

# 基于IEEE 802.15.4物理层的无线网络链路质量估计方法研究

史佳杰, 邱宇航, 龙海兵, 施伟斌\*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月28日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

链路质量估计是无线网络选择传输路径的基础, 本文对基于理论模型估计链路质量的方法进行了研究, 对IEEE 802.15.4接收机的接收成功率进行了分析, 并通过仿真验证了理论计算方法的正确性。本文进一步提出一种链路质量估计方法LEAS (Link Estimation with Asynchronous Samples), 利用异步采集的SINR样本按照简化的模型计算瞬时PSR估计值, 再通过滑动窗口和指数加权移动平均算法对PSR瞬时值进行滤波, 与现有方法相比, 本文提出的方法具有较高的估计精度, 无需离线训练模型, 并且, 通用性好, 计算开销较小, 适用于资源有限的无线传感器网络节点。实验结果显示, LEAS具有较高的精度, 在多种实验条件下平均的MSE为 $1.1 \times 10^{-2}$ 。

## 关键词

IEEE 802.15.4, 链路质量估计, Matlab仿真, PSR

# Research on Wireless Network Link Quality Estimation Method Based on IEEE 802.15.4 Physical Layer

Jiajie Shi, Yuhang Qiu, Haibing Long, Weibin Shi\*

School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 28<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 史佳杰, 邱宇航, 龙海兵, 施伟斌. 基于 IEEE 802.15.4 物理层的无线网络链路质量估计方法研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 4019-4034. DOI: 10.12677/mos.2024.133365

## Abstract

Link quality estimation is the basis of wireless network transmission path selection. This paper studies the method of link quality estimation based on theoretical model, analyzes the receiving success rate of IEEE 802.15.4 receiver, and verifies the correctness of the theoretical calculation method through simulation. This paper further proposes a Link Estimation method, LEAS (Link Estimation with Asynchronous Samples), which uses SINR samples collected asynchronously to calculate the instantaneous PSR estimates according to a simplified model. Then, the PSR transient value is filtered by sliding window and exponential weighted moving average algorithm. Compared with the existing methods, the proposed method has higher estimation accuracy, no need to train the model offline, and has good universality and low calculation cost, which is suitable for the nodes of wireless sensor networks with limited resources. The experimental results show that LEAS has high accuracy, and under various experimental conditions, the average MSE is  $1.1 \times 10^{-2}$ .

## Keywords

IEEE 802.15.4, Link Quality Estimation, Matlab Simulation, PSR

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

IEEE 802.15.4 是无线个域网技术标准, 专门为超低功耗、低数据速率[1]以及短距离通信而设计[2] [3], 目前已广泛应用于物联网领域。IEEE 802.15.4 标准[4] [5]定义了物理层(PHY)和介质访问控制层(MAC)协议, 而网络层和应用层等上层功能则是由 ZigBee 联盟定义的。

自 IEEE 802.15.4 技术出现以来, 已经有很多学者对其物理层性能进行了研究。例如 Petrova 等[6]研究的是 2.4 GHz 频段, 通过使用实际的硬件测量 RSSI、及 PER 来分析 IEEE 802.15.4 的特性和性能, 并给出了 IEEE 802.15.4 的 MAC 协议评估的仿真结果。Iskander 和 Koteng 等[7] [8]分析了 2.4 GHz 下 IEEE 802.15.4 的性能, 推导非相干检测下单符号错误概率的解析表达式, 并且研究相干解调技术, 进而提出了相干接收器架构。Gupta 等[9]对 IEEE 802.15.4 物理层方面进行了研究, 尤其是最佳接收机的功率谱和理论性能分析。并且在已知信号参数的情况下, 利用实际信号集分析相干和非相干接收机在 AWGN 信道下的误差性能。

鉴于直接利用理论模型预测链路质量存在困难, 文献[10]提出了一项快速链路质量估计方法, 利用指数加权卡尔曼滤波器稳定化接收信号强度指示器估计值, 并通过计算信噪比以及信噪比与收包率的映射关系来估计链路质量。这种方法只需少量数据包即可快速获得准确的链路质量估计。文献[11]描述了一种基于随机森林分类算法构建链路质量估计模型的方法。该方法利用随机森林回归算法建立链路质量预测模型, 可预测下一时刻的链路质量等级, 该模型有更高的预测正确率, 使得链路质量的估计更为可靠。文献[12]提出了一种新的链路估计器 4C, 它将链路质量预测与链路估计相结合, 包括三个步骤: 数据收集, 离线建模和在线预测, 将 RSSI、SNR 和 LQI 作为输入, 输出下一个数据包发送成功的概率, 具有计算开销小的优点。文献[13]提出一种基于卷积神经网络链路质量评估方法, 采用一维卷积层提取链路

质量参数的时序特征以及全连接层融合提取的时序特征来构建链路质量评估模型, 该估计方法相比阶梯网络, 其在室内、停车场等不同场景下的精确率分别提高了 4.02% 和 4.57%, 但存在计算复杂度高的问题。现有的基于机器学习的链路质量估计方法存在以下问题: 为了训练模型, 需要在不同条件下采集数据, 建立数据集的工作量较大, 构建出来的模型泛化性能较低; 如 SVM、神经网络模型等很多模型的算法复杂度较高, 不适用于无线传感器网络(WSN, wireless sensor network); 采用回归模型的方法的估计精度不够高; 现有方法多采用分类模型, 没有考虑与实际系统的适配问题。本文的目标是研究无需离线训练、低复杂度的 LQE 方法。

链路质量估计是网络层选择传输路径的重要基础, PRR (Packet Reception Rate) 是常用的链路质量度量指标, 当计算 PRR 的样本数量较大时, PRR 近似等于包成功接收的概率 PSR (Packet Success Rate), 本文分析影响 PSR 的主要因素, 给出 IEEE 802.15.4 接收机的 PSR 计算方法, 通过仿真和在真实环境中进行的实验对理论分析结果进行了验证, 并进一步提出一种链路质量估计方法 LEAS。

## 2. IEEE 802.15.4 物理层

本文主要研究的是 IEEE 802.15.4 在 2.4 GHz 频段信号的接收成功率, 2.4 GHz 频段是无线通信中广泛使用的 ISM 频段之一。IEEE 802.15.4 的 2.4 GHz 物理层采用的是 16 进制准正交调制技术[14], 其二进制数据转换为调制信号的流程框图如图 1 所示。

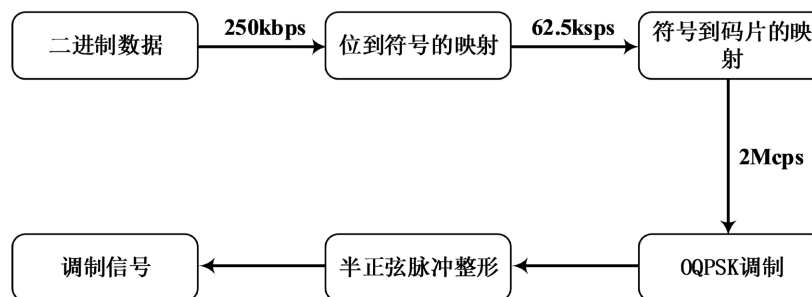


Figure 1. Modulation and spreading in IEEE 802.15.4

图 1. IEEE 802.15.4 中的调制和扩频

在 IEEE 802.15.4 信号传输过程中, 在每个数据符号周期内, 每 4 位原始数据被映射为一个符号, 然后将各符号映射到准正交的 PN 序列。将连续数据符号的 PN 序列串联起来, 组成连续的码片, 并使用偏移正交相移键控(O-QPSK)将码片序列调制到载波上。码片速率为  $R_c = 2 \text{ Mcps}$ , 符号速率为  $R_s = 62.5 \text{ ksps}$ , 码片速率是符号速率的 32 倍[15]。

IEEE 802.15.4 中 O-QPSK 的基带信号采用半正弦波, 相当于最小相位移频键控(Minimum Frequency-shift Keying, MSK), O-QPSK 的基带码片序列的数学表达式为:

$$p(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \frac{t}{2T_c}\right), & 0 \leq t \leq 2T_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

## 3. 接收成功率的理论分析

### 3.1. BER、PSR 的理论计算

与图 1 对应, 标准接收机依次通过解调、解扩恢复原始信息, 在 IEEE 802.15.4-2006 标准中给出了

存在干扰条件下 BER 计算公式[16]:

$$BER = \frac{8}{15} \times \frac{1}{16} \times \sum_{k=2}^{16} (-1)^k \binom{16}{k} e^{\left(20 \times SINR \times \left(\frac{1}{k} - 1\right)\right)} \quad (2)$$

802.15.4 标准采用扩频技术, 扩频后的码片速率为 2 Mcps, 信息速率为 250 kbps, 根据 SINR 和  $E_b/N_0$  的关系, 可以得到:

$$SINR = \frac{E_b \times R_b}{N_0 \times W} = \frac{E_b \times 250k}{N_0 \times 2M} = \frac{E_b}{N_0} \times \frac{1}{8} \quad (3)$$

其中,  $E_b$  表示一个比特的平均能量,  $N_0$  表示噪声功率谱密度。对于扩频系统, 当以 dB 为单位时, SINR 和  $E_b/N_0$  相差一个常数, 该数值为处理增益。

根据式(2)和式(3)计算得到 BER 的理论值后, 根据 BER 和 PER 及 PSR 的关系, 可以得到 PER 和 PSR:

$$PER = 1 - (1 - BER)^L \quad (4)$$

$$PSR = 1 - PER = (1 - BER)^L \quad (5)$$

其中,  $L$  为一个数据帧所包含的比特数。根据以上分析, 在物理帧长度为 26 byte 的情况下, BER-SINR、PSR-SINR 的曲线如图 2、图 3 所示。

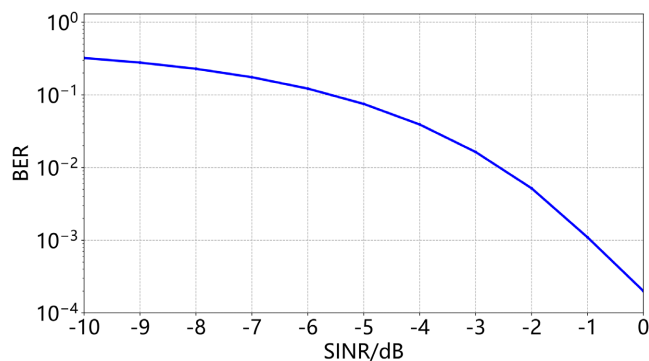


Figure 2. The relationship curve between BER and SINR is obtained according to theoretical analysis

图 2. 根据理论分析得到的 BER 与 SINR 的关系曲线

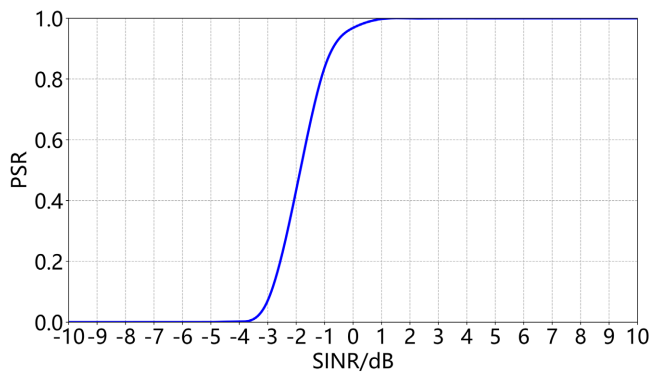


Figure 3. The relationship curve between PSR and SINR is obtained according to theoretical analysis

图 3. 根据理论分析得到的 PSR 与 SINR 的关系曲线

### 3.2. 相干接收机

相干接收机是一种在理论上最优的接收机结构，能够最大化地接收传输信号中的信息。通过分析相干接收机能够确定性能的理论上限，即在最理想条件下能够实现的最好性能，为链路质量估计模型的研究提供一个性能的参照基准，有助于提高模型的准确性、适应性和实用性。

在本节中，主要对相干接收机进行性能分析。在通信系统中的符号数量较多、离散度较高的情况下，提供精确的错误率表达式较为困难，需要采用其他方法进行性能界定或近似估计。在 IEEE 802.15.4 标准中所采用的 16 进制 PN 序列不是严格正交的，因此，本节将根据符号错误概率  $P_s$  的联合上界求解 BER 与 SINR 的关系。

根据 IEEE 802.15.4 标准的定义，发射机通过生成不同的波形  $s_i(t)$ ， $i=0,1,\dots,15$ ，将数字信息以特定的形式发送出去。每个波形的持续时间为  $33T_c$ ，其中  $T_c$  为 0.5。假设信号是在 AWGN 信道上进行传输，同时，传播延迟和载波相移是已知的，并且可以通过合适的补偿措施进行纠正，其最优相干接收机的结构如图 4 所示。

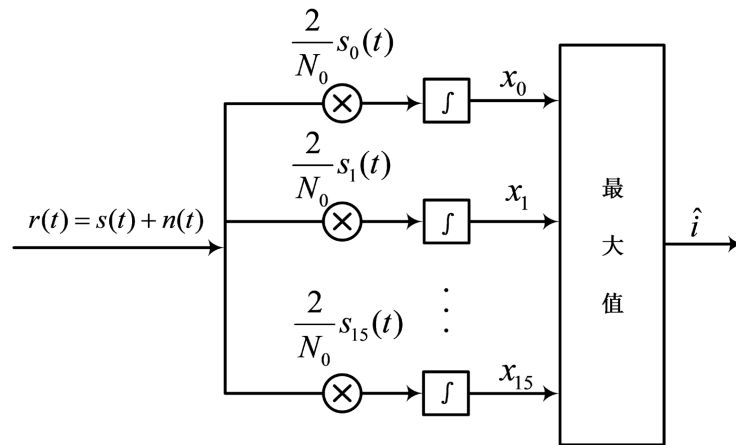


Figure 4. Optimal coherent receiver for  $M = 16$  equal energy signals  
图 4.  $M = 16$  的等能量信号的最优相干接收机

在图 4 中， $r(t)$  为接收到的信号，其表达式为：

$$r(t) = s_i(t) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (6)$$

式中， $n(t)$  是均值为零的 AWGN 噪声，其两侧功率谱密度为  $N_0/2W/Hz$ 。

根据文献[9]，可以得到符号错误概率  $P_s$  的上界为：

$$P_s \leq \sum_{i=0}^{15} Q \left( \sqrt{\frac{4E_b(1-R(\rho_{0i}))}{N_0}} \right) \quad (7)$$

将表 1 中给出的相关系数代入式(7)，可以得到相干接收机的符号错误率表达式为：

$$P_s \leq 3Q \left( \sqrt{\frac{4E_b}{N_0}} \right) + 6Q \left( \sqrt{\frac{5E_b}{N_0}} \right) + 2Q \left( \sqrt{\frac{4.5E_b}{N_0}} \right) + 2Q \left( \sqrt{\frac{3E_b}{N_0}} \right) + 2Q \left( \sqrt{\frac{3.5E_b}{N_0}} \right) \quad (8)$$

**Table 1.** Spectrum of normalized correlation coefficient  
**表 1.** 归一化相关系数谱

$R(\rho_{0i})$	0	-0.25	-0.125	+0.25	+0.125	+1
频谱	3	6	2	2	2	1

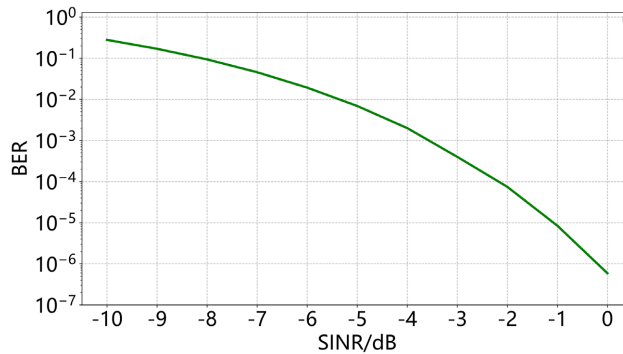
根据式(2)可以知道  $E_b/N_0 = 8 * SINR$ ，将其代入式(8)可以得到  $P_s$  与 SINR 之间的关系：

$$P_s \leq 3Q(\sqrt{32 * SINR}) + 6Q(\sqrt{40 * SINR}) + 2Q(\sqrt{36 * SINR}) + 2Q(\sqrt{24 * SINR}) + 2Q(\sqrt{28 * SINR}) \tag{9}$$

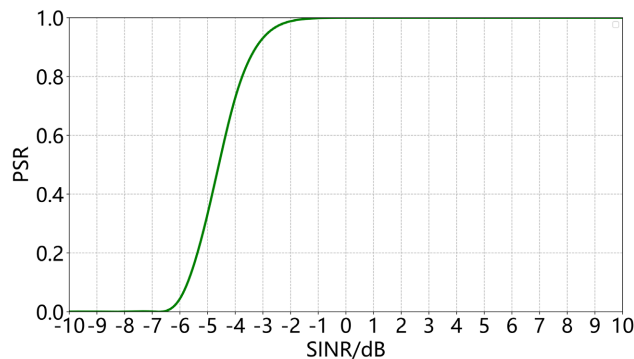
根据 BER 和  $P_s$  之间的关系，最后可以得到：

$$BER = \frac{8}{15} \times P_s \tag{10}$$

在得到 BER 后，可以分析得到 BER 与 SINR 之间的关系，并根据 BER 可以求得 PER 和 PSR，其 BER-SINR、PSR-SINR 的曲线如图 5 和图 6 所示。



**Figure 5.** The coherent detection curve of BER-SINR  
**图 5.** BER-SINR 相干检测曲线



**Figure 6.** The coherent detection curve of PSR-SINR  
**图 6.** PSR-SINR 相干检测曲线

### 3.3. 物理层收发模型仿真

根据 IEEE 802.15.4 标准，物理层的发射机和接收机结构的设计如图 7 和图 8 所示。其中，发射机主

要是将要发送的数据转换为电信号，再使用调制技术将数字电信号调制为模拟的无线信号，最终将调制后的信号发送出去[17] [18]。

接收机主要是将接收到的调制信号进行解调，再对解调后的信号进行符号到比特的变换，最终将变换后得到的信号与发送时的原信号进行比较，从而进行误码计算。

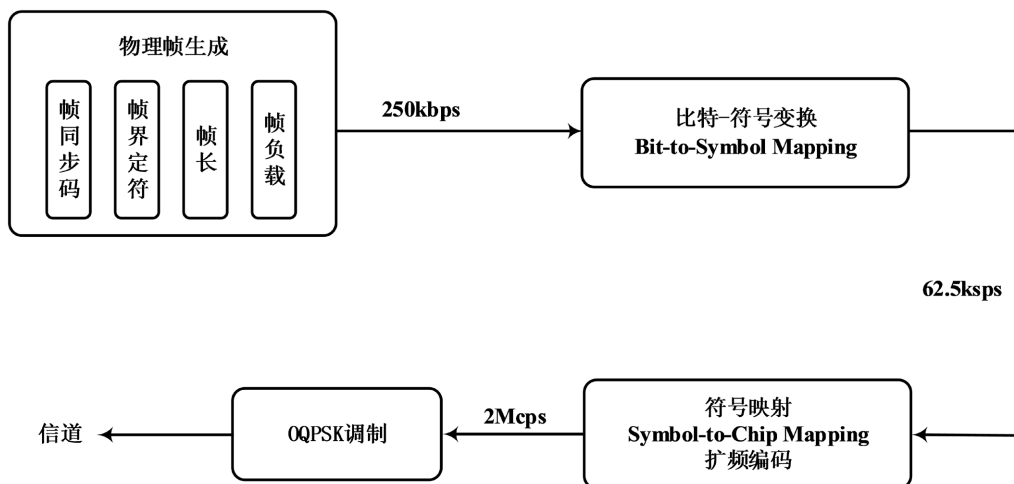


Figure 7. The structure of transmitter  
图 7. 发射机结构

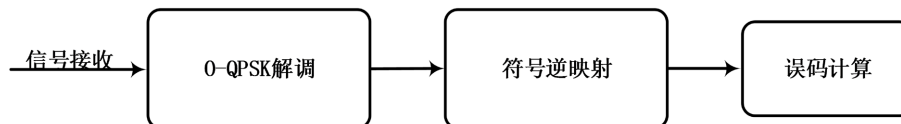


Figure 8. The structure of receiver  
图 8. 接收机结构

在仿真中，一个物理帧的长度设置为 26 bytes，其中包括 4 bytes 同步头(Preamble)、1 byte 数据帧定界符(SFD)、1 byte 数据帧负载长度(Frame Length)和 20 bytes 物理数据帧负载(PSDU)。

在 Matlab 中搭建仿真模型时，本节以上述的发射机和接收机为基础，采用 AWGN 信道，用随机整数生成器来代替发射机结构中物理帧的生成，仿真模型如图 9 所示，其主要包括以下构建块[19] [20]: 扩频器，解扩器，O-QPSK 调制器，O-QPSK 解调器和 AWGN 信道。

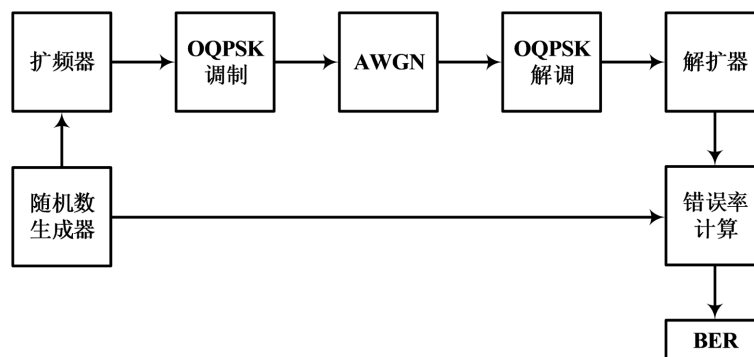


Figure 9. Physical layer sending and receiving simulation model  
图 9. 物理层收发仿真模型

在 IEEE 802.15.4 的 2.4 GHz 频段，其部分符号码片映射如表 2 所示，在仿真中采用随机整数生成器来生成 0 到 15 的随机数，随后将这些整数作为扩频器的输入，并根据表 1 将其扩展为 32 位，即符号映射。然后将扩展后的 32 位作为 OQPSK 调制的输入。调制后，通过 AWGN 信道将噪声添加到调制流中，后者再进行 O-QPSK 解调。

**Table 2.** Symbol-to-chip mapping  
**表 2.** 符号码片映射表

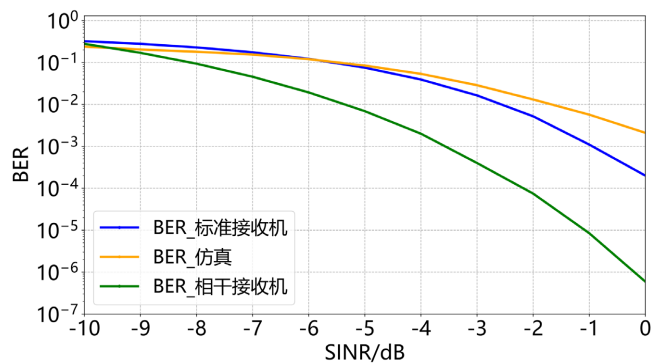
序列	码片序列( $C_0, C_1, C_2, \dots, C_{31}$ )
0	11011001110000110101001000101110
1	11101101100111000011010100100010
2	00101110110110011100001101010010
3	00100010111011011001110000110101
...	...
15	11001001011000000111011110111000

接收数据的 BER 按以下方法计算，在 O-QPSK 解调后之后，得到 32 位的二进制编码，32 位编码被发送到解扩器，解扩器将它们转换回整数。然后，通过转换器，将整数转换为 4 位流。最后，将 4 位流与原始流进行比较，并计算 BER [21]。

将第二节给出的标准接收机、相干接收机和本节仿真结果放在一起，三者的 BER-SINR 和 PSR-SINR 的仿真曲线如图 10 及图 11 所示。

从图 7 中可以观察到，Matlab 仿真曲线与采用 IEEE 802.15.4-2006 给出的 BER 公式得到的曲线是比较接近的，与标准接收机相比，相干接收机的 BER 随 SINR 的增大而下降得更为明显，说明相干接收机性能更好。在 BER 为  $10^{-2}$  的情况下，Matlab 仿真和相干接收机之间的差距约为 1.91 dB，标准接收机的计算结果与 Matlab 仿真之间的差距约为 0.89 dB，而 Matlab 仿真结果与相干接收机的理论计算值之间的差距相对较大，约为 2.8 dB。

如图 8 所示，可以观察到在特定区间内 PSR 与 SINR 在呈现近似线性关系，PSR 随 SINR 快速上升。标准接收机的近似线性区间为 -4 dB 到 1 dB，Matlab 仿真的近似线性区间为 -3 dB 到 2 dB，相干接收机下的近似线性区间为 -7 dB 到 -1 dB。当 PSR 为 0.8 时，三条曲线的 SINR 差距相对较大，标准接收机的理论计算结果与 Matlab 仿真之间的差距约为 1.40 dB，与相干接收机的计算值之间的差距约为 2.62 dB。



**Figure 10.** The curve of BER-SINR  
**图 10.** BER-SINR 曲线



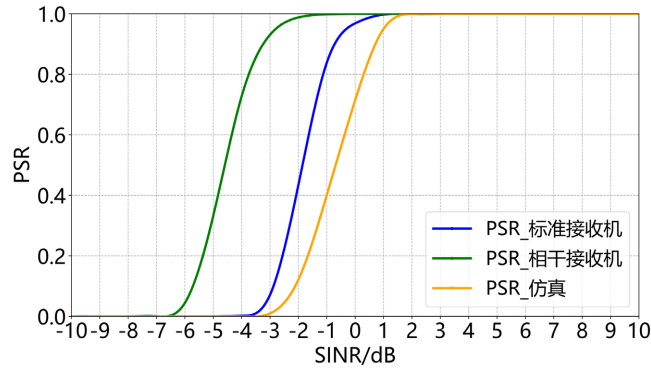


Figure 11. The curve of PSR-SINR  
图 11. PSR-SINR 曲线

#### 4. 链路质量估计方法 LEAS

现有研究以及本文的实验结果显示(见本文实验部分), 直接运用理论模型估计 PSR 会出现很大的误差, 因此需要研究精度更高且计算复杂度较低的链路质量估计方法。

根据通信原理, 干扰和噪声可以近似按平稳随机过程处理, 由于平稳随机过程的一维概率密度函数与时间  $t$  无关, 因此, 采用不同时刻获取的样本计算均值应近似相等。包接收和 SINR 样本采样是两个异步进行的过程, 特定时刻  $t$  进行的包接收可以抽象为服从  $B(1, p)$  分布随机变量  $X(t)$ ,  $X(t)$  的均值为 PRR, 在平稳随机过程的假设下,  $X(t)$  和在  $t'$  时刻采样的 SINR 所确定的 PSR( $t'$ ) 可以看作同一随机过程的两个样本函数, 两者的均值应近似相等。基于以上原理, 本文提出一种链路质量估计方法 LEAS, 通过与包的接收异步进行的抽样过程获取 SINR 样本, 按照简化的模型估计 PSR, LEAS 包括以下步骤:

1) 各节点按特定的周期采集的干扰与噪声强度样本 INS, 按式(11)计算各邻居节点对应的 SINR<sub>ij</sub>, 其中, RSS<sub>i</sub> 为邻居节点  $i$  对应的接收信号强度, 每当接收到邻居点  $i$  的包时, 将更新对应的接收信号强度 RSS<sub>i</sub>。

$$\text{SINR}_{ij} = \text{RSS}_i - \text{INS} \quad (11)$$

2) 按简化的模型计算 PSR 的瞬时值, 简化模型通过采用实测的数据修正理论模型并对过渡区域进行简化得到, 如式(12)所示。

$$f(\text{SINR}) = \begin{cases} 0, & \text{SINR} < 1 \\ \frac{1}{4}\text{SINR} - \frac{1}{4}, & 1 \leq \text{SINR} \leq 5 \\ 1, & \text{SINR} > 5 \end{cases} \quad (12)$$

根据上式, 当 SINR 小于 1 dB 的时候, PSR 的瞬时预测值为 0, 当 SINR 大于 5 dB 的时候, PSR 的瞬时预测值为 1, 其他情况则根据线性关系来对 PSR 进行预测。

3) 按特定的窗口  $T$  计算 PSR 均值:

$$\overline{\text{PSR}}_{ik} = \frac{\sum_{j=k-N+1}^k \text{PSR}_{ij}}{N} \quad (13)$$

其中,  $N$  为时间窗口  $T$  中发送的数据包的数量。

4) 计算 EWMA, 计算方法如下式所示:

$$y_{i0} = \overline{\text{PSR}}_{i0} \quad (14)$$

$$y_{ik} = \alpha \cdot \overline{\text{PSR}}_{ik} + (1-\alpha) \cdot y_{ik-1} \tag{15}$$

其中， $\alpha=0.1$ 。将经过 EWMA 滤波得到的结果作为当前节点与邻居节点  $i$  之间链路的 PSR 的估计值。

## 5. 实验结果与分析

### 5.1. 对理论模型的预测与实验结果分析

为了测试理论模型应用于实际网络时的性能，参考文献[22]设计了实验系统，系统中包括四种类型的节点：接收节点、同步节点、干扰节点和发送节点，如图 12 所示。同步节点用于每次传输之前向发送节点、接收节点和干扰节点广播同步包，当接收到同步包时，发送节点和干扰节点向接收节点发送数据包，接收节点则分别进行信号强度检测和接收。发送节点和干扰节点相互轮换，当干扰节点单独发送时，此时接收节点测得的信号强度即是干扰和噪声。

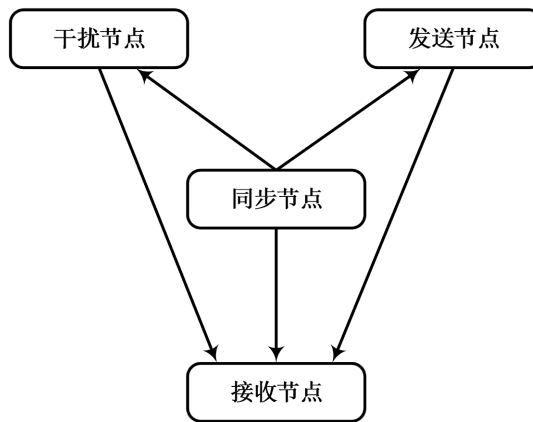


Figure 12. The placement of experiment  
图 12. 实验节点布局

本次实验的基本方法如下：

当发送数据时禁用 MAC 层的 CSMA/CA 机制，使不同节点可以同步发送。



Figure 13. The progress of sending  
图 13. 发送过程

为节点 1 和节点 2 在 -22~4.5 dBm 区间设置 16 种发射功率，节点 1 和节点 2 互为干扰源，当以节点 1 作为发送节点时，则节点 2 发送的信号会对节点 1 产生干扰，反之亦然。在采集过程中，节点 1 的功率逐步增加，节点 2 则逐渐减小，因此，前半段节点 2 的功率较大，后半段节点 1 的功率较大。发送节

点和接收节点按照同步信号进行周期的收发操作，如图 13 所示，每个周期分为 3 个阶段，在第 1 和第 2 阶段，节点 1 和节点 2 分别单独发送，接收节点依次检测节点 1 和节点 2 发送的信号强度，在第 3 阶段节点 1、2 同时发送，接收节点接收数据。

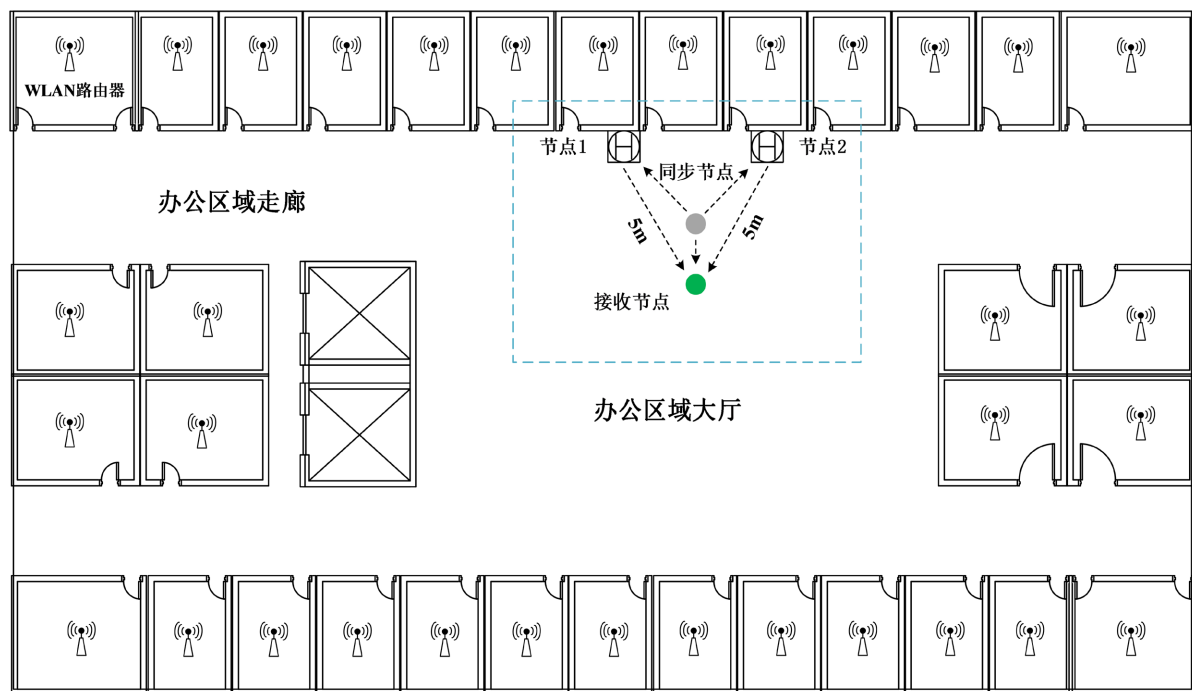
每种发射功率下发送 400 个数据包，总计发送 6400 个数据包。数据包之间间隔为 100 ms，信道设置为 26，具体的实验参数如表 3 所示。

**Table 3.** Experimental parameters

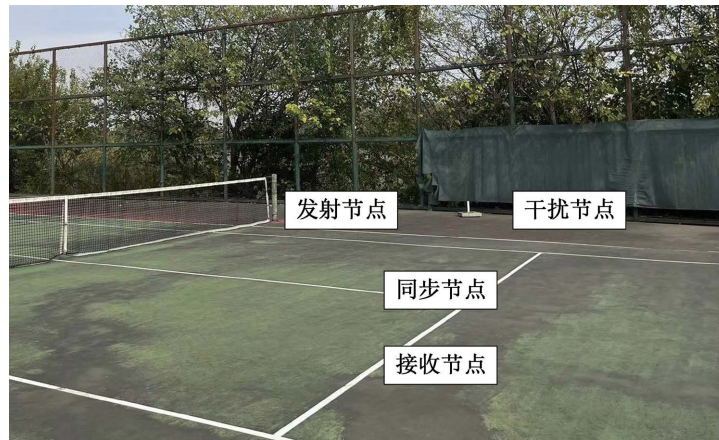
**表 3.** 实验参数

参数	多对一通信	
	办公区域大厅	网球场
实验环境	办公区域大厅	网球场
距离	5 m	
节点数	1 个接收节点、2 个发送节点、1 个同步节点	
传输功率	-22 dBm~4.5 dBm 区间设置 16 种	
包数量	6400	
信道	26	

分别在学校光电楼办公区域大厅和网球场进行实验，干扰节点和发送节点距离接收节点的距离为 5 m，实验环境、节点的部署方式以及节点数量，如图 14 所示。本文实验中使用的无线传感器网络节点为 CC2530 模块，软件利用 TinyOS 开发，传感器节点将采集到的链路质量参数发送给接收节点，接收节点通过串口将数据发送到上位机，并由上位机进行数据处理和存储。



(a) 光电楼办公区域大厅



(b) 网球场

Figure 14. Different experimental conditions  
图 14. 不同实验条件

在实验中，为了计算 PRR 引入了一个新的参数，命名为 receive，并将采集到的数据的 receive 参数置为 1，填充的缺失数据则将 receive 置为 0。然后，通过将 receive 的总和与发送的数据包数量进行比较，可以计算得到 PRR：

$$PRR = \frac{\sum receive}{W} \tag{16}$$

其中 W 为窗口大小，设置为 100，即 PRR 等于每个窗口中发送的 100 个数据包中被接收节点成功收到的数据包的数量。

在实验中，接收节点会接收到节点 1 和节点 2 各自发送的数据包，根据在不同实验场景中采集到的数据，可以绘制出不同节点的 PRR-SINR 样本，如图 15 和图 16 所示。

从图中可以观察到散点图呈现了与三条曲线相似的趋势，即在 SINR 达到某个特定的值后，PSR 明显增大。散点图相比曲线往右偏移，这可能是由硬件问题引起的偏差[23]。在高信噪比下，PSR 趋近于 1，但并没有达到 1，这与实际环境中存在的干扰源有关，如 Wi-Fi、蓝牙等，对比图 12 与图 13 可以看出，在网球场的实验结果中异常值少，同样与环境干扰有关，网球场位于江边，干扰较少，而在教学楼存在较多的 Wi-Fi 干扰，导致更多的异常值。

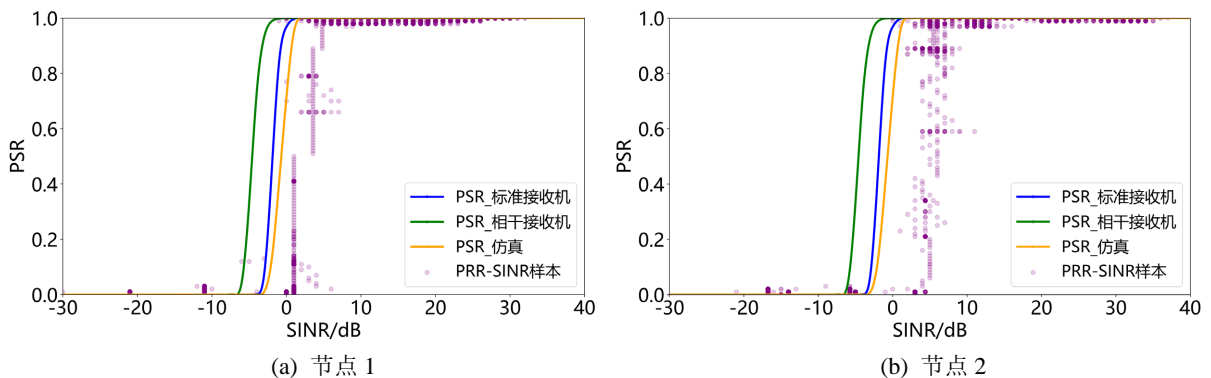


Figure 15. The result of the tennis court experiment  
图 15. 网球场实验结果

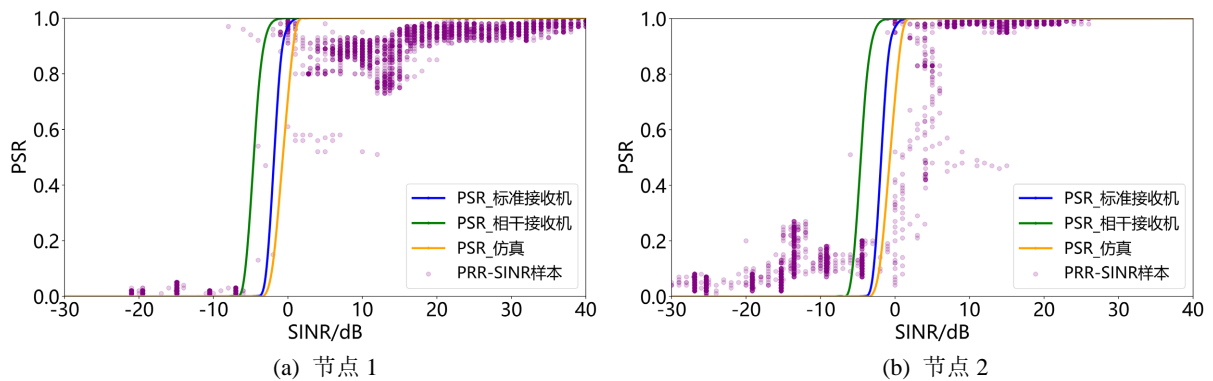


Figure 16. The result of the teaching building experiment  
图 16. 光电楼实验结果

在实际应用场景中，干扰源通常是不受控制的，因此实际网络中的节点并不能准确测量干扰强度，图 17 显示了在光电楼办公区域进行实验的结果，此时没有受控干扰源，接收节点每次接收到数据时立即读取 RSSI 寄存器，将读取结果作为干扰和噪声强度，从图 17 可以看到，实测的 PSR 与 SINR 的关系与理论计算结果差别明显，直接运用理论模型估计 PSR 显然会出现很大的误差。

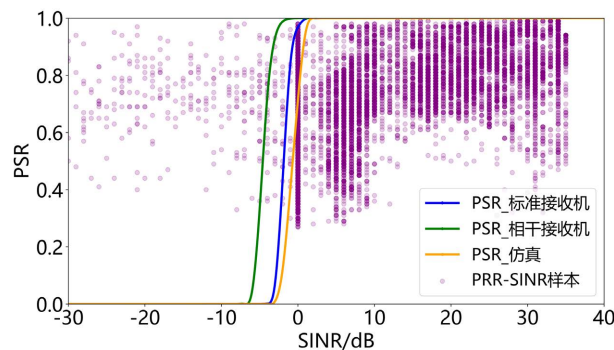
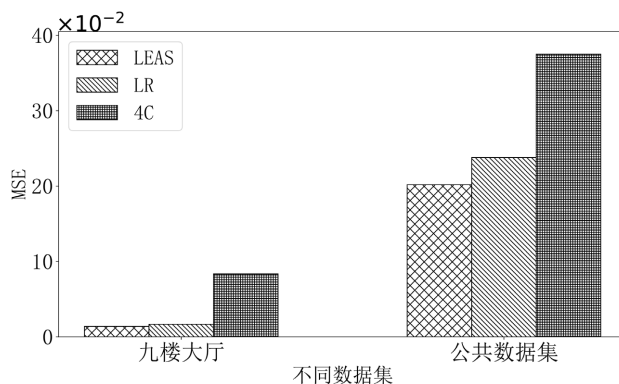


Figure 17. The real situation of PSR-SINR scatter plot  
图 17. 光电楼办公区域的 PSR-SINR 散点图

## 5.2. 链路质量估计方法 LEAS 的测试

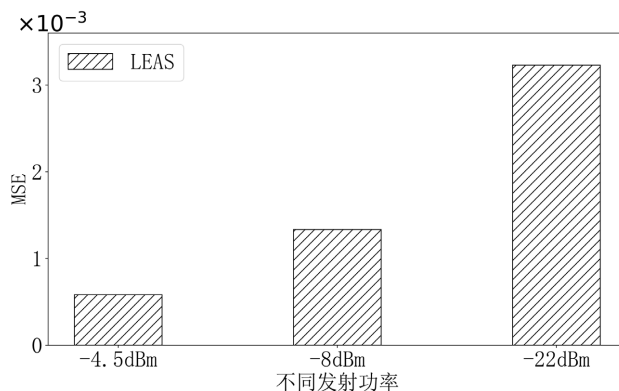
本文采用三种不同的数据集对 LEAS 的链路质量估计性能进行实验验证。第一个数据集为公共数据集 due [24]，该数据集使用 TelosB 节点采集，数据集中包括间隔 10~30 m 条件下采集的 RSSI、LQI 等参数，该数据规模较大，本文使用了其中 25 米条件下第 2 轮采集的数据，共包括约 240 余万条记录。第二个数据集是在学校光电楼办公区域大厅的环境下用 CC2530 芯片的节点采集，采用直线部署的方式，间隔为 5 m，为一对一通信，数据集中包括 RSSI、SNR、LQI 和 PRR 等参数。第三个数据集是在地下停车场的环境下采集的，节点类型与部署方式第二个数据集一样，不同的是多对一的通信，数据集中同样包括 RSSI、SNR、LQI 和 PRR 等参数。分别对公共数据集和九楼大厅数据集用 LEAS、线性回归(Linear Regression, LR)以及文献[12]中的 4C 方法对 PSR 预测，其结果如下图 18 所示。

可以看到，本文提出的 LEAS 的误差小于其他两种方法，与线性回归和 4C 相比，LEAS 链路质量估计方法的平均 MSE 分别降低了 18% 和 112%。LEAS 与 4C 方法相比，LEAS 依据通信原理，采用相同窗口的 SINR 均值估计 PSR 均值，输入参数与输出量之间的相关性较高，4C 输入参数 LQI 的窗口为 1，与 PRR 的统计窗口不同，相关性较小。



**Figure 18.** The comparison of MSE under different methods  
**图 18.** 不同方法下的 MSE 对比

为了进一步测试 LEAS 在不同条件下的性能，采用地下停车场的数据集进行了测试，不同发射功率下的 MSE 如图 19 所示。



**Figure 19.** The comparison of MSE under different transmitting power  
**图 19.** 不同发射功率下 MSE 对比

从图 19 可以看出，随着发射功率的增大，LEAS 的 MSE 逐渐减小，但在不同的功率下，LEAS 都有着较高的估计精度，这表明该模型具有较好的通用性。

## 6. 结论

本文对基于 IEEE 802.15.4 物理层的无线链路的性能进行了研究，实验结果显示，在已知干扰强度的情况下，理论模型与实测的 PSR-SINR 关系较接近，而当干扰强度测量不准确时，理论模型与实测的 PSR-SINR 关系存在显著差异。本文提出的一种基于简化模型的链路质量估计方法 LEAS，采用不同数据集进行测试，均具有较高的精度。实验结果表明，LEAS 在不同实验条件下的精度均优于线性回归和 4C 模型，在多种实验条件下平均的 MSE 为  $1.1 \times 10^{-2}$ 。下一步将在实际的 WSN 系统中实现 LEAS，在线测试链路质量估计的性能，并与其他传统方法进行比较。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(61374040)；国防基础研究资助项目；上海理工大学科技发展资助项目

(2020KJFZ082)。

## 参考文献

- [1] Luca, D., Laura, B., Antonio, C., *et al.* (2018) From Micro to Macro IoT: Challenges and Solutions in the Integration of IEEE 802.15.4/802.11 and Sub-GHz Technologies. *IEEE Internet of Things Journal*, **5**, 784-793. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2747900>
- [2] Sun, Y., Sun, Y., Xu, P., *et al.* (2013) Performance Analysis of Wireless Sensor Network Based on OPNET. *Communications and Network*, **5**, 512-516. <https://doi.org/10.4236/cn.2013.53B2094>
- [3] Pablo, J.G. and Antonio, T. (2021) Model of a Device-Level Combined Wireless Network Based on NB-IoT and IEEE 802.15.4 Standards for Low-Power Applications in a Diverse IoT Framework. *Sensors*, **21**, Article 3718. <https://doi.org/10.3390/s21113718>
- [4] Abdulla, A., Wael, E., Nedal, A., *et al.* (2022) Secure Energy Aware Routing Protocol for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. *Journal of Engineering, Design and Technology*, **20**, 569-594. <https://doi.org/10.1108/JEDT-05-2020-0179>
- [5] Guo, W., Healy, W.M. and Zhou, M.C. (2012) Impacts of 2.4-GHz ISM Band Interference on IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Network Reliability in Buildings. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **61**, 2533-2544. <https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2188349>
- [6] Petrova, M., Riihijarvi, J., Mahonen, P., *et al.* (2006) Performance Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and Simulations. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2006. WCNC 2006, Las Vegas, 3-6 April 2006, 487-492. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2006.1683512>
- [7] Iskander, C.D. (2006) Performance Analysis of IEEE 802.15.4 Noncoherent Receivers at 2.4 GHz under Pulse Jamming. 2006 *IEEE Radio and Wireless Symposium*, San Diego, 17-19 January 2006, 327-330.
- [8] Koteng, R.M. (2006) Evaluation of SDR-Implementation of IEEE 802.15.4 Physical Layer. Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [9] Gupta, P. and Wilson, S.G. (2008) IEEE 802.15.4 PHY Analysis: Power Spectrum and Error Performance. 2008 *Annual IEEE India Conference*, Kanpur, 11-13 December 2008, 171-176. <https://doi.org/10.1109/INDCON.2008.4768821>
- [10] 夏宇, 刘伟, 罗嵘, 等. 基于指数加权卡尔曼滤波的快速链路质量估计[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(8): 58-61. [https://doi.org/10.13873/J.1000-9787\(2020\)08-0058-04](https://doi.org/10.13873/J.1000-9787(2020)08-0058-04)
- [11] 刘琳岚, 高声荣, 舒坚. 基于随机森林的链路质量预测[J]. *通信学报*, 2019, 40(4): 202-211.
- [12] Liu, T. and Cerpa, A.E. (2011) Foresee (4C): Wireless Link Prediction Using Link Features. *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, Chicago, 12-14 April 2011, 294-305.
- [13] 吕辉. 基于卷积阶梯网络的链路质量评估[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.
- [14] Nithya, V., Ramachandran, B. and Bhaskar, V. (2014) BER Evaluation of IEEE 802.15.4 Compliant Wireless Sensor Networks under Various Fading Channels. *Wireless Personal Communications*, **77**, 3105-3124. <https://doi.org/10.1007/s11277-014-1698-y>
- [15] 唐茂顺. 基于MATLAB的IEEE 802.15.4j物理层关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [16] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee (2003) IEEE Std 802.15.4-2003 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York.
- [17] 张浩. 基于IEEE 802.15.4协议的物理层比特位错误特性分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [18] Evan, F., Zelin, Y., Shengli, Z., *et al.* (2021) An Advanced GNU Radio Receiver of IEEE 802.15.4 OQPSK Physical Layer. *IEEE Internet of Things Journal*, **8**, 9206-9218. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3057472>
- [19] Mantri, M.B., Velagapudi, P., Eravatri, B.C., *et al.* (2013) Performance Analysis of 2.4 GHz IEEE 802.15.4 PHY under Various Fading Channels. 2013 *International Conference on Emerging Trends in Communication, Control, Signal Processing and Computing Applications (C2SPCA)*, Bangalore, 10-11 October 2013, 1-4.
- [20] Dries, L.V., Jan, B., Robbe, E., *et al.* (2021) Adaptive Multi-PHY IEEE802.15.4 TSCH in Sub-GHz Industrial Wireless Networks. *Ad Hoc Networks*, **111**, Article ID: 102330.
- [21] Zhang G, Shi C, Han C, *et al.* (2020) Implementation-Friendly and Energy-Efficient Symbol-By-Symbol Detection Scheme for IEEE 802.15.4 O-QPSK Receivers. *IEEE Access*, **8**, 158402-158415. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020183>

- [22] Morparia, K., Shah, P., Shah, B., *et al.* (2007) Experimental Study of Concurrent Packet Transmission in Wireless Sensor Networks Using Tmote Sky Devices. *SenSys' 06: Proceedings of the Fourth International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Colorado, 31 October-3 November 2006, 237-250.
- [23] Lai, D., Manjeshwar, A., Herrmann, F., *et al.* (2003) Measurement and Characterization of Link Quality Metrics in Energy Constrained Wireless Sensor Networks. *GLOBECOM'03. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE Cat. No. 03CH37489)*, San Francisco, 1-5 December 2003, 446-452.
- [24] Fu, S., Zhang, Y., Jiang, Y., *et al.* (2015) Experimental Study for Multi-Layer Parameter Configuration of WSN Links. 2015 *IEEE 35th Inter-National Conference on Distributed Computing Systems*, Columbus, 29 June-2 July 2015, 369-378. <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2015.45>