

基于Ornstein-Uhlenbeck模型的WSN链路质量估计

叶 润, 闫 斌

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

【摘要】无线传感器网络节点一般具有低成本、低功耗、低速率、能量有限等特点。使用廉价的低功率射频模块进行传感器之间通信,对无线信道的变化非常敏感。为了避免低信号质量数据链路上可能的重传导致的资源浪费,通常路由协议以及冗余编码机制等方法均需要不断地评估网络的链路质量。对于无线传感器网络来说,无论是自适应冗余编码还是路由协议均需要对包成功接收率(PSR)进行定量且准确地评估。针对这一问题,提出一种基于物理参数接收信号强度指示(RSSI)的方法来估计分组成功率。该方法首先根据大量实际测试,得到RSSI与PSR之间的关系,再根据实时接收到的RSSI值,利用Ornstein-Uhlenbeck(OU)模型以及Logistic曲线模型对下一时刻的PSR进行估计。仿真与实验表明,该方法相对于现有的方法具有更高的准确性与快速性。

关键词 链路质量估计; Logistic曲线模型; Ornstein-Uhlenbeck模型; 包成功接收率; 接收信号强度指示; 无线传感器网络

中图分类号 TN92 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2018.04.006

WSN Link Quality Estimation Based on Ornstein-Uhlenbeck Model

YE Run and YAN Bin

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Wireless sensor network nodes generally have the characteristics of low cost, low power consumption, low rate, limited energy and so on. It is very sensitive to the changes of wireless channel to use inexpensive and low-power radio frequency (RF) modules for communication between sensors. In order to avoid wasted resources due to possible retransmissions on low-signal quality data links, methods such as routing protocols and redundant coding mechanisms are needed to continually evaluate the link quality of the network. For wireless sensor networks, both the adaptive redundancy coding and the routing protocol require a quantitative and accurate evaluation of the packet success rate (PSR). To solve this problem, we propose a method of received signal strength indicator (RSSI) based on the physical parameter to estimate the packet success rate of the wireless links. In the proposed method, the relationship between RSSI and PSR is obtained based on a large number of actual tests. Based on the RSSI value received in real time, the next-time PSR is estimated by Ornstein-Uhlenbeck model and Logistic curve model. Experiments and tests show that the proposed method has higher accuracy and fastness than the existing methods.

Key words link quality estimation; Logistic curve model; Ornstein-Uhlenbeck (OU) model; packet success rate (PSR); received signal strength indicator (RSSI); wireless sensor network

低成本的无线通信设备以及对物理信息的感知与控制的需求是促进无线传感器网络发展的重要原因,如今物联网技术的发展是以无线传感器网络为基础的^[1-2]。对于无线传感器网络的研究与应用,最核心的问题是以最低的成本将有效的数据可靠地传输到指定目的地。而低成本、低功率、低处理能力的传感器节点又给无线传感器网络的设计与应用带来了极大的挑战^[1]。通常,无线节点之间的通信很容易受无线链路中的环境与干扰带来的影响^[3-5],尤

其是低功率的无线射频模块。因而,对复杂的无线链路质量评估是解决无线网络问题的基础,也是不可或缺的关键部分。目前,一些学者在链路质量评估方面进行了大量的研究^[5,6-9]。

无线传感器网络中很多关键技术都依赖于无线链路质量评估,而包成功率PSR是链路质量的一个间接指标,在无线传感器网络中具有很重要的应用价值^[6-8]。对于包成功率的估计,通常有两类方法:

1) 基于探测帧的PSR估计^[10-12]: 通过发送一定数量

的探测帧来评估信道的分组成功率, 然而, 这种方法不仅带来了信道和能量资源的浪费, 也不能对无线信道的变化做出快速地反应。2) 基于链路质量的直接指标的PSR估计^[12-16]: 如利用RSSI、LQI、SNR等物理层可以直接或计算得到的参数指标, 再利用其与PSR之间的关系得到对PSR的估计。这种方法首先需要根据先前的大量实际测试, 得到相关物理量与PSR之间的关系, 具有很强的快速性。

文献[5,17-18]已经在很多相关的无线传感器网络路由协议里提到基于探测帧的PSR估计方法。这些对于链路PSR的估计不仅增加了信道负担和节点功耗, 而且路由的反应时间较长, 尤其是在移动无线网络中。对于无线电波传播损失规律来说, 大多实际的应用场景都是极其复杂的。文献[6,19-23]利用无线传输物理参数估计信道的链路质量, 如RSSI、LQI、SNR等。

文献[19]为了估计无线网络链路质量以及分析对树形路由产生的影响, 提出了一种模糊链路质量估计(F-LQE), 该方法利用4个链路质量属性结合模糊逻辑对链路质量进行整体度量。文献[21]在特定的场景分析了数据包丢失的原因。文献[22]试图找到无线信道物理量与包接收率之间的关系, 并分别对LQI、RSSI、SNR与包接收率之间的关系进行了测试和分析。

本文提出了一种自适应的轻量级信道质量估计方案, 该方案可以为相关的改进无线网络性能的算法提供准确且快速的链路质量评估结果。此外, 该算法适用性广, 可以应用于无线信道容易跳变的同频干扰的无线通信及移动目标的无线传感器网络中。本文以TI的CC2530作为测试SoC, 其利用的就是物理参数RSSI换算出LQI以及SNR, 所以这里仅仅利用RSSI作为唯一的物理参数。

为了解决信道的时变特性, 本文使用Ornstein-Uhlenbeck(OU)模型^[24-25]持续地对物理量RSSI进行跟踪估计。但RSSI本身并不能提供对包成功率的估计, 因此, 本文通过在不同环境条件下进行实际测试, 根据测试的数据, 找到RSSI与PSR之间的映射关系, 拟合出RSSI与PSR之间的关系曲线, 得到拟合函数。

1 测试与数据分析

解决基于发送探测帧的包成功率估计缺陷问题的最佳思路是研究包丢失率的规律与原因。本文根据实验数据分析得到物理量RSSI与包成功率PSR之

间的关系, 优化无线信道估计的准确性。

首先对电磁波在无线信道中的传播进行简单描述。对两个情况下的节点进行测试, 分别为静态情况与动态情况。静态情况下节点之间的链路质量偏于较好的情况; 动态情况下, 让一个节点固定, 另一个节点相对固定不动的节点进行来回走动。实验基于TI Z-Stack的软件协议, 以及工作在2.4 GHz ISM频段的CC2530的硬件平台。设置节点传输功率为4.5 dBm, 应用层分组传输速率设置为固定速率100 个/s分组, 且分组长度设置为64字节, 速率为大约50 kb/s。CC2530的最大吞吐量更接近250 kb/s。在这些实验中, 节点被放置在1 m高的支架处, 每个等级的RSSI分别测试50 s, 以统计每个等级状态下的链路行为。

图1展示了静态与动态情况下的无线信道特征行为, 当发送节点每50 ms发送分组时接收端的接收信号强度(RSSI)的时变特征。从图1中可以看出, 静态情况下, RSSI基本是均值回归的。而在动态情况下, 根据RSSI的特征基本可以反映出移动节点来回随机走动的趋势。

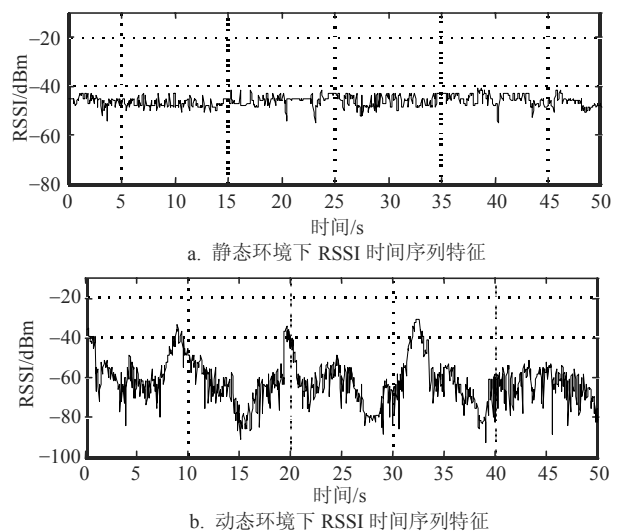


图1 不同链路质量下的接收到的信号强度特性

2 系统模型

作为无线传感器网络, 最本质的作用是把期望数据可靠地传输到指定目的地, 而包成功率正是评估数据能成功到达目标节点的几率。在第1节中已经详述了部分包成功率评估的方法以及其优缺点。在本节中, 提出一种基于无线链路物理量的PSR评估方法。该方法主要分为两个部分: RSSI估计阶段与包成功率估计阶段, 如图2所示。

基于对第1节中的信道行为的分析, 可以得出结

论, 瞬时的无线链路物理量不能充分表征信道的质量。文献[17,26-29]中均指出, 将无线链路物理量的

历史信息与当前的瞬时数据结合, 可以更加准确地对链路质量进行评估。

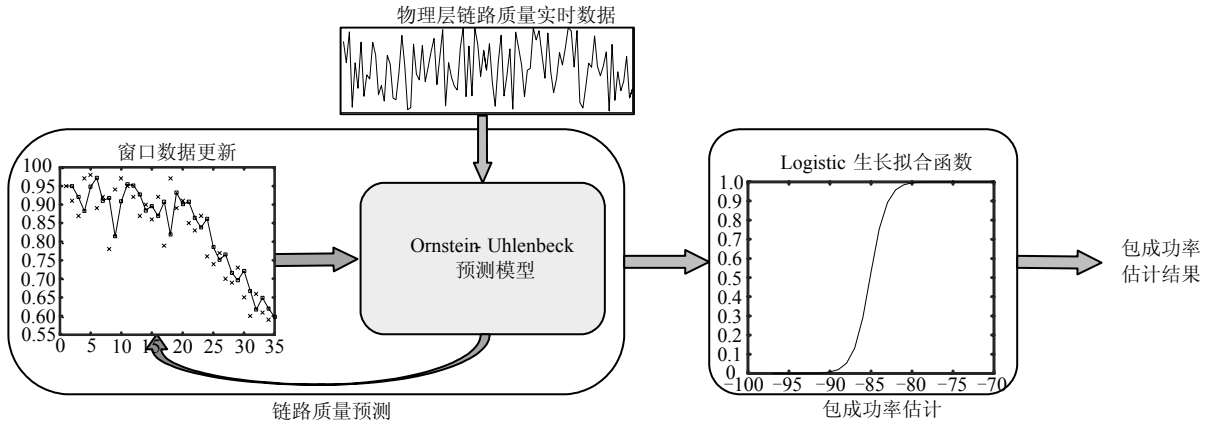


图2 包成功率估计机制

然而, 无线信道物理量通常只能定性地估计链路质量的好坏, 却无法定量地衡量出信道的具体特性行为。在无线传感器网络中, 通常对信道质量的评估都是利用链路的PSR进行衡量的。所以本文结合无线信道物理量RSSI与链路的PSR关系特征, 得到RSSI与PSR之间的映射模型; 再根据Ornstein-Uhlenbeck模型估计出的结果, 就可以对信道进行定量地分析估计。

3 基于OU方法的链路质量估计

根据上节的模型介绍可知, 本文方案分为两个不同的阶段: RSSI估计阶段与包成功率估计阶段。

3.1 基于OU模型的RSSI估计

通过上述的时域观测, 典型的静态无线信号强度值通常表现出均值回归的行为^[23]。OU过程也可以被认为是离散时间AR(1)过程的连续时间模拟。在本节中, 提出了一种使用改进的均值回归OU过程的无线链路估计技术。

OU过程是一种随机过程, 满足:

$$dX_t = \theta(\mu - X_t)dt + \sigma dW_t \quad (1)$$

式中, 参数 θ 为均值回归率, 满足 $\theta > 0$; σ 为波动性参数, 且 $\sigma > 0$; μ 为均值; W_t 表示维纳过程。

如果忽略由于 dW_t 引起的随机波动, 则可以看到 X_t 具有向均值 μ 漂移的大体趋势。 X_t 以速率 θ 和指数方式恢复到均值 μ , 其大小与当前值的 X_t 和 μ 之间的差值成正比。因为:

$$d(e^{\theta t} X_t) = \theta e^{\theta t} X_t dt + e^{\theta t} dX_t + \frac{1}{2} \theta^2 e^{2\theta t} X_t (dt)^2 + \dots \quad (2)$$

根据文献[30]中的伊藤引理, 可以得知:

$$(dX_t)^2 = \sigma^2 dt, (dt)^v = o(1), v > 1 \quad (3)$$

对于任意时间步长 Δt , OU过程有一个独特的解:

$$X_{t+\Delta t} = X_t e^{-\theta \Delta t} + \mu(1 - e^{-\theta \Delta t}) + \sigma \sqrt{\frac{1 - e^{-2\theta \Delta t}}{2\theta}} Z \quad (4)$$

式中, $Z \sim N(0, 1)$ 服从标准正态分布。因为本文中的物理量为离散化的时间序列, 故须将方程式(4)进行离散化, 得到:

$$x_{i+\Delta} = x_i e^{-\theta \Delta} + \mu(1 - e^{-\theta \Delta}) + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中, $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$; Δ 是估计的步长。令:

$$a = e^{-\theta \Delta}, b = \mu(1 - e^{-\theta \Delta}), \sigma_\varepsilon = \sigma \sqrt{\frac{1 - e^{-2\theta \Delta}}{2\theta}} \quad (6)$$

则式(5)可改写为:

$$x_{i+\Delta} = ax_i + b + \varepsilon_i, \varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2) \quad (7)$$

考虑到速率 $\theta > 0$, 则式(6)中的 $a \in (0, 1)$, 则可以将式(6)改写成:

$$\mu = \frac{b}{1-a}, \theta = -\frac{\log a}{\Delta}, \sigma = \sigma_\varepsilon \sqrt{\frac{-2 \log a}{(1-a^2)\Delta}} \quad (8)$$

本文设置RSSI时间序列的长度为 W , Δ 为离散时间序列的步长。设连续的RSSI时间序列值分别为 $x_i, x_{i+\Delta}, x_{i+2\Delta}, \dots, x_{i+W\Delta}$, 令:

$$M_x = \sum_{j=0}^W x_{i+j\Delta}, M_y = \sum_{j=1}^W x_{i+j\Delta}, M_{xx} = \sum_{j=0}^W x_{i+j\Delta}^2,$$

$$M_{yy} = \sum_{j=1}^W x_{i+j\Delta}^2, M_{xy} = \sum_{j=1}^W x_{i+(j-1)\Delta} x_{i+j\Delta},$$

$$A = \frac{WM_{xy} - M_x M_y}{WM_{xx} - M_x^2} \quad (9)$$

为了找到最优值 \hat{a} 、 \hat{b} 以及 $\hat{\sigma}_\varepsilon$, 可利用最小二乘法进行求解, 有:

$$\hat{a} = \begin{cases} A & 0 < A < 1 \\ 1 - \tau & A > 1 \\ \tau & A \leq 0 \end{cases}, \hat{b} = \frac{M_y - \hat{a}M_x}{W}$$

$$\hat{\sigma}_\varepsilon = \sqrt{\frac{WM_{yy} - M_y^2 - \hat{a}(WM_{xy} - M_xM_y)}{W(W-2)}} \quad (10)$$

式中, τ 是一个初始预设值, 符合 $0 < \tau < 1$ 。当 $\theta\Delta \ll 1$ 时, 则式(6)可以近似为:

$$a = e^{-\theta\Delta} \approx 1 - \theta\Delta, b = \mu(1 - e^{-\theta\Delta}) \approx \mu\theta\Delta,$$

$$\sigma_\varepsilon = \sigma \sqrt{\frac{1 - e^{-2\theta\Delta}}{2\theta}} \approx \sigma\sqrt{\Delta} \quad (11)$$

因此, OU模型的参数可以近似为:

$$\hat{\mu} = \frac{\hat{b}}{1 - \hat{a}}, \hat{\theta} = \frac{1 - \hat{a}}{\Delta}, \hat{\sigma} = \frac{\hat{\sigma}_\varepsilon}{\sqrt{\Delta}} \quad (12)$$

3.2 基于Logistic曲线模型的PSR估计

在接收到分组时, 使用OU模型对RSSI进行更新估计。然而RSSI只能定性分析无线信道的好坏, 并不能定量地得到具体的衡量指标。但一些无线传感器网络的协议与算法开发中, 对无线信道定量的分析结果是必不可少的。

本节中, 首先根据大量的实验得到RSSI与PSR之间的实验数据, 再使用RSSI与PSR之间的关系函数将估计的结果值映射出PSR值。接下来将介绍一种生长曲线函数Logistic, 曲线模型为:

$$\frac{dy}{dt} = \nu y \left(1 - \frac{y}{L} \right) \quad (13)$$

式中, y 是估计值; L 是 y 的极限值; ν 是生长速率常数。求解微分方程(13), 可以得到式(14)。解微分方程(14)的具体过程详见文献[31]:

$$y = \frac{L}{1 + ce^{-\nu t}} \quad (14)$$

式中, c 为常数。将式(14)中的分子归一化后, 可以得到:

$$y_i = \frac{1}{1/L + (c/L)e^{-\nu t}} \quad (15)$$

令 $m=1/L$, $n=c/L$, $k=e^{-\nu}$, 参数符合 $m>0$, $n>0$, $k>0$ 且 $k \neq 1$ 。这里可以将式(15)改写为:

$$y_i = \frac{1}{m + nk^t} \quad (16)$$

验证数据曲线能否利用Logistic曲线进行拟合, 可以利用样本数据的倒数的增长量比值是否与常数 n 接近, 即:

$$\frac{1/y_{t+1} - 1/y_t}{1/y_t - 1/y_{t-1}} \approx n \quad (17)$$

对于Logistic曲线的参数估计可以参照三和法

参数估计, 把时间序列的 M 个观察值分为3个相等的组 $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, $\{y_{N+1}, y_{N+2}, \dots, y_{2N}\}$ 与 $\{y_{2N+1}, y_{2N+2}, \dots, y_{3N}\}$, 每个组有 N 个观察值, $M=3N$ 。令:

$$y'_t = \frac{1}{y_t} = m + nk^t, S_1 = \sum_{t=1}^N y'_t,$$

$$S_2 = \sum_{t=N+1}^{2N} y'_t, S_3 = \sum_{t=2N+1}^{3N} y'_t \quad (18)$$

结合式(18)的所有等式, 可以得到:

$$\begin{cases} S_1 = \sum_{t=1}^N \hat{y}_t = \sum_{t=1}^N (m + nk^t) = \\ Nm + nk(1 + k + k^2 + \dots + k^{N-1}) \\ S_2 = \sum_{t=N+1}^{2N} \hat{y}_t = \sum_{t=N+1}^{2N} (m + nk^t) = \\ Nm + nk^{N+1}(1 + k + k^2 + \dots + k^{N-1}) \\ S_3 = \sum_{t=2N+1}^{3N} \hat{y}_t = \sum_{t=2N+1}^{3N} (m + nk^t) = \\ Nm + nk^{2N+1}(1 + k + k^2 + \dots + k^{N-1}) \end{cases} \quad (19)$$

因为 $(k-1)(1+k+k^2+\dots+k^{N-1}) = k^N - 1$ 。则式(19)可以改写为:

$$\begin{cases} S_1 = Nm + nk \frac{k^N - 1}{k - 1} \\ S_2 = Nm + nk^{N+1} \frac{k^N - 1}{k - 1} \\ S_3 = Nm + nk^{2N+1} \frac{k^N - 1}{k - 1} \end{cases} \quad (20)$$

对式(20)进行求解, 可以得到Logistic曲线函数的参数估计为:

$$\begin{cases} m = \frac{1}{N} \left[S_1 - \frac{nk(k^N - 1)}{k - 1} \right] \\ n = (S_2 - S_1) \frac{k - 1}{k(k^N - 1)^2} \\ k = \left(\frac{S_3 - S_2}{S_2 - S_1} \right)^{\frac{1}{N}} \end{cases} \quad (21)$$

根据式(21), 可以估计出Logistic曲线的所有参数。因为基于Logistic的生长曲线模型与链路质量的波动趋势非常类似, 通过上面的参数估计可以快速地链路包的成成功率PSR进行估计。

4 性能估计

图3为不同估计模型下的估计结果比较, 分别有实际数据、OU估计数据、EWMA估计^[13]数据以及Kalman估计^[27]数据。

在本文的估计结果中, EWMA的主要缺点是其

与OU过程相比具有很大的滞后性,EWMA的参数是经验值。然而,在不同的环境中,参数值不同,导致EWMA环境适应性的强度降低。虽然OU模型与EWMA模型相比具有额外的参数估计过程,但是OU模型显示的平均误差比EWMA模型低。

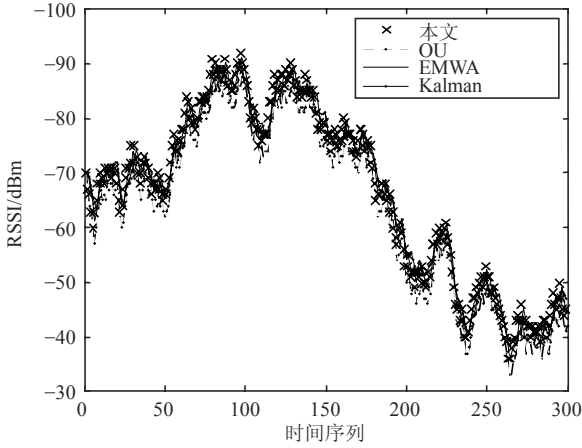


图3 不同估计模型评估结果与实际数据对比

此外,OU模型可以应用在不同的环境中。然而,卡尔曼估计的主要缺点是它仅为高斯和线性模型提供准确的结果。在本文的估计结果中,可以清楚地看到卡尔曼估计有一个很大的误差。

图4所示的是OU估计、EWMA和卡尔曼估计之间的均方误差。虽然OU具有瞬时误差,但总体精度较高。为了对包接收率进行估计,首先必须要解决如何获得包接收率问题。本文进行一些实验,并建立物理参数和分组接收速率之间的关系模型。

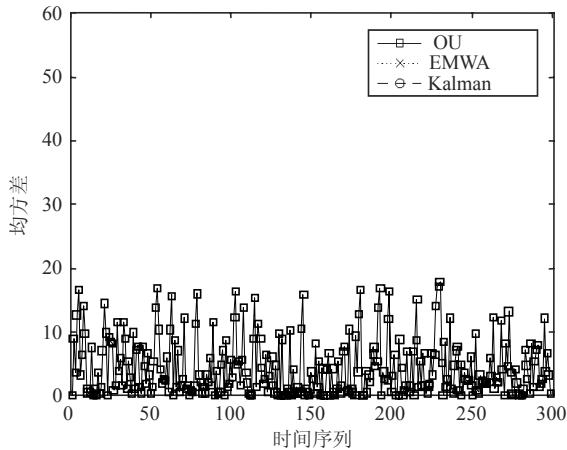


图4 不同估计模型评估结果的均方差对比

通过上面这个实验,可以发现无线物理信道参数RSSI与PSR在不同环境下均具有相似的关系曲线。图5给出了不同环境中RSSI和PSR之间的关系,如广场、室内和树林。可以看到,尽管测试环境之间的差异非常大,但RSSI和PSR之间的关系几乎相同。无线信号在自由空间的衰落与距离关系密切,

但在实际无线传输过程中,由于干扰与障碍等因素的影响,RSSI与距离的关系随着环境的改变而改变。然而接收到的信号强度越强,信噪比越大,硬件解调的成功率越高,所以RSSI与PSR在不同情况下的关系基本是一致的。

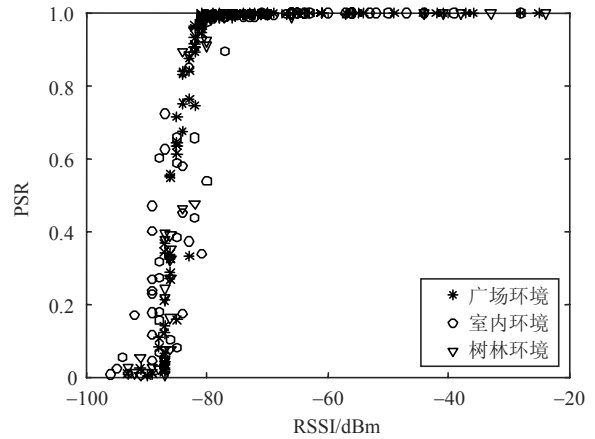


图5 不同测试环境下的RSSI与PSR之间的关系

图6中的曲线拟合使用Logistic模型对过渡区数据曲线拟合。通过Matlab得到曲线拟合的参数,最终得到式(22),后续的丢包率计算均可由式(22)得到。因为PSR=1-PLR,其中,丢包率PLR由Logistic函数得到,故有式(22)中过渡区函数形式:

$$PSR = \begin{cases} 1 & RSSI > -70 \\ 1 - \frac{1}{1 + 219.548 5e^{RSSI+79.926 2}} & -98 < RSSI \leq -70 \\ 0 & RSSI \leq -98 \end{cases} \quad (22)$$

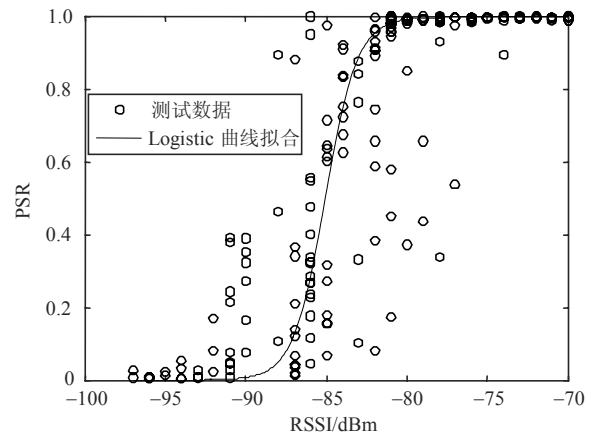


图6 利用Logistic模型的曲线拟合结果

在图6中,Logistic曲线基本上反映了RSSI和PSR之间的关系。Logistic曲线也称为生长曲线,其用于模拟生物生长过程。如前所述,RSSI和PSR之间的关系被分为3个区:稳定区、过渡区和空白区。

Logistic的S形曲线非常类似于RSSI和PSR之间的关系, 可以很容易地通过RSSI计算PSR。

然而, 尽管Logistic曲线拟合RSSI和PSR之间的关系, 但它只反映了曲线趋势规律, 事实上, 实际数据不可避免地存在一些扰动。

最后, 为了全面地演示本文的结果, 随机选取一段复杂环境下的RSSI数据, 该数据为周期为20 ms采样周期的RSSI时间序列。图7显示的是该时间序列以及经过OU模型估计后的结果比较。可以看出, 利用OU模型估计的结果要比原始的RSSI更加平滑。

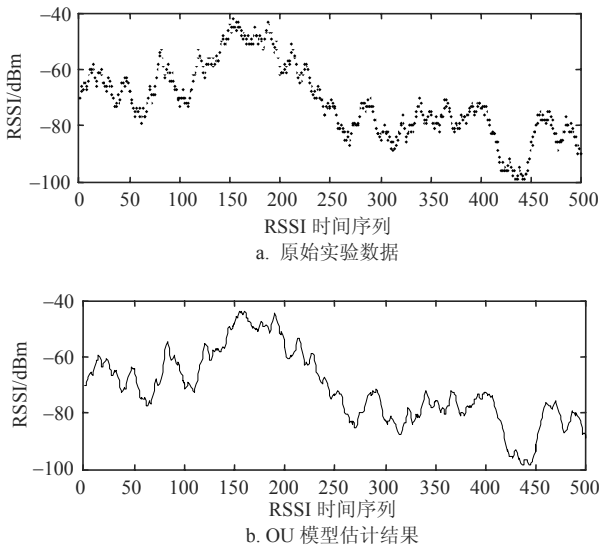


图7 周期为20 ms的复杂环境下RSSI时间序列以及经过OU模型估计后的结果比较

此外, OU模型估计结果与采样周期大小有关, 采样周期越短, 反映的信道情况越真实可靠, 而采样周期变长后, 其结果的估计精度会有所下降。图8分别给出了原始信号与不同采样周期情况下的结果对比。从该图中可以看出, 当采样周期为20 ms时, 在精度上更能贴近真实值, 而当采样周期增加到100 ms时, 估计结果只能反映信道质量的趋势。

图7与图8中给出了OU模型在不同采样周期下的物理量RSSI评估结果, 而RSSI通常只能定性评估信道的好坏, 并不能定量地反映出链路质量的具体结果。本文希望利用包成功率PSR对链路质量进行衡量。根据以上结果, 再结合Logistic生长曲线模型对RSSI进行映射, 以求得到需要的包成功率PSR。

图9对应于图7的RSSI映射结果, 图9a为直接利用采样得到的RSSI进行映射, 而图9b是进过OU模型评估后, 再结合Logistic函数映射得到的包成功率。与图7类似, 在图9中, 直接利用信道的RSSI值具有

明显的纹波, 而经过OU模型估计后, 可以减少信道中噪声带来的干扰, 提高估计结果的准确性。

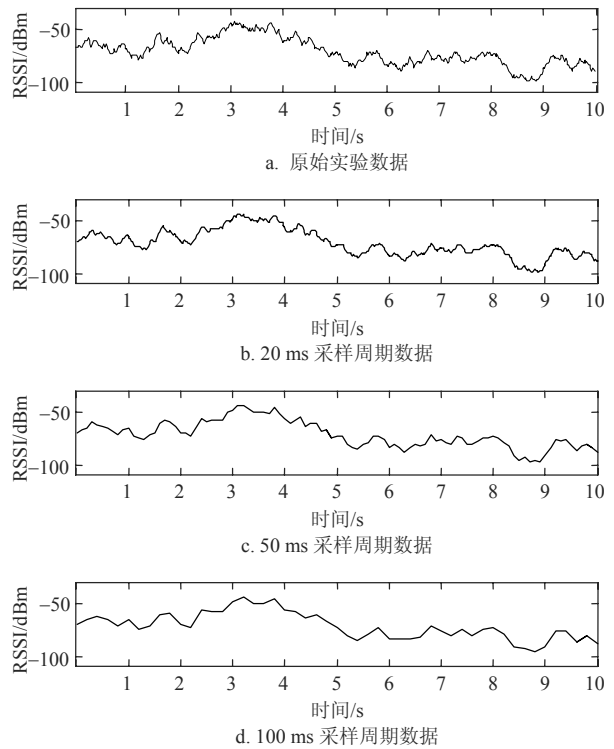


图8 原始信号与不同采样周期情况下的结果对比

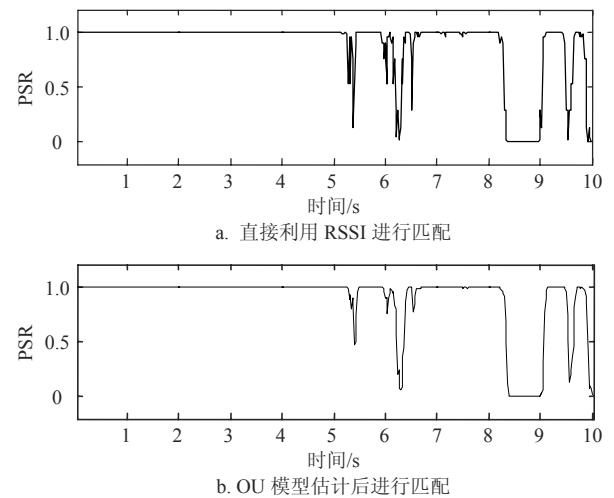
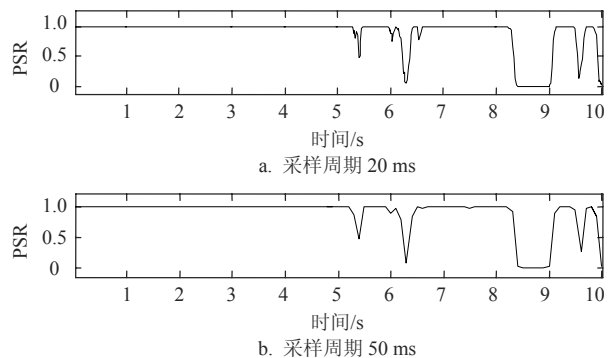


图9 利用Logistic模型对RSSI映射的结果



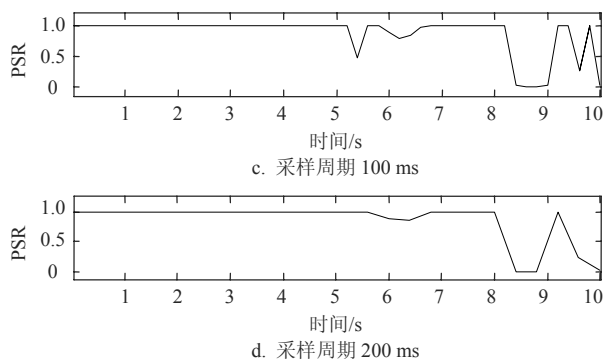


图10 基于OU模型的WSN链路质量综合估计结果

图9给出的是在20 ms采样周期下的PSR估计结果,信道的采样周期对估计结果精度是非常重要的参数。此外,RSSI采样周期的大小也影响信道的吞吐量以及网络节点功耗,在估计精度与功耗方面需要进行折中处理。

图10给出了不同采样率下的无线链路质量PSR估计结果,本文分别对20、50、100、200 ms 4种不同周期下的PSR估计结果进行对比,结果与预期的分析一致。当采样周期为20 ms时,模型对无线链路质量PSR指标衡量更能显示信道的准确性,而当采样周期增加到200 ms时,仅能反映无线信道的链路质量趋势性。在实际的无线链路质量估计过程中,采样周期可以根据实际的情况与PSR估计的精度而定。

本文提出的模型可以很好地运用到无线传感器网络数据传输可靠性方面,如冗余编码、路由决策策略等,给相关的方案设计提供很好的参考。

5 结束语

本文主要致力于对无线信道中的PSR的估计问题进行研究。为了改善现有PSR估计的一些问题,提出了一种基于OU模型的PSR估计方案,该方案首先对链路的物理量RSSI进行估计,从而估计出信道在下一时刻RSSI的最优估计,再根据大量的实际测试,得到RSSI与PSR之间的关系数据,并利用Logistic模型对RSSI与PSR的关系进行定量分析。通过对本文方案的实际验证,结果显示该方案在对变化的无线信道能做出快速的反应,降低了路由与重传开销,以最有效的方式反映出信道的变化以及对包成功率产生的影响。

参考文献

[1] 叶润. ZigBee节点设计与能量均衡分簇调度算法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
YE Run. ZigBee node design and energy equilibrium points

cluster scheduling algorithm research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
[2] 叶润, 王缓缓. 能量均衡多跳分簇路由算法[J]. 智能系统学报, 2014(5): 608-612.
YE Run, WANG Huan-huan. WSN energy balance multi-hop clustering routing algorithm[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014(5): 608-612.
[3] JAIN K, PADHYE J, PADMANABHAN V N, et al. Impact of interference on multi-hop wireless network performance [J]. Wireless Networks, 2005, 11(4): 471-487.
[4] LERTPRATCHYA D, BLOUGH D M. Interference-aware multicast trees and meshes for wireless multihop networks[J]. Ad Hoc Networks, 2016, 47: 99-113.
[5] KOKSAL C E, BALAKRISHNAN H. Quality-aware routing in timevarying wireless networks[EB/OL]. [2016-11-15]. <https://pdos.csail.mit.edu/archive/decouto/papers/koksal04.pdf>.
[6] YE Run, BOUKERCHE A, WANG Hou-jun, et al. RECODAN: an efficient redundancy coding-based data transmission scheme for wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2016, 110: 351-363.
[7] YE Run, BOUKERCHE A, WANG Hou-jun, et al. RESIDENT: a reliable residue number system-based data transmission mechanism for wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2016: doi: 10.1007/s11276-016-1357-1.
[8] YE Run, BOUKERCHE A, WANG Hou-jun, et al. E3TX: an energy-efficient expected transmission count routing decision strategy for wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2016: doi: 10.1007/s11276-017-1483-4.
[9] BACCOUR N, KOUBÂA A, MOTTOLA L, et al. Radio link quality estimation in wireless sensor networks: a survey[J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2012, 8(4): 34.
[10] BACCOUR N, KOUBAA A, JAMÂA M B, et al. RadiaLE: a framework for designing and assessing link quality estimators in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(7): 1165-1185.
[11] SHU Jian, TAO Juan, LIU Lin-lan, et al. CCI-based link quality estimation mechanism for wireless sensor networks under non-perceived packet loss[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 20(1): 1-10.
[12] BASU D, GUPTA G S. Energy efficient adaptive power control in indoor wireless sensor networks[C]//Foundations and Frontiers in Computer, Communication and Electrical Engineering: Proceedings of the 3rd International Conference C2E2. Mankundu, West Bengal, India: CRC Press, 2016: 305.
[13] RENNER C, ERNST S, WEYER C, et al. Prediction accuracy of link-quality estimators[C]//European Conference on Wireless Sensor Networks. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 1-16.
[14] LIU T, CERPA A E. Data-driven link quality prediction using link features[J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2014, 10(2): 37.
[15] BACCOUR N, KOUBÂA A, NODA C, et al. Radio link

- quality estimation in low-power wireless networks[M]. Heidelberg: Springer, 2013.
- [16] SENEL M, CHINTALAPUDI K, LAL D, et al. A Kalman filter based link quality estimation scheme for wireless sensor networks[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, 2007, GLOBECOM'07. [S.l.]: IEEE, 2007.
- [17] De COUTO D S J, AGUAYO D, BICKET J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[J]. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 419-434.
- [18] JAVAID N, BIBI A, JAVAID A, et al. Investigating quality routing link metrics in wireless multi-hop networks[J]. *Annals of Telecommunications-Annales Des Telecommunications*, 2014, 69(3-4): 209-217.
- [19] BACCOUR N, KOUBÂA A. Reliable link quality estimation in low-power wireless networks and its impact on tree-routing[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 27(C): 1-25.
- [20] BENKIC K, MALAJNER M, PLANINSIC P, et al. Using RSSI value for distance estimation in wireless sensor networks based on ZigBee[C]//15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, 2008, IWSSIP 2008. [S.l.]: IEEE, 2008: 303-306.
- [21] AGUAYO D, BICKET J, BISWAS S, et al. Link-level measurements from an 802.11 b mesh network[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2004, 34(4): 121-132.
- [22] SRINIVASAN K, DUTTA P, TAVAKOLI A, et al. Understanding the causes of packet delivery success and failure in dense wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. [S.l.]: ACM, 2006: 419-420.
- [23] CHIN E, CHIENG D, TEH V, et al. Wireless link prediction and triggering using modified Ornstein-Uhlenbeck jump diffusion process[J]. *Wireless Networks*, 2014, 20(3): 379-396.
- [24] MALLER R A, MÜLLER G, SZIMAYER A. Ornstein-Uhlenbeck processes and extensions[M]//Handbook of Financial Time Series. Berlin Heidelberg: Springer, 2009: 421-437.
- [25] MILLEFIORI L M, BRACA P, BRYAN K, et al. Long-term vessel kinematics prediction exploiting mean-reverting processes[C]//2016 19th International Conference on Information Fusion (FUSION). [S.l.]: IEEE, 2016: 232-239.
- [26] VAUGHAN A. Goodness of fit test: Ornstein-Uhlenbeck process[EB/OL]. [2016-11-05]. <https://www.whitman.edu/documents/academics/mathematics/2015/final%20project%20-%20vaughan.pdf>.
- [27] SENEL M, CHINTALAPUDI K, LAL D. A Kalman filter based link quality estimation scheme for wireless sensor networks[C]//Global Telecommunications Conference. [S.l.]: IEEE, 2007.
- [28] LIU Tao, CERPA A E. Foresee (4C): Wireless link prediction using link features[C]//2011 10th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). [S.l.]: IEEE, 2011.
- [29] LEVIS K. RSSI is under appreciated[C]//Proceedings of the Third Workshop on Embedded Networked Sensors. Cambridge, MA, USA: [s.n], 2006, 3031: 239242.
- [30] ITO K. On stochastic differential equations[J]. *American Mathematical Society*, 1951, 18(3): 491-508.
- [31] MINER J R. Pierre-François Verhulst, the discoverer of the logistic curve[J]. *Human Biology*, 1933, 5(4): 673-689.

编辑 漆蓉