000)

1 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor networks) 中, 大量资源受限的传感器节点被随机部署于监控区域, 节点间以无线自组织方式构成网络, 节点间通信使用的是低功率的无线射频信号——无线电波。无线电波的各种特性, 如波的反射、衍射、由反射所引起的多径效应等, 加上节点所处环境复杂多变和干扰信号的存在, 使得节点间通信质量受到严重的影响, 从而导致节点间通信具有随机性和不稳定性。

节点间通信的随机性和不稳定造成网络不能正常稳定工作, 如采集到的数据不能及时、顺利地传输给 Sink 节点, 从而导致用户不能及时获得相关信息。此外, 在具有重传机制的网络中, 较差的链路质量将增大网络开销, 尤其是能量开销, 从而缩短了网络寿命。

为及时了解网络的链路状况, 并依此采取相关策略保证网络高效、稳定地运行, 需要对链路质量进行评估。

2 相关工作

国内外在 WSN 链路质量评估方面进行了大量研究, 评估方法主要包括: 基于链路特性的评估方法、基于物理层参数的评估方法、基于数据链路层参数的评估方法、结合多因素的综合评估方法等。

2.1 基于链路特性的评估方法

基于链路特性的评估方法主要有: 与链路方向性相关的研究、与距离相关的研究、与时间波动性相关的研究、与链路非对称性相关的研究及与干扰相关的研究。

文献[1]指出 WSN 中的链路具有方向性, 导致节点通信区域的不规则性, 即节点的通信范围为一个不规则的球体。为对不规则度进行度量, 文中引入无线电不规则模型 (RIM, radio irregularity model), 该模型采用不规则度 (DOI, degree of irregularity) 表示。

文献[2]就不同距离下两节点间的收分组率进行时长约 300min 的实验。实验的前 20min, 发送节点和接收节点相距 15 英尺, 随后逐渐缩短至 8 英尺, 发现节点间距离由 15 英尺缩短至 8 英尺的过程中, 链路质量发生了剧烈变化, 但是, 当节点间距离固定时, 收分组率波动较小。文中还统计了不

同距离下的链路收分组率, 并将节点通信区域划分成 3 个区域: 高效区、过渡区和空白区。当节点处于高效区时, 其链路状况较好, 收分组率在 90% 以上; 处于过渡区的链路不稳定, 某些相距较远节点的链路好于距离较近的节点; 处于空白区时, 其链路状况较差, 收分组率几乎为 0。

文献[3]在自由空间与对数正态阴影相结合的路径损耗模型的基础上, 结合误比特率 (BER, bit error ratio) 得到收分组率与通信距离的关系模型。实际应用中, 该模型可以通过距离估算出当前的链路质量。然而无线信道中不仅存在通信不稳定性, 还存在方向差异性^[1], 因此只使用距离对链路质量进行评估是不可靠的。

文献[4,5]就链路随时间的变化特性进行了详细的研究, 研究表明 WSN 中节点间的链路质量发生很大变化, 从而导致节点间的数据传输不稳定; 文献[6]对不同收分组率下的链路波动性进行对比研究, 研究表明质量较好链路的波动范围要小于质量较差的链路; 文献[7]对不同距离下链路质量随时间变化关系进行了研究, 通过 60 个节点的实验发现随着节点间距离的增大, 链路质量的波动范围也随之增大。链路剧烈变化的特性使得一些路由协议 (如以最短路径为依据的路由协议) 的整体性能表现的不是那么尽如人意, 从而影响了整个网络的稳定性和运行效率^[4]。

此外, 实验表明链路还存在非对称性^[1,7~9], 即节点间正反方向的链路质量状况不一样, 甚至会出现单向链路, 链路的定向性、空间地理位置的差异都会导致链路的非对称性。

文献[10]指出无线链路中的信号常常受到多径效应、阴影效应和噪声等的干扰, 给链路评估带来困难, 因此考虑噪声、阴影效应和多径效应对链路误码率的影响, 建立了链路质量评估模型, 该模型在一定范围内具有很好的扩展性, 可通过调整参数适用于不同的环境。

2.2 基于物理层参数的评估方法

链路评估的物理层参数主要有: 接收信号强度 (RSSI, receive signal strength indicator)、码片相关度 (CCI, chip correlation indicator)、信噪比 (SNR, signal to noise ratio)。

文献[8]采用 RSSI 对链路进行评估, 实验表明 RSSI 受环境影响较大, 实际应用中很难形成统一标准。Chipcon 公司在推出 CC2420 芯片的同时, 提

出采用链路质量指标 (LQI, link quality indication) 度量链路质量, 文献[11]定义 LQI 为符号相关度, 确切地讲应该是 CCI^[12], CCI 被认为是码片错误率的一种度量方式, 可用来逐个数据分组地检测信道通信情况; 文献[13]分析了传统链路测量方法存在的问题, 提出均值 RSSI、均值 CCI 测量法, 文中作者就其性能做出了全面分析。

文献[14]提出一种基于模式匹配的链路质量预测模型, 节点首先获取并存储最近一段时间的 SNR 值, 构成链路质量的时间序列模型, 随后将这个时间序列模型作为模式匹配的输入数据并最终寻求一个匹配度最优的模型作为这条链路近期的预测模型对链路进行评估; 文献[15]提出一种 SNR 到分组接收率 (PRR, packet receive ratio) 的关系映射模型, 将获取的 SNR 值直接转换成 PRR 值, 避免了因发送大量探测分组导致的过多能耗。

2.3 基于数据链路层参数的评估方法

参与链路评估的数据链路层参数主要有: PRR 值、分组成功接收率 (PSR, packet success ratio)。

文献[16]针对事件监测型 WSN, 提出一种基于 PRR 值的链路质量评估方法, 该方法中 PRR 值的获取十分方便; 文献[17]指出, 传统的基于 PRR 值的链路评估方法假设分组的接收是独立不相关, 没有考虑到分组丢失的关联性, 实验表明, 真实情况下链路分组丢失存在相关性, 尤其是在突发状况下; 针对这种情况, 文献[18]设计了一种基于模糊区间判别法的链路评估器, 指出基于有限数据分组统计出的 PRR 值不能准确反映当前节点工作区间链路状况, 而在无需海量数据的前提下链路分组丢失特性可以比较准确地反映, 该评估机制通过模糊集理论实时地判断出节点的当前工作区间, 对不同区间内的分组丢失事件进行加权处理使其能够合理地反映出链路状况。

文献[19]提出采用 SNR 值的评估方法比采用 PSR 值更为准确; 文献[20]指出使用 SNR 值、RSSI 值和 CCI 值等物理层参数对链路质量进行评估具有开销少、能快速反映链路质量等优点。

2.4 综合评估方法

文献[21]提出一种综合评估方法, 综合物理层、链路层和网络层的评估信息, 并采用 4bit 信息对链路质量进行量化, 实验结果表明, 该评估方法能降低 44% 的发分组开销, 并能在大规模多跳平台上保持 99% 的传输率。

综上所述, 现有的链路质量评估机制建立在完整分组的基础上, 没有考虑到不完整分组对链路评估产生的影响, 导致链路评估不够详细、准确。本文将 WSN 中的链路分组丢失分为感知分组丢失和无感知分组丢失。

定义 1 感知分组丢失 (PPL, perceived packet loss): 接收端收到发送端发送的数据, 但是收到的数据分组中存在错误, 从而导致接收数据分组的丢弃, 这种分组丢失称感知分组丢失。

定义 2 无感知分组丢失 (N_PPL, non-perceived packet loss): 接收端没有收到发送端发送的数据, 即对发送端发送的数据毫无察觉, 这种分组丢失称无感知分组丢失。

通过上述的分组丢失分类, 可以根据链路的反馈信息判别出导致链路分组丢失的主要原因, 并根据其主要原因采取相应的措施进行改善。例如, 当感知分组丢失占较大比率时, 说明链路产生的分组丢失是由于节点间的相互干扰、外界干扰或存在较强的多径效应, 发生在该情况下的链路分组丢失可以通过以下措施进行改善: 对 MAC 层协议进行局部的调整从而达到减少节点间消息相互碰撞导致的消息传输错误, 在条件允许情况下, 还可以移动节点的位置来减弱这种由多径效应带来的影响; 当无感知分组丢失占较大比率时, 应当考虑缩短发送端和接收端的距离以提高链路质量。

文献[22]对 WSN 中链路的感知分组丢失进行了较为详细的研究, 本文针对无感知分组丢失进行研究, 通过分析感知分组丢失产生的原因, 在对无感知分组丢失进行度量的基础上, 提出一种无感知分组丢失下 WSN 的链路质量评估模型, 并通过实验验证了该模型。

3 无感知分组丢失产生的原因分析

根据 N_PPL 的定义, 当接收端对发送端发送的数据毫无感觉时, 发生的分组丢失为无感知分组丢失。本文从信号强度、IEEE 802.15.4 的 MAC 层帧的同步头两方面对 N_PPL 产生的原因进行分析。

3.1 信号强度导致的无感知分组丢失

接收灵敏度 (RS, receiver sensitivity) 是无线电接收端诸多参数中最重要的一個。在无线电波的接收过程中, 当接收端的信号能量小于接收灵敏度门限时, 接收端将不会接收任何数据, 即接收灵敏度是接收端能够接收信号的最小门限值。造成此类现

象的直接因素是发送端和接收端之间的距离。由无线电波自由空间传播理论模型可知，距离越大无线电的损耗就越多。自由空间中的无线电损耗模型如图 1 所示^[23]。

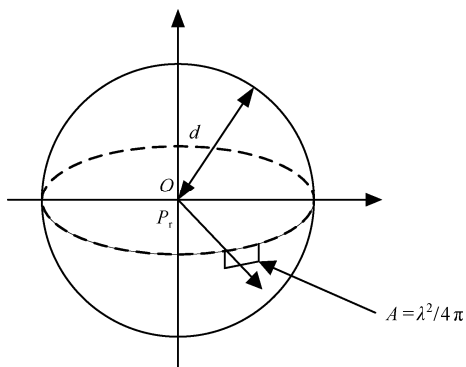


图 1 无线电波自由空间传播理论模型

图 1 中原点 O 处有一辐射源，均匀地向各方向辐射，辐射功率为 P_t ，则距辐射源 d 处的能流密度 S 为

$$S = \frac{P_t}{4\pi d^2} \quad (1)$$

假设接收天线的有效面积为 $A = \frac{\lambda^2}{4\pi} D$ ，其中， λ 为工作波长， D 为天线的方向性系数，各向同性的天线 D 取值为 1，则接收端在距离 d 处的输入功率 P_r 为

$$P_r = SA = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (2)$$

传播损耗 L_0 可定义为发射功率与接收功率的比值，自由空间传播损耗模型可描述如下：

$$L_0 = \frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi)^2 d^2}{\lambda^2} \quad (3)$$

由式(3)可知，当距离 d 增大时，自由空间传播损耗就增大，接收端的信号强度减小，导致接收端的信噪比减小；当接收端的信噪比小于接收端的某一门限值时，接收端无法接收数据，从而导致无感知分组丢失的产生。

3.2 同步头出错导致的无感知分组丢失

由 IEEE 802.15.4 的 MAC 帧格式可知，同步头包括：前导码序列、起始帧分隔符序列，CC2420 的同步头结构如图 2 所示。

前导码的作用在于位同步，并告诉接收端数据将要到来。位同步在数据接收过程中发挥着重大作用，数字通信系统中接收端需要对接收到的信号进

行采样判断，以判别是 0 码还是 1 码，而采样判决器的采样周期由位同步脉冲控制，因此位同步是数据接收的前提；起始帧分隔符的作用是为位同步提供字节同步，并标识一个帧的开始。

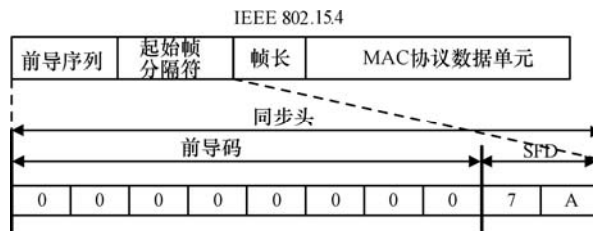


图 2 CC2420 的同步头结构

在数据的接收过程中，如果帧的同步头在传输过程中出现了错误，那么接收端将不会对同步头后的数据做任何处理，从而导致无感知分组丢失。

综上所述，在不考虑节点死亡、节点关闭或节点故障的前提下，WSN 中导致无感知分组丢失的主要原因如下：

- 1) 两节点间距离超出通信范围；
- 2) 接收端处于休眠状态；
- 3) 接收端的 RSSI 值低于接收灵敏度；
- 4) 受外界干扰，帧的同步头传输出现错误，导致接收端不接收信号。

对于 1)、2)，无感知分组丢失率 (N_PLR, non-perceived packet loss ratio) 达 100%，可通过缩短通信距离、时钟同步等技术避免分组丢失，本文探讨 3)、4) 引起的无感知分组丢失，考虑 RSSI 受环境影响较大^[8]，本文通过建立 CCI 与 N_PLR 之间的关系模型对无感知分组丢失下的 WSN 链路质量进行评估。

4 CCI 度量标准的降噪处理

本文通过实验对固定距离下 CCI 值与时间关系进行了测试。实验采用美国 CrossBow 公司的 TelosB 节点，节点采用 16bit 精简指令系统，主频为 8MHz，具有大小为 10KB 的 RAM 的 MSP430 低功耗微处理器，无线通信采用兼容 IEEE 802.15.4 规范、工作于 2.4GHz 的高性能 CC2420 无线收发芯片。

实验在室外环境下进行，场景如图 3 所示。使用 2 个 TelosB 节点，分别为发送端 TX-1、接收端 RX-1，RX-1 通过 USB 口与笔记本电脑连接，TX-1 的数据传输速率为 10packet/s，设置每次实验时长为 1min40s，即每次统计 1 000 个数据分组。

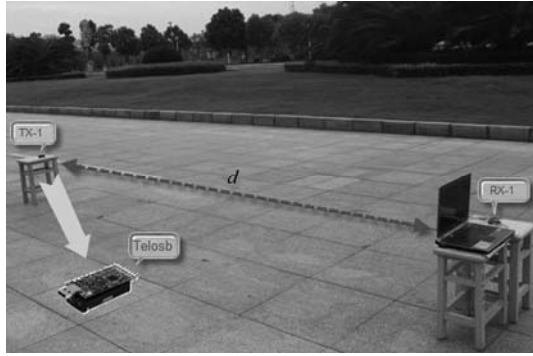


图 3 TX-1 与 RX-1 相距 4m 时实验场景

TX-1 发送具有固定载荷的测试帧，测试帧格式如图 4 所示，测试帧分为帧头、帧载荷与 CRC 校验码 3 个部分。

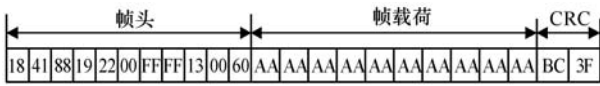


图 4 测试帧格式

如图 3 所示， d 表示 TX-1 与 RX-1 间的距离，整个实验过程中， d 值固定为 4m，得到 CCI 值随时间变化的情况如图 5 所示。

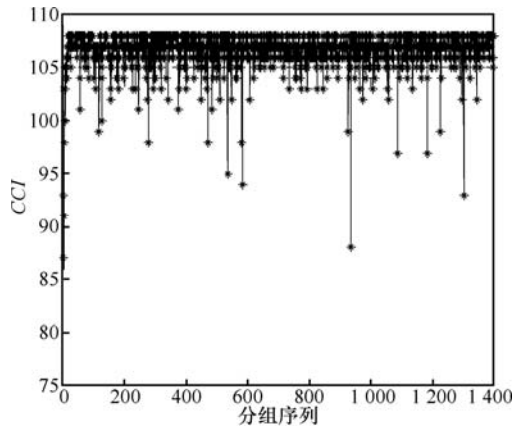


图 5 固定距离下原始 CCI 值随时间变化情况

如图 5 所示，分组序列号随时间递增，原始 CCI 值随分组序列号的变化反映其与时间的变化情况。由图 5 可知，原始 CCI 值在较大范围内波动，最小 CCI 值为 77，最大值为 108，原始 CCI 值或 CCI 均值很难完全反映链路质量特性，本文采用卡尔曼滤波模型对原始 CCI 值进行处理，该模型兼顾均值和方差，同时考虑到变化过程，并通过迭代减小均方差。此外，该模型表示了一个时间的递推过程，一旦观测到新数据可立即给出新的滤波值，实时性较好，并且在求解时不需要存储大量的数据，适用

于无线传感器网络的链路评估。

在构建卡尔曼滤波模型时，首先引入一个随机线性离散系统，系统可描述如下：

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (4)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (5)$$

其中， x_k 和 z_k 分别为 k 状态的估计值和实际测量值， w_{k-1} 和 v_k 分别为过程高斯白噪声和测量高斯白噪声， $p(w) \sim N(0, Q)$ ， $p(v) \sim N(0, R)$ ， $Cov\{w_{k-1}, v_k\} = 0$ ； Q 、 R 分别为过程噪声的方差和测量噪声的方差，其值可能是变化的，但通常被认为是固定的； A 为状态迁移矩阵， B 是一个可选的控制输入量和状态 x 的关联矩阵， H 为一个状态和测量值的关联矩阵，实际上 A 、 B 、 H 可能是变化的，但是通常被认为是不可变的。

实验中 x_k 和 z_k 分别表示 CCI 在 k 时刻的估计值和实测量，并认为在很短的时间内 CCI 值是不变的，即状态没发生改变，所以 A 为 1，由于不存在控制输入量，所以 u_k 为 0，实验中测量值就是状态值 CCI，所以 H 为 1。因此式(4)、式(5)可以改写为

$$x_k = x_{k-1} + w_{k-1} \quad (6)$$

$$z_k = x_k + v_k \quad (7)$$

根据式(6)和式(7)建立的系统，得到更新模型如图 6 所示，其中包含时间更新和测量更新。 \hat{x}_k^- 和 \hat{x}_k 分别为 CCI 的先验和后验估计值， P_k^- 和 P_k 分别为先验和后验估计误差的方差， K_k 为卡尔曼增益。

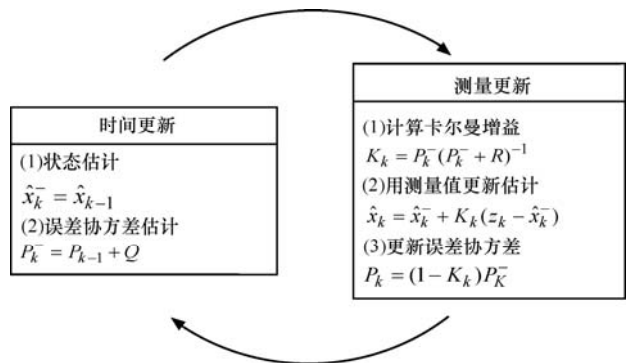


图 6 卡尔曼滤波器的循环工作周期

为使卡尔曼滤波器开始工作，需要知道 Q 、 R 、 \hat{x}_0 和 P_0 的初始值。 Q 取值的准确度仅会影响评估的收敛速度，不会影响准确度，在实验初始阶段通过计算 $x_k - x_{k-1}$ 的方差来设定 Q 值；用实测 CCI 的方差来代替 R 值；实验中 \hat{x}_0 使用的是第一次获取到的值， P_0 通常由 Q 计算得出^[15]。

固定距离下, 滤波后 CCI 值随时间变化情况如图 7 所示。

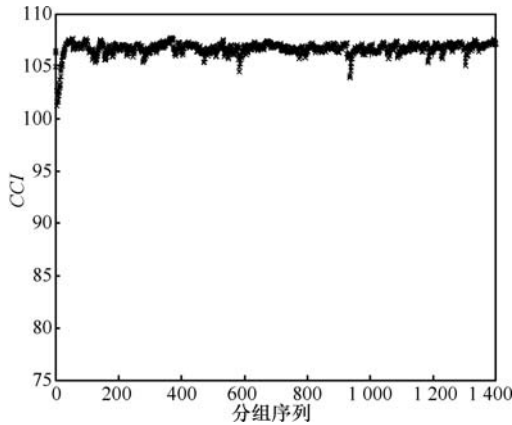


图 7 固定距离下滤波后 CCI 值随时间变化情况

由图 7 可知, 卡尔曼滤波明显减小了 CCI 值的波动范围和测量中噪声的影响, 能较好地反映出链路的信道质量。

5 无感知分组丢失的测量

本文通过实际实验对无感知分组丢失进行测量。实验方案与第 4 节中描述的类似, 实验场景如图 3 所示, 实验中, 通过改变 TX-1 与 RX-1 间的距离 d 模拟不同情形下的链路状况。RX-1 接收 TX-1 发送的数据, 并记录下收分组个数、滤波后的 CCI 值, 并统计出每个测试周期的 N_PLR、滤波后的均值 CCI。

5.1 无感知分组丢失的测量分析

实验测得 CCI 与 N_PLR 的散点分布如图 8 所示。

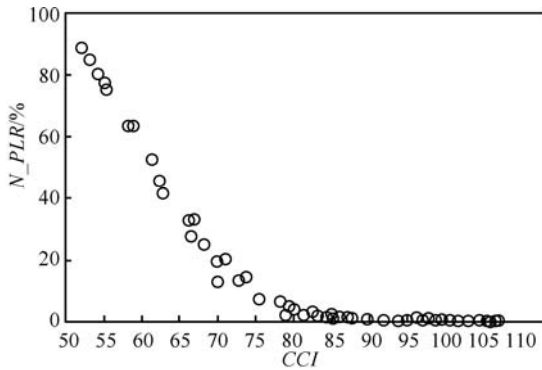


图 8 CCI 与 N_PLR 的散点分布

从图 8 可知, 当 $CCI > 85$ 时, N_PLR 基本稳定在 0 的位置, 基本不发生无感知分组丢失; 当 $CCI \leq 85$ 时, 随着 CCI 值的减小 N_PLR 增大, CCI 值与 N_PLR 的散点分布存在着较好的相关性, 为此本文将 CCI 值分两段进行处理, 即 [50, 85] 与 (85, 108]。对于 (85, 108], 认为其对应的 N_PLR 为 0;

对于 [50, 85], 基于最小二乘法建立 CCI 与 N_PLR 的关系模型。

5.2 基于最小二乘法的 CCI 与 N_PLR 的关系模型

本文给出最小二乘法的定义, 如定义 3 和定义 4 所示。

定义 3 假设得到的实验数据组成的二元组为 $(x_i, y_i), i = (1, 2, \dots, n)$, 其中 x_i 为独立变量, y_i 为依赖变量。

实际情况下, 独立变量可能不止 1 个, 本文假设独立变量只有 1 个 CCI。

定义 4 假设要求取的 x 和 y 间的目标函数为 $y=f(x, \beta)$, 其中 β 为可调系数集合。

最小二乘法的目标是找到一个最优函数, 使得下列表达式的值最小。

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \beta))^2 \quad (8)$$

其中, x_i 表示实际测量到的独立变量值, y_i 表示实际测量到的依赖变量值, r_i 表示第 i 次实验的实测依赖变量值与根据目标预测模型得到的依赖变量估计值之间的误差, $f(x_i, \beta)$ 表示在给定可调系数 β 的情况下, 使用目标预测模型得到的依赖变量的估计值。

在最小二乘法中, 求 S 的最小值问题可进一步转化为求 S 的最小极值问题^[24,25], 为此可以通过求取下列表达式来获得这个最小值。

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_j} = 2 \sum_i r_i \frac{\partial r_j}{\partial \beta_j} = 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

假设目标函数中有 m 个可调参数, 则有 m 个上述式子, 将 $r_i = y_i - f(x_i, \hat{\beta})$ 代入上式:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_j} = 2 \sum_i (y_i - f(x_i, \beta)) \frac{\partial (y_i - f(x_i, \beta))}{\partial \beta_j} = 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

即

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_j} = -2 \sum_i (y_i - f(x_i, \beta)) \frac{\partial f(x_i, \beta)}{\partial \beta_j} = 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

线性模型 $f(x_i, \beta)$ 可表示如下:

$$f(x_i, \beta) = \beta_0 \Phi_0(x_i) + \beta_1 \Phi_1(x_i) + \dots + \beta_m \Phi_m(x_i) = \sum_{j=1}^m \beta_j \Phi_j(x_i) \quad (12)$$

其中, Φ_j 为 x_i 的函数。令:

$$X_{ij} = \frac{\partial f(x_i, \beta)}{\partial \beta_j} = \Phi_j(x_i) \quad (13)$$

则可调参数 β 可通过式(14)求得。

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (14)$$

其中, X 是由参数 X_{ij} 组成的矩阵, Y 为实际测量得到的依赖变量所组成的矩阵, 将上式得到的系数矩阵 β 代入目标模型即可得到所求公式。

5.3 无感知分组丢失模型的建立

本文采用多种模型 (指数模型、幂模型、Cubic 模型、对数模型等) 对 N_PLR 与 CCI 之间关系进行拟合。在采用上述模型的拟合过程中, 发现 Cubic 模型与该分布的拟合度优于其他模型, 拟合度较高。

本文用到的 Cubic 模型如下:

$$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 \quad (15)$$

其中, b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为 Cubic 模型中的可调参数, 本文中 x 表示独立变量 CCI 的值, Y 表示依赖变量 N_PLR 的值。则上式可改写为

$$N_PLR = b_0 + b_1 \times CCI + b_2 \times CCI^2 + b_3 \times CCI^3 \quad (16)$$

通过最小二乘法求得可调参数: $b_0=4.601\ 720$ 、 $b_1=-0.081\ 115$ 、 $b_2=0$ 、 $b_3=3.746\ 769 \times 10^{-6}$ 。

代入式(16), 得到的曲线方程如下:

$$N_PLR = 4.601\ 720 - 0.081\ 115 \times CCI + 3.746\ 769 \times 10^{-6} \times CCI^3 \quad (17)$$

对应的拟合效果如图 9 所示。

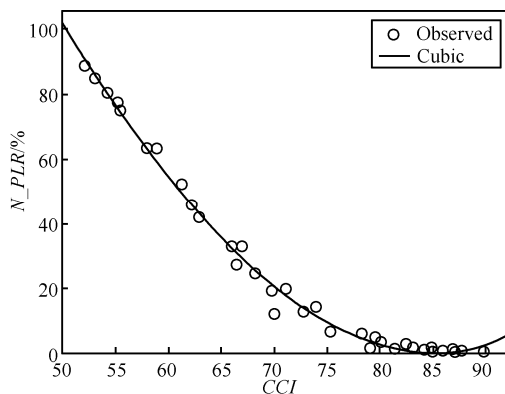


图9 CCI 与 N_PLR 的拟合曲线

结合 $CCI > 85$ 的情形, 得到 CCI 与 N_PLR 的关系模型如下:

$$N_PLR = \begin{cases} 0 & , CCI > 85 \\ 4.601\ 720 - 0.081\ 115 \times CCI + 3.746\ 769 \times 10^{-6} \times CCI^3 & , CCI \leq 85 \end{cases} \quad (18)$$

此外, 从图 9 可知, 当 $CCI < 50$ 时, $N_PLR > 100\%$, 根据文献[12]可知, CCI 的最小极限值是 50, 在本文实验中 CCI 小于 50 的情况很少出现, 因此当 $CCI < 50$ 时, N_PLR 为 100%。

6 实验分析

本文通过实际实验对提出的无感知分组丢失模型的合理性进行验证。整个实验过程在室外环境下进行, 实验方案与第 4 节中描述的类似, 实验场景如图 3 所示, 实验中, 通过改变 TX-1 与 RX-1 间的距离 d 模拟不同情形下的链路状况。RX-1 接收 TX-1 发送的数据, 记录下收分组个数、滤波后的 CCI 值, 并统计出每个测试周期的 N_PLR 、滤波后的均值 CCI 。实验分两组进行, 一组 TX-1 发送功率设置为 3, 另一组设置为 7。

设置发射功率为 3, 测得 147 组 N_PLR 与依据本文提出的无感知分组丢失模型计算得到的 N_PLR 对比情况如图 10 所示。

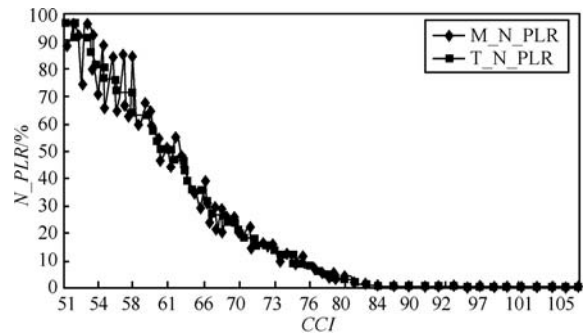


图 10 计算得到的 N_PLR 与实测 N_PLR 对比情况

图 10 中, M_N_PLR 表示实测的 N_PLR , T_N_PLR 表示依据本文提出的无感知分组丢失模型计算得到的 N_PLR 。由图可知, 计算值与实测值很接近, 再者随 CCI 值的变化规律也是一致的, 说明本文提出的无感知分组丢失下的链路质量评估模型是合理的。

设置发射功率为 7, 测得 60 组 N_PLR 与依据本文提出的无感知分组丢失模型计算得到的 N_PLR 对比情况如图 11 所示。显然, 此时结果与发射功率为 3 时相类似。

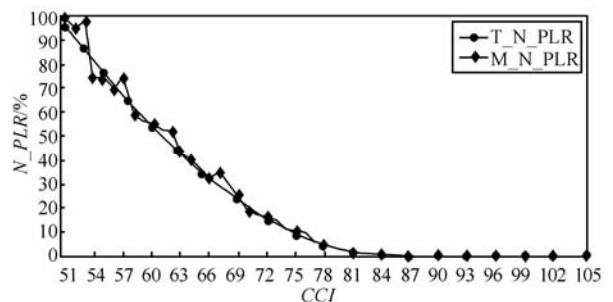


图 11 计算得到的 N_PLR 与实测 N_PLR 对比情况

下面对实测值与理论间的误差进行分析,以第一组数据为例计算得到的 N_PLR 与实测的 N_PLR 间的误差分布如图 12 所示。

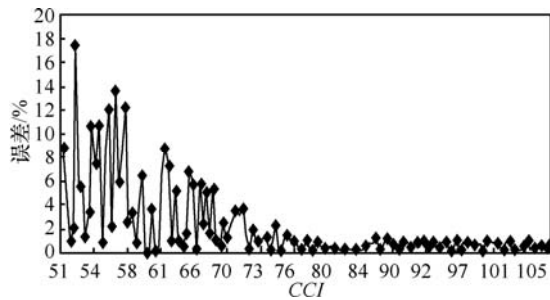


图 12 计算得到的 N_PLR 与实测 N_PLR 间误差分布情况

从图 12 可知,最大误差约 18%,最小误差为 0。就整体情况来看,其误差随 CCI 值的增大而减小:当 $CCI > 73$ 时,误差低于 2%,因此,本文提出的无感知分组丢失模型是合理的。

7 结束语

本文分析了 WSN 链路质量评估方法的国内外研究现状,考虑不完整分组对链路产生的影响,将 WSN 的链路分组丢失分为感知分组丢失和无感知分组丢失,并着重分析了无感知分组丢失产生的原因,通过大量实验对无感知分组丢失进行度量,在此基础上提出一种无感知分组丢失下的链路质量评估模型。大量实验表明,通过模型计算得到 N_PLR 与实际测得的 N_PLR 很接近,两者间的误差随 CCI 值的增大而减小,说明本文提出的链路质量评估模型是合理的,为上层协议的研究提供了参考。

参考文献:

[1] ZHOU G, HE T, KRISHNAMURTHY S, *et al.* Impact of radio irregularity on wireless sensor networks[A]. Proceedings of Second International Conference on Mobile Systems, Applications and Services[C]. Boston, MA, United States, 2004. 125-138.

[2] WOO A, TONG T, CULLER D. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks[A]. Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. Los Angeles, CA, United States, 2003. 14-27.

[3] XU Y, LEE W C. Exploring spatial correlation for link quality estimation in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications[C]. Pisa, Italy, 2006. 200-209.

[4] COUTO DSJ, AGUAYO D, CHAMBERS B A, *et al.* Performance of multihop wireless networks: shortest path is not enough[J]. ACM

SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(1): 83-88.

[5] ZAMALLOA M Z, KRISHNAMACHARI B. An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links[J]. Association for Computing Machinery, 2007, 3(2): 7-40.

[6] ALBERTO C, NAIM B, DEBORAH E. SCALE: A Tool for Simple Connectivity Assessment in Lossy Environments[R]. CENS Technical Report, 2003.

[7] ZHAO J, GOVINDAN R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks[A]. Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. Los Angeles, CA, United States, 2003. 1-13.

[8] REIJERS N, HALKES G, LANGENDOEN K. Link layer measurements in sensor networks[A]. Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems[C]. Fort Lauderdale, FL, United States, 2004. 224-234.

[9] KIM K H, SHIN K G. On accurate measurement of link quality in multi-hop wireless mesh networks[A]. Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. Los Angeles, CA, United States, 2006. 38-49.

[10] SUN C, CHEN B, ZHANG Y, *et al.* Multi-path fading channel-based estimating model of link quality for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing[C]. Beijing, China, 2009.

[11] Texas Instruments. CC2420 Datasheet: Single-Chip 2.4GHz IEEE 802.15.4 Compliant and ZigBee(TM) Ready RF Transceiver[Z]. 2007.

[12] SRINIVASAN K, DUTTA P, TAVAKOLI A, *et al.* Understanding the causes of packet delivery success and failure in dense wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. Boulder, CO, United States, 2006.

[13] 孙佩刚, 赵海, 罗玎玎等. 无线传感器网络链路通信质量测量研究[J].通信学报,2007, 28(10): 14-22.

SUN P G, ZHAO H, GUO D D, *et al.* Study on measurement of link communication quality in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2007, 28(10): 14-22.

[14] FARKAS K, HOSSMANN T, FRANK L, *et al.* Link quality prediction in mesh networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(8): 1497- 1512.

[15] SENEL M, CHINTALAPUDI K, LAL D, *et al.* A kalman filter based link quality estimation scheme for wireless sensor networks[A]. Proceedings of Global Telecommunications Conference[C]. Washington, DC, United States, 2007. 875-880.

[16] LIU L L, LI J, WU Z H, *et al.* Research on warning mechanism of link quality for Event-driven wireless sensor network[A]. Proceedings of the 2nd International Symposium on Electronic Commerce and Security[C]. Nanchang, China, 2009. 510-515.

- [17] SRINIVASAN A, KAZANDJIEVA M A, AGARWAL S, *et al.* The β -factor: measuring wireless link burstiness[A]. Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems[C]. Raleigh, NC, USA, 2008.
- [18] 朱剑, 赵海, 徐久强等. 基于模糊区间识别的链路评估器研究[J]. 计算机应用研究, 2009,26(1): 294-298.
ZHU J, ZHAO H, XU J Q, *et al.* Research of link estimator based on fuzzy region recognition[J]. Application Reserch of Computers, 2009, 26(1): 294-298.
- [19] WAPF A, SOURYAL M R. Measuring indoor mobile wireless link quality[A]. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Communications[C]. Dresden, Germany, 2009.
- [20] 朱剑, 赵海, 张希元等. 基于LQI量度的无线链路质量评估模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(9): 1262-1265.
ZHU J, ZHAO H, ZHANG X Y, *et al.* LQI-based evaluation model of wireless link[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2008, 29(9): 1262-1265.
- [21] RODRIGO F, OMPRAKASH G, KYLE J, *et al.* Four-bit wireless link estimation[A]. Proceedings of the Sixth Workshop on Hot Topics in Networks[C]. Vancouver, BC, Canada, 2007.
- [22] LIU L L, LI J, SHU J, *et al.* CCI-Based link quality estimation mechanism for wireless sensor networks under perceive packet loss[J]. Journal of Software, 2010, 5(4): 387-395.
- [23] 无线通信原理[EB/OL]. http://solution.eccn.com/pdf/com_072046f.pdf. 2003.
Wireless communication theory[EB/OL].http://solution.eccn.com/pdf/com_072046f.pdf. 2003.
- [24] Least squares[EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Least_squares.
- [25] Maxima and minima[EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Maxima_and_minima.

作者简介:



舒坚(1964-), 男, 江西靖安人, 南昌航空大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统和软件工程。



刘琳(1968-), 女, 湖南东安人, 南昌航空大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络和分布式系统。



樊佑磊(1985-), 男, 山东鱼台人, 南昌航空大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络和嵌入式系统。



李君(1985-), 男, 江西吉安人, 南昌航空大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络和嵌入式系统。