

# 钻井井场测控系统的 ZigBee 模块 低功耗设计

姜亚竹, 蔡萍

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200030)

**摘要:** 在钻井井场无线测控系统中, 采用 ZigBee 无线传输模块和各种传感器组成基本的 ZigBee 无线节点设备, 实现系统简洁易用易维护, 节点设备通常要求小型轻便和采用电池供电, 但存在着电池容量有限和要求每个节点设备维持长时间工作的矛盾问题, 为此必须对其低功耗优化设计进行研究; 通过对节点设备的软件功耗和硬件功耗进行了综合分析, 发现系统的功耗主要集中在 ZigBee 模块发射无线信号的过程中, 针对此提出了增加优化控制对 ZigBee 模块信号发射功率进行动态管理的措施; 采用理论分析和大量试验验证相结合的办法, 创新性地以信号强度和节点距离为自变量, ZigBee 模块发射功率为因变量, 建立了低功耗的动态优化控制模型, 并制定最优控制策略; 实验数据表明上述方法可实现 ZigBee 模块功耗降低 20%~25%。

**关键词:** 井场无线测控系统; ZigBee 技术; 信号强度 RSSI; 低功耗; 功率等级

## Research on Low-power Consumption of ZigBee Module in Logging Well-field Control System

Jiang Yazhu, Cai Ping

(School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,  
Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In the drilling well-field wireless measure and control system, ZigBee wireless transmission modules and various sensors constitute the basic ZigBee wireless node devices to realize the system is simple, easy to use and easy maintenance. The node devices are generally required to be small, lightweight and battery-powered. However, there exists the contradiction problem between the limited battery capacity and the requirement that each node device maintains long working time. It is necessary to research the optimal design of low power consumption. Based on analyzing the software and hardware power consumption of the node devices, found that the major power consumption focuses in the process of ZigBee module transmitting signals. So put to use the measurement of increasing optimization control to dynamically management of the module signal transmission power. By adopting the combination of theoretical analysis and a series of experiments, put forward an optimal control model of low-power consumption, innovatively in which the signal intensity and the distance between node devices are taken as affecting factors, and the ZigBee module transmitting power is treated as the dependent variable. The experiment indicated that 20%~25% reduction of ZigBee module power consumption can be achieved with the optimal control strategy.

**Keywords:** well-field wireless control system; ZigBee technology; RSSI value; low-power consumption; power level

## 0 引言

随钻测井仪器<sup>[1]</sup>LWD (Logging While Drilling) 是石油勘探工程中的关键设备, 其用途是在钻井过程中一边钻进一边测量地层岩石的物理参数, 并实时上传数据供钻井人员及时调整钻头轨迹, 使之沿着目标油层方向钻进。钻井井场测控系统<sup>[2]</sup>是随钻测井仪器的重要辅助系统, 包含有泥浆压力传感器、钩载传感器、绞车传感器<sup>[3]</sup>、司钻显示器以及数据处理 PC 等。主要功能是实时监测钻井过程中的泥浆循环压力, 测井仪器钻头深度, 以及获取井下仪器传输到地面的地层参数, 并对数据进行处理分析, 实现精确地实时地控制钻头的钻进轨迹。

早年间, 井场测控系统中的传感器与上位机之间通过几十米甚至上百米的线缆连接, 信号衰减厉害, 因井场空间拥挤导致线缆易缠绕易损坏。后期引入了 ZigBee 无线通信技术, 使系统的简洁性和易用性大大提高。ZigBee 是一种近距离、低功耗、低复杂度、低速率和低成本的双向无线通讯技术<sup>[4]</sup>, 应用范围很广。相比其它无线通信技术, 它的优势在于功耗要比 Bluetooth 和 Wi-Fi 低一个数量级, 传输距离要比 RFID、IrDA 和 UWB 高出几十倍。

ZigBee 无线节点设备均采用电池供电, 由于要求小型化和轻便化, 所以不可能备有太大的电池容量, 然而一般每口油井的钻进周期<sup>[5]</sup>往往持续数个星期, 极大地考验着电池的续航能力, 为了尽可能地延长各 ZigBee 节点设备的工作时间, 针对其低功耗优化设计展开研究, 就显得很有意义和应用价值。

对于钻井井场无线测控系统, ZigBee 无线节点设备是其最基本的组成单元, 它的构成主要是井场上的各种传感器 (或钻采显示设备), ZigBee 无线传输模块和电源模块 (集成

收稿日期: 2017-06-28; 修回日期: 2017-07-24。

**作者简介:** 姜亚竹 (1985-), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事仪器仪表控制工程方向的研究。

蔡萍 (1963-), 女, 上海人, 教授, 博士生导师, 主要从事测试计量技术及仪器方向的研究。

MCU) 等三部分, 如图 1 所示。随着 IC 工艺的不断进步, 传感器芯片和处理器芯片的功耗已经做得很低, 在 ZigBee 无线节点设备中, 绝大部分功率消耗在发射无线信号过程中, 占比达 60% 以上。因此对发射功率进行优化控制可以实现低功耗设计目的。

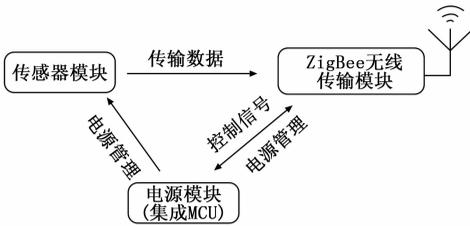


图 1 ZigBee 无线节点设备的组成

### 1 ZigBee 模块发射功率参数研究

为了能够实现动态调整 ZigBee 无线模块的发射功率, 必须对发射功率的调整参数进行研究。大部分 ZigBee 厂商都会提供一个模块参数 PL (Power Level) 来供用户调整其发射功率, 但手册中并不提供具体参数对应的具体发射功率等信息, 因为不存在严格的数学对应关系, 受实际使用条件影响较大, 用户需根据自身不同需求自行探究。

该钻井井场无线测控系统中具体采用 DIGI 公司的 ZigBee 模块, 具体型号为 XBeeS2C Pro, 其最大发射功率为 63mW, 发射电流为 120 mA@+3.3 V, 接收电流 31 mA。S2C 模块中提供的参数 PL 有 5 个等级供用户调整其发射功率, 分为为 PL=0 (+10 dBm), PL=1 (+12 dBm), PL=2 (+14 dBm), PL=3 (+16 dBm), PL=4 (+18 dBm)。

默认情况下, ZigBee 模块工作在最大发射功率状态, 系统不会自动调整, 因此不利于节能。实际上, 当节点距离比较近时, 较小的发射功率就可以满足通信要求。若距离不固定, 可以通过动态调整 ZigBee 的发射功率, 实现综合能耗最低。但这需要对模块功率等级 PL 值对信号强度 RSSI<sup>[6]</sup> 的影响规律有充分的了解。

为此, 通过设计对比实验测试 S2C Pro 模块不同功率等级 PL 对接收信号强度的影响规律。设定 4 种节点距离, 由近及远分别为 1 m, 5 m, 10 m 和 20 m, 由终端设备 (End Device) 向协调器 (Coordinator) 发送数据, 依次设定 End Device 的 PL 值为 0, 1, 2, 3, 4, Coordinator 的 PL 值固定为 4。分别测试 Coordinator 接收到的 End Device 发射的信号强度 RSSI, 在固定距离下其随 PL 值的变化曲线如图 2 所示。

从图 2 可以清晰看出: 信号强度 RSSI 值与功率等级 PL 呈现非线性正相关规律, 随着 PL 值增加而增大。当 PL=0 增加到 PL=1 时, 信号强度增大幅度比较大, 但当 PL=1 依次增加到 PL=4 过程中, RSSI 增大较缓慢, 明显与 PL 变化不成比例。一种原因可能是模块内部功率控制只是模糊控制, 并非严格按数学关系控制; 另一种原因可能是特定条件下, 一味增加发射功率并不能大幅地有效增大信号强度, 有其它相关因素限制了信号强度。

根据 PL=0, 1, 2, 3, 4 对 RSSI 的影响规律可以将 ZigBee 模块发射功率动态调整等级选定为三档: PL=0, PL=1 和 PL=4, 而不是 PL=0, 1, 2, 3, 4 五档, 一个原因是档位

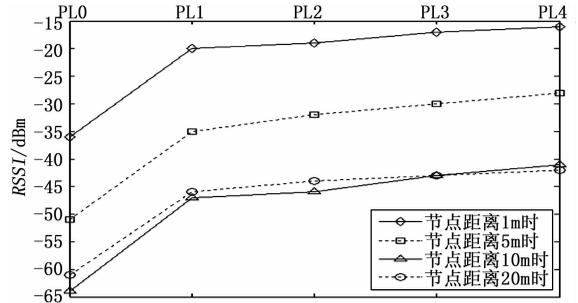


图 2 ZigBee RSSI 随 PL 值的变化曲线

太多, 控制起来比较复杂, 不实用, 另一个原因是 PL=1 到 PL=4 的影响趋势缓慢, 没必要再选择中间的 PL=2 和 PL=3。动态控制策略中选取此三档功率等级作为控制标准, 根据需要进行切换。

从上述实验可以看出, 除了功率等级 PL 值对信号强度 RSSI 产生影响外, 节点距离的变化同样动态地影响着信号强度 RSSI。明显地, 节点距离近, 信号强, 在满足通信质量的前提下可以适当降低发射功率, 以实现降低功耗。接下来研究 RSSI 与距离的影响规律。

### 2 ZigBee 信号强度与节点距离的关系研究

#### 2.1 信号强度与节点距离关系的理论模型

一般来说, 在无线信号传输过程中, 节点距离与信号强度 RSSI 之间的影响关系, 可以用如下的理论模型进行阐述。

通常, RSSI 等价于被测量的功率, 即信号强度的平方。RSSI 可以认为是 RF 信号、超声波或其它无线信号的强度指标。RSSI 测量不需要额外增加硬件, 因为几乎所有的无线模块都内置有 RSSI 参数, 只需读取即可。

无线信号的发射功率和接收功率之间的关系可以用式 (1) 表示<sup>[7]</sup>, PR 是无线信号的接收功率, PT 是无线信号的发射功率, S 是收发单元之间的距离, n 是传播因子。

$$PR = PT/S^n \tag{1}$$

在公式 (1) 两边取对数可得式 (2):

$$10 \cdot n \lg S = 10 \lg (PT/PR) \tag{2}$$

节点的发射功率是已知的, 设  $A = 10 \lg PT$ , 将发射功率代入式 (2) 中可得式 (3):

$$10 \lg PR = A - 10 \cdot n \lg S \tag{3}$$

式 (3) 的左半部分是接收信号功率转换为 dBm 的表达式, 即写成 PR (dBm), 用 RSSI (接收信号强度) 代替 PR, 可以将上式直接写成式 (4)<sup>[8]</sup>:

$$RSSI(\text{dBm}) = A - 10 \cdot n \lg S \tag{4}$$

在式 (4) 中 A 可以看作信号传输 1 m 远时接收信号的功率。系数 A 和 n 的数值决定了接收信号强度和信号传输距离的函数关系。

针对于系数 A 和 n 的求解, 一种方法是通过测得任意两组节点距离与 RSSI 对应的数据, 代入公式 (4) 求得系数 A 和 n, 为了计算方便一般选择节点距离为 1 m 和 10 m。选取的两节点的数据必须经过多次测量提高准确度。

另一种方法是通过大量实验, 获得一系列距离与 RSSI 对应数据, 然后通过 Matlab 曲线拟合出 A 值和 n 值。显然通过

拟合得出的系数, 更能有效地降低单点数据测量带来的误差。

### 2.2 信号强度与节点距离关系的实验曲线

为了测定 ZigBee 节点距离对接收信号强度 RSSI 的准确函数关系, 设计如下实验来求取系数  $A$  和  $n$ 。将终端设备 (End Device) 与控制协调器 (Coordinator) 置于空旷的厂房中, 距离设定从 0.4 m 增至 30 m, 数据误包率要求小于 1%, 同时设置 End Device 为周期休眠引脚唤醒模式, 睡眠周期设定为 2 s, 保证可以定期获取来自 Coordinator 的命令, 正常使用引脚唤醒模块进行发送数据, 其余时间处于休眠状态。

试验中分别设置 End Device 的  $PL=0, PL=1, PL=4$ , 测试三组信号强度 RSSI 随节点距离变化的数据, 结果如表 1 所示。

表 1 End Device 的 RSSI 值随节点距离的变化

序号	节点距离/米	End Device 发射信号强度/dBm		
		$PL=4$ 时	$PL=1$ 时	$PL=0$ 时
1#	0.4	-9	-13	-28
2#	1	-15	-19	-36
3#	2	-21	-27	-42
4#	3	-25	-31	-46
5#	4	-26	-32	-47
6#	5	-28	-34	-50
7#	6	-28	-33	-49
8#	8	-33	-39	-56
9#	10	-31	-36	-52
10#	15	-37	-45	-61
11#	20	-34	-40	-55
12#	25	-38	-44	-61
13#	30	-40	-45	-60

借助于 MATLAB 绘制曲线如图 3, 从图中可以看出 ZigBee 模块在  $PL=4, PL=1$  和  $PL=0$  时测得的 RSSI 随距离变化曲线规律类似。近距离范围内 (0.4~5 m), 信号强度 RSSI 随节点距离衰减比较快, 类似指数型衰减规律; 而距离较远范围内 (5 m 以上), 信号强度 RSSI 随距离衰减的比较缓慢。在远距离时的 RSSI 值波动较大, 增加了测量的不准确性, 宜加大测量的样本量。信号在长距离传输中受到的综合因素影响较大, 如在室内, 则室内的空间尺寸和墙壁的信号多次反射会对结果造成干扰; 如在室外, 则障碍物和天气会对结果产生影响。

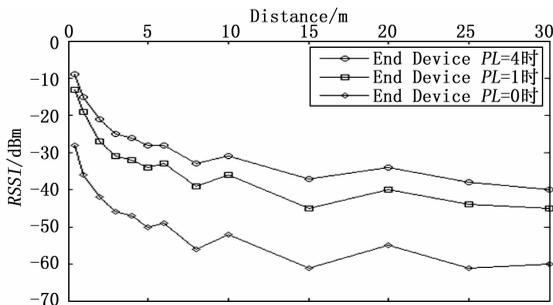


图 3 End Device 的 RSSI 值随节点距离的变化

### 2.3 信号强度与节点距离关系的函数求解

根据理论公式和实验数据, 取  $PL=4$  时的曲线进行公式

系数求解。实验测得节点距离 1 m 时的  $RSSI=-15$  dBm 和 10 m 时的  $RSSI=-31$  dBm, 代入公式 (4) 得方程组:

$$\begin{cases} -15 = A - 10 \times n \times \lg 1 \\ -31 = A - 10 \times n \times \lg 10 \end{cases} \quad (5)$$

求解得系数,  $A=-15, n=-1.6$ , 代入公式 (4) 得 RSSI 与节点距离的具体函数关系式 (6):

$$RSSI(\text{dBm}) = -16 \lg S - 15 \quad (6)$$

从式 (6) 可以看出节点距离 1 m 和 10 m 时测量的 RSSI 值的精度对公式系数影响很大。为了减小了测量误差对系数的影响, 用 Matlab 中  $p = \text{polyfit}(x, y, m)$  拟合实验数据, 可以得到函数关系式 (7):

$$RSSI(\text{dBm}) = -16.11 \lg S - 16.0 \quad (7)$$

类似地也可以计算和拟合出  $PL=1$  和  $PL=0$  时函数关系式, 综合出计算公式 (8):

$$RSSI(\text{dBm}) = \{-17 \lg S - 19, PL = 1 \quad (8)$$

拟合公式 (9):

$$RSSI(\text{dBm}) = \{-17.11 \lg S - 20.9, PL = 1 \quad (9)$$

明显关系式 (9) 比式 (8) 更准确些。绘制实验曲线与拟合曲线对比图 4。

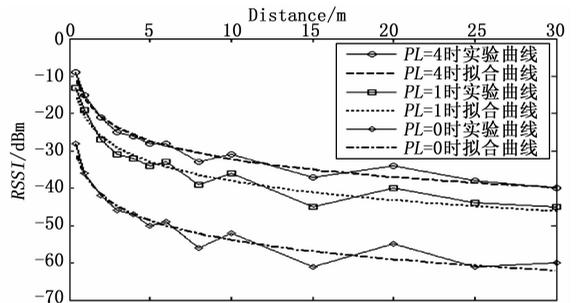


图 4 节点距离与 RSSI 的拟合曲线

由公式 (5) 和图 4 可以得出如下结论:

- 1) 对比公式和曲线, 可以看出  $PL=0, PL=1$  和  $PL=4$  时, 距离对 RSSI 的影响因子  $n$  差异很小, 可认为只有常数项不一样, 这些曲线可看作是某个曲线簇,  $PL$  值仅影响常数项。
- 2) 通过测试获得不同组发射功率下的距离与 RSSI 的曲线簇, 当距离已知时就可以从图形中确定最低发射功率, 当能保证通信质量的 RSSI 值时就可以从图形中确定最远传输距离。
- 3) 针对固定  $PL$  值, 实验测得的 RSSI 与距离关系的拟合曲线是单调的, 且与理论公式吻合很好, 其应用价值是可以利用 RSSI 来测距。

## 3 ZigBee 模块低功耗设计方案

### 3.1 ZigBee 模块低功耗控制策略

综合前面的理论分析和实验测试结论, 可以知道接收信号强度 RSSI 受模块发射功率等级  $PL$  和节点距离两个参数所影响。功率等级  $PL$  值越大, 节点距离越近, 则信号强度 RSSI 越强。在给定的工作场所下, 只要能保证通信质量, 不需要信号强度很强, 否则只会增加功耗, 而是应该选择合适的发射功率以实现综合功耗最低, 达到节能目的。

为此以节点距离和信号强度 RSSI 为自变量, 以 ZigBee 模块发射功率为因变量, 制定出 ZigBee 发射功率的动态控制

策略，如下：

1) ZigBee 模块发射功率选用  $PL=0$ ， $PL=1$  和  $PL=4$  三档控制，从低到高依次选择。

2) 如果 ZigBee 节点设备的距离在系统布局后是固定的，可以根据距离确定  $PL$  的选择。距离小于 5 m 时则选用  $PL=0$ ，距离介于 5 m 和 20 m 之间时选用  $PL=1$ ，距离大于 20 m 时则选用  $PL=4$ 。距离阈值 5 m 和 20 m 可以根据传输环境是否空旷或遮挡等因素进行适当调整，增大或减小。

3) 如果节点设备距离是未知的或动态变化的，则通过 RSSI 值大小来确定  $PL$  的选择，RSSI 的阈值选择  $-50$  dBm，作为判断信号的强弱界限。若  $PL$  设置为 0，则要求  $RSSI > -50$  dBm，若不满足，则设定  $PL$  为 1，并继续判定  $RSSI > -50$  dBm，若仍不满足，则  $PL$  设置为 4。RSSI 阈值  $-50$  dBm 可以根据具体的传输环境进行适当调整，增大或减小。

图 5 为具体的控制流程图。

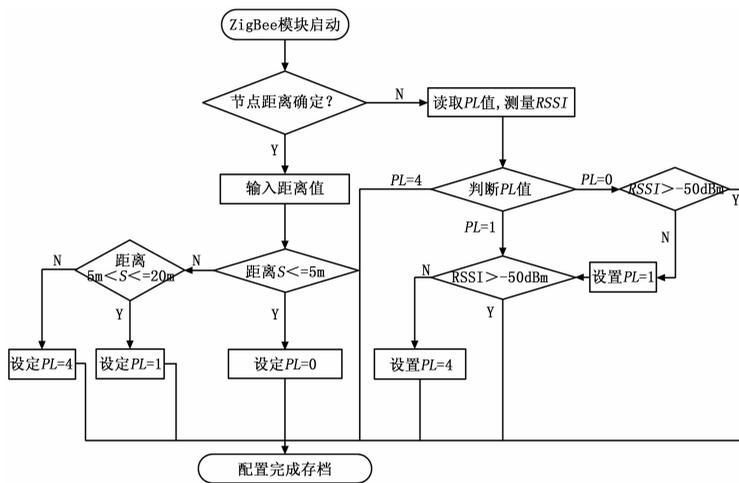


图 5 ZigBee 模块发射功率控制流程图

### 3.2 ZigBee 模块低功耗综合实验

为了验证上述发射功率动态控制策略的有效性，设计如下实验平台，如图 6 所示。Coordinator 位置固定，End device 与它的距离设定为 5 m，15 m 和 25 m 三个不同值，对应图中 ABC 位置。设定 End Device 做等时间间隔地循环移动，在每个位置停留 1 h，按 ABC 顺序循环移动，以模拟 End Device 距离 Coordinator 动态变化过程。实际上如果距离能够连续变化是最理想的，但受限与实验条件。Coordinator 用稳压电源供电，End device 用 2 节 1.5 V 干电池供电，直接连接 ZigBee 模块的电源引脚。10 分钟内数据误包率大于 5% 为判断电量不足。测定消耗完固定电池电量下能够持续工作的时间长短。

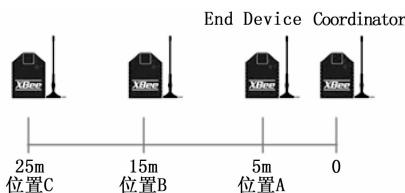


图 6 ZigBee 低功耗实验平台

采用两组对比实验，原始组是 ZigBee 模块发射功率恒定为  $PL=4$ ，改进组是发射功率采用动态控制策略。两组的 Zig-

Bee 模块都设置为周期睡眠引脚唤醒模式。经实验测试，原始组可以连续工作 137 h，改进组可以连续工作 163 h，时间延长约 20%，由于位置 ABC 出现的次数差不多，所以是一种平均状态，如果大部分时间的工作位置比较近，则工作时间延长可达 20% 以上，即低功耗更明显。

在改进组实验中，对于动态控制策略而言，节点距离是动态变化的。当 End Device 位于近距离 5m 时，控制策略先设置发射功率等级为  $PL=0$ ，测得 RSSI 约为  $-48$  dBm，满足强信号要求，则选用  $PL=0$  作为长时间工作。当 End Device 移动到距离 15 m 时，控制策略先设定  $PL=0$  测得 RSSI 约为  $-58$  dBm，信号较弱，则将  $PL$  上调至 1，再次测得 RSSI 约为  $-42$  dBm，满足强信号要求，故选定  $PL=1$  作为长时间工作。当 End Device 移动到距离 25 m 时，控制策略先设定  $PL=1$  时测得 RSSI 约为  $-62$  dBm，信号很弱，即时上调  $PL$  至 1，再次测得 RSSI 约为  $-45$  dBm，满足强信号要求，故选定  $PL=1$  作为长时间工作。然而远距离时 RSSI 所受影响因素较多，有时波动较大，比如 25 m 时，有时在  $PL=1$  时可能测得  $RSSI < -50$  dBm，则动态控制策略会将  $PL$  再次提升为  $PL=4$  作为最终的长时间工作等级。以上即为动态控制策略的运行过程。

### 4 结束语

通过理论分析和一系列实验测试，成功制定出了基于接收信号强度 RSSI 和模块节点距离这两个参数（设定 RSSI 阈值  $-50$  dBm 和两个节点距离阈值 5 m 和 20 m）来动态调整 ZigBee 模块的发射功率  $PL$ （设定为  $PL=0$ ， $PL=1$  和  $PL=4$  三档）的策略，在对比实验中得到了较好地验证，可实现 ZigBee 发射模块可节省 20%~25% 的功耗。

值得注意的是，上述控制策略中的阈值是在空旷的大厂房中测定的，若是在户外无遮挡的情况下，则相应的阈值可以适当调高，若通信条件较差，则阈值要调低。

### 参考文献：

- [1] 张辛耘, 王敬农, 郭彦军. 随钻测井技术进展和发展趋势 [J]. 测井技术, 2006, 30 (1): 10-15.
- [2] 丁海军, 宋智, 龙沛民, 等. 石油钻井控制技术的现状与发展趋势 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013 (16): 99-99.
- [3] 李武生, 孔凡刚. 德玛 DM-LWD 施工常见故障分析 [J]. 鸡西大学学报: 综合版, 2012, 12 (2): 43-45.
- [4] Li C, Wang Y, Guo X. The application research of wireless sensor network based on Zigbee [A]. 2010 Second International Conference on Multimedia and Information Technology (MMIT) [C]. IEEE, 2010, 2: 89-92.
- [5] 刘新. 优化油井生产周期的新方法 [J]. 中外科技情报, 2005 (1): 135-136.
- [6] Baccour N, Koubaa A, Youssef H, et al. F-lqe: A fuzzy link quality estimator for wireless sensor networks [A]. European Conference on Wireless Sensor Networks [C]. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 240-255.
- [7] 方震, 赵湛, 郭鹏, 等. 基于 RSSI 测距分析 [J]. 传感技术学报, 2008 (11): 2526-2530.
- [8] Bertoni H L. Radio propagation for modern wireless systems [M]. Pearson Education, 1999.