

# WSN 中节点定位算法的混合优化研究<sup>①</sup>

吕 振, 张 颖

(辽宁工程技术大学, 葫芦岛 125105)

**摘 要:** 针对质心和 PDM 定位算法存在的节点定位误差大及能耗高等方面的不足, 提出一种改进的混合优化定位算法, 该算法不但降低了附加节点的定位误差而且大大减小了能量的消耗. 通过 NS-2 仿真软件对节点的定位误差等方面进行仿真验证, 结果表明了优化后的算法的定位误差率比之前的定位误差率明显减小, 且锚节点的数量越多定位越准确. 从仿真实验的结果显示出该优化后的定位算法稳定且易于实现, 同时改善了定位误差和能耗水平, 达到了所要求的目标.

**关键词:** 无线传感器网络; 质心算法; PDM 算法; CPLS 算法; NS-2 仿真软件

## Hybrid Optimization in WSN Node Localization Algorithm

LV Zhen, ZHANG Ying

(Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** This paper applies a new modified Synthesized algorithm based on the Centroid and PDM Localization Synthesized existence of high node location error and energy consumption higher shortcomings. The algorithm not only reduces the positioning error of additional nodes, but also greatly reduce the energy consumption. Through NS-2 simulation software on the node to locate the error simulation, results show that the optimized algorithm of positioning error rate is reduced than before. And more of anchor nodes create more accurate positioning. The result of the simulation experiment shows that the optimized algorithm is stable and easy to implement and improve the positioning error and energy consumption level. It achieves the required goals.

**Key words:** WSN; centroid algorithm; PDM algorithm; CPLS algorithm; NS-2 simulation software

## 1 引 言

传感器的节点定位技术是传感器网络的应用基础, 若没有位置信息, 传感器节点所采集的数据几乎没有应用价值的<sup>[1-2]</sup>. 例如目标监测与跟踪等都要求网络节点预先知道自身的位置, 特别是军事上在敌控区监视敌方军事部署的传感器网络、建筑物安全监控等应用领域中节点的安全定位将显得极其重要. 现有许多典型的节点定位算法<sup>[3-4]</sup>, 质心法<sup>[5]</sup>是无须测距的基于网络连通性的 WSN 节点定位算法, 该算法简单, 具有广泛的可扩展性但是定位精度差且定位精度取决于锚节点的数量及其分布情况; DV-Hop<sup>[6]</sup>定位算法是根据多级跳锚节点物理位置信息的一种经典的定位策

略, 是完全基于无线传感器网络的连通性的一种定位算法, 该算法不用其他辅助硬件支持但这种算法存在不良的节点和多跳带来的累积误差等缺点; MDS-MAP<sup>[7]</sup>定位算法, 该算法可以同时 Range-Based 和 Range-Free 环境下计算节点位置信息, 并且在 Range-Free 环境下能够达到很高的精度. 但由于采用了集中式计算的模式, MDS-MAP 需要网络中存在能够进行高强度计算的节点, 并且当 WSN 覆盖区域不规则时, 会产生很大误差; PDM(phase difference measurement)法是一种基于相位差测量<sup>[8]</sup>的与距离相关的 WSN 节点定位算法, 该算法定位精度高, 但会导致增加算法的通信开销和能量消耗的问题. 基于以上

<sup>①</sup> 收稿时间:2013-11-11;收到修改稿时间:2013-12-13

对典型节点定位算法的分析, 本文提出一种混合优化的节点定位算法 CPLS(Centroid and PDM Localization Synthesized)定位算法, 该算法综合了质心算法和 PDM 算法各自的优势, 降低定位误差的同时又减小了能耗水平.

## 2 两种算法的定位原理分析

### 2.1 质心定位算法

质心定位算法如图1所示, 是未知节点以其临近区域内的一些锚节点为顶点构成多边形, 把该多边形的质心作为自己物理坐标的估算值<sup>[9-11]</sup>. 如果假设已知的锚节点的物理位置坐标为  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $\dots$ 、 $(x_n, y_n)$ , 则未知节点的物理位置坐标可根据下列公式估算出:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left( \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \right) \quad (1)$$

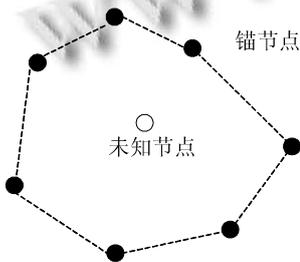


图1 质心算法

### 2.2 PDM 定位算法

如图2所示, WSN网络中随意选出两个节点 $S_1$ 和 $S_2$ 使它们以非常接近的频率 $\omega_1$ 和 $\omega_2$  (频差约几百赫兹) 在持续一定的时间里发射两列未调制的正弦波

$$s_1(t) = a_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (2)$$

$$s_2(t) = a_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (3)$$

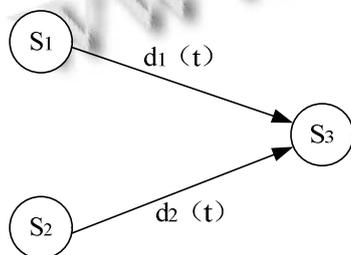


图2 相位差测距原理

经过不同的传播延迟时间后这两列正弦波同时到达 $S_3$ , 到达 $S_3$ 时的信号表示如下:

$$r_{31}(t) = a_1 \sin[\omega_1(t - d_{31}/c) + \varphi_1] \quad (4)$$

$$\text{和 } r_{32}(t) = a_2 \sin[\omega_2(t - d_{32}/c) + \varphi_2] \quad (5)$$

其中,  $r_{31}(t)$ 、 $r_{32}(t)$ 分别表示来自发射节点 $S_1$ 和 $S_2$ 的经过一定时间到达节点 $S_3$ 的信号,  $d_{31}$ 和 $d_{32}$ 分别表示发射节点 $S_1$ 、 $S_2$ 和接收节点 $S_3$ 之间的空间距离,  $c$ 是光速. 这两个信号同时与 $S_3$ 节点本身信号输出:

$$s_L(t) = a_L \sin(\omega_L + \varphi_L) \quad (6)$$

混频产生混合信号

$$s_M = s_{L31} + s_{L32} \quad (7)$$

其中,

$$s_{L31} = s_L(t)r_{31}(t) = a_L a_1 \{ \cos[(\omega_L - \omega_1)t + (\varphi_L - \varphi_1 + \omega_1 d_{31}/c)] - \cos[(\omega_L + \omega_1)t + (\varphi_L + \varphi_1 - \omega_1 d_{31}/c)] \} / 2 \quad (8)$$

$$s_{L32} = s_L(t)r_{32}(t) = a_L a_2 \{ \cos[(\omega_L - \omega_2)t + (\varphi_L - \varphi_2 + \omega_2 d_{32}/c)] - \cos[(\omega_L + \omega_2)t + (\varphi_L + \varphi_2 - \omega_2 d_{32}/c)] \} / 2 \quad (9)$$

本文假设选用低端输出, 即低于 $\omega_L$ 的频率成分才有效, 因此由混合信号 $s_M$ 得到的中频信号输出为:

$$s_{IF} = s_{IF1} + s_{IF2} \quad (10)$$

其中,

$$s_{IF1} = a_L a_1 \cos[(\omega_L - \omega_1)t + (\varphi_L - \varphi_1 + \omega_1 d_{31}/c)] / 2 \quad (11)$$

$$s_{IF2} = a_L a_2 \cos[(\omega_L - \omega_2)t + (\varphi_L - \varphi_2 + \omega_2 d_{32}/c)] / 2 \quad (12)$$

根据数学三角公式:

$$\cos^2 x = [1 + \cos(2x)] / 2 \quad (13)$$

$$\cos x \cos y = [\cos(x + y) + \cos(x - y)] / 2 \quad (14)$$

可得出该中频信号输出 $s_{IF}$ 为:

$$s_{IF}^2 = (a_L^2 a_1^2 + a_L^2 a_2^2) / 8 + (a_L^2 a_1^2 / 8) \cos 2(\omega_L - \omega_1)t + 2(\varphi_L - \varphi_1 + \omega_1 d_{31}/c) + (a_L^2 a_2^2 / 8) \cos [2(\omega_L - \omega_2)t + 2(\varphi_L - \varphi_2 + \omega_2 d_{32}/c)] + (a_L^2 a_1 a_2 / 4) \cos [(2\omega_L - \omega_1 - \omega_2)t + 2\varphi_L - \varphi_1 + \omega_1 d_{31}/c - \varphi_2 + \omega_2 d_{32}/c] + (a_L^2 a_1 a_2 / 4) \cos [(\omega_2 - \omega_1)t + \varphi_2 - \omega_2 d_{32}/c - \varphi_1 + \omega_1 d_{31}/c] \quad (15)$$

将中频信号经过滤波, 得到节点 $S_3$ 的RSSI的最终输出为:

$$RSSI_3(t) = k \lg \{ (a_L^2 a_1^2 + a_L^2 a_2^2) / 8 + (a_L^2 a_1 a_2 / 4) \cos [(\omega_2 - \omega_1)t + \varphi_2 - \omega_2 d_{32}/c - \varphi_1 + \omega_1 d_{31}/c] \} \quad (16)$$

上式中,  $k$ 为常数.

同样, 若WSN网络中的另一节点 $S_4$ 也收到来自节点 $S_1$ 和 $S_2$ 的两列未调制的正弦波, 则其RSSI的输出为:

$$RSSI_4(t) = k \lg \{ (a_L^2 a_1^2 + a_L^2 a_2^2) / 8 + (a_L^2 a_1 a_2 / 4) \cos [(\omega_2 - \omega_1)t + \varphi_2 - \omega_2 d_{42}/c - \varphi_1 + \omega_1 d_{41}/c] \} \quad (17)$$

其中,  $d_{41}$  和  $d_{42}$  是接收节点  $S_4$  到发射节点  $S_1$ 、 $S_2$  之间的空间距离。

根据(15)、(16)可以直接得到  $RSSI_3(t)$  和  $RSSI_4(t)$  的相位差:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{34} &= (\varphi_2 - \omega_2 d_{32}/c - \varphi_1 + \omega_1 d_{31}/c) - \\ &= (\varphi_2 - \omega_2 d_{42}/c - \varphi_1 + \omega_1 d_{41}/c) - \\ &= (\omega_1 d_{31} - \omega_2 d_{32} - \omega_2 d_{42} - \omega_1 d_{41})/c \end{aligned} \quad (18)$$

由于  $\omega_1$  和  $\omega_2$  非常接近, 将上式近似为:

$$\Delta\varphi_{34} = \omega (d_{31} - d_{41} + d_{42} - d_{32})/c = 2\pi(d_{31} - d_{41} + d_{42} - d_{32})/\lambda \quad (19)$$

其中,  $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$ ,  $\lambda$  表示波长。

通过上式看出, 假如 WSN 网络中的两个节点  $S_1$ 、 $S_2$  以非常接近的频率发出 2 列未经调制的正弦波同时与另外两个接收节点  $S_3$ 、 $S_4$  叠加后输出的 RSSI 信号的相位差只与正弦波的波长和这四个节点的距离有关, 只要计算出两个相位差, 就可以得到发射与接收节点之间的距离关系的表达式。

同时, 可以得到, 当 WSN 有  $m$  个节点时, 可以得到  $m(m-3)/2$  个类似于(19)的距离的关系式存在且是线性无关的。另外应用在 2D 的条件下, 这些关系式中未知数(即节点间的距离)的个数有  $2m-3$  个。这样, 在 2D 条件下, 仅要 6 个节点就可以通过求解含有 9 个线性无关的距离关系式得到他们相互之间的距离, 进而就可以通过三边测量法<sup>[12]</sup>或极大似然估计值法得到各节点的坐标。

### 2.3 两种基本定位方法存在的不足

PDM 定位算法无需额外的定位设备, 测距精度很高, 但是传感器节点在信号的发送、接收以及在发送和接收间隔工作的那一小段空闲等待时所消耗的能量远远超过其他的工作状态, 所以在一定程度上节点能量消耗就会提高。质心定位算法虽然他的定位精度不高, 但在能量敏感的应用中使用该算法, 可以降低节点的通信和能量的开销。

## 3 CPLS 定位算法

### 3.1 网络模型假设

网络区域特点具有普遍性:

1) 所有的节点均匀随机部署在  $120*120$  的方形区域中, 其物理位置是固定的。

2) 锚节点与未知节点的发射半径一样, 且发射功率和衰减模型也相同。

### 3.2 优化的质心定位算法

优化质心定位算法不同与基本的质心定位算法, 优化的算法进行多边形定位时采用的锚节点均是以跳数小于 1 为原则, 当其附近的跳数小于 1 的锚节点的个数小于多边形所构成的边数, 则 CPLS 不采用优化的质心定位算法, 而利用优化 PDM 定位算法进行定位。

### 3.3 优化的 PDM 定位算法

优化 PDM 定位算法的具有步骤如下几个过程:

1) 舍弃较远距离的部分锚节点, 以防止其参与定位算法容易引起的较大误差。

2) 优化的算法利用与该节点的距离较短的、较近的 3 个锚节点并利用三边测量法进行计算。

### 3.4 CPLS 算法的具体过程

CPLS 算法是迭代求精的过程, 其算法步骤为:

1) 选出一个未知节点, 看其附近区域内跳数小于 1 锚节点有多少个, 若锚节点数比设定的整数  $N$  大, 则利用上述式(1)即可求出该未知节点的坐标。

2) 当未知节点附近跳数小于 1 的锚节点数小于  $N$ , 则 CPLS 利用优化后的 PDM 定位算法进行定位计算。

3) 可以把部分锚节点当成未知节点进行定位, 此时锚节点的坐标位置是利用 CPLS 定位算法进行计算, 并且把它们实际的物理坐标与计算出来的结果进行对比, 得出一个误差修正因子, 之后在被定位区域内将这个误差修正因子进行广播, 进而附近的未知节点根据所得到的修正因子来修改之前计算的物理坐标的结果, 从而提高了未知节点的定位精确度。修正因子按如下公式得出:

$$\partial_i = \frac{x_i - y_j}{x_i + x_j} \quad \beta_i = \frac{y_i - y_j}{y_i + y_j} \quad (20)$$

其中,  $\partial_i$ ,  $\beta_i$  是锚节点的修正因子、 $(x_i, y_i)$  是锚点实际的物理坐标、 $(x_j, y_j)$  是利用 CPLS 算法得到的物理坐标。

由于任一个未知节点会接收来自于不同的锚节点的修正因子, 因此, 锚节点就会将跳数小于 1 的区域内的未知节点进行计算得出它们的平均修正因子  $\partial$ ,  $\beta$ , 具体的计算公式如下所示:

$$\partial = \frac{\sum_{i=1}^n \partial_i}{n}, \quad \beta = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i}{n} \quad (21)$$

未知节点根据下列计算方法对它们的位置估计值

进行修正:

$$\begin{cases} \tilde{x} = x * (1 + \delta) \\ \tilde{y} = y * (1 + \beta) \end{cases} \quad (22)$$

式中 (x, y) 为原估算的物理位置坐标、(x̃, ỹ) 为依据修正因子进行修正过的物理坐标。

4) 已定位过的全部未知节点均会成为二级锚节点, 同时为下一次计算未知节点的定位估算做前提条件, 直至定位出全部的节点。

### 3.4 算法阈值N的选取

优化的质心定位算法与PDM定位算法构成了CPLS定位算法, 该算法的特点在于能够依据网络参数的实际情形自主的选择哪种定位算法. 如果N值选择过大, 则未知节点邻近区域内跳数小于1的锚节点的个数很难达到N值, 那么CPLS算法就会自动的选择改进的PDM算法对未知节点进行定位, 此时锚节点的能量消耗就会增加, 通信开销以及计算开销就会加大;反之, 如果N值选择太小, 则邻近区域内未知节点跳数小于1的锚节点的个数很容易大于或等于N值, 那么CPLS算法就会自动的选择改进的质心算法对未知节点进行定位. 当网络中的大多数的未知节点同时使用改进的质心算法的进行定位时, 虽然锚节点的能量消耗减少了, 通信开销以及计算开销也降低了, 但是不能达到准确的节点定位精度。

综上所述, N的选择至关重要, 本设计通过对大量实验结果进行研究分析得出, N值随着网络的平均连通度的增大而增大, 若网络的平均连通度和N值的比值在3~5之间时, 选择的N值是最合适的。

## 4 仿真结果分析

为了验证本文所提出的混合优化定位算法的有效性和准确性, 应用NS-2仿真软件对基本PDM算法与CPLS算法进行了比较分析. 仿真实验的模拟区域假设在120m\*120m的区域范围内, 阈值N取为4, 节点总数保持100不变并均匀随机部署在正方形区域内, 节点的通信半径为20m, 当锚节点的个数取不同值时, 两种算法的定位误差曲线如图3所示。

从仿真结果可以看出, 随着锚节点个数的增加, PDM算法和CPLS算法都改善了定位误差率, 当锚节点个数大于20个时, PDM定位算法的定位误差率明显要比CPLS算法低, 且锚节点的数量越多定位越准确。

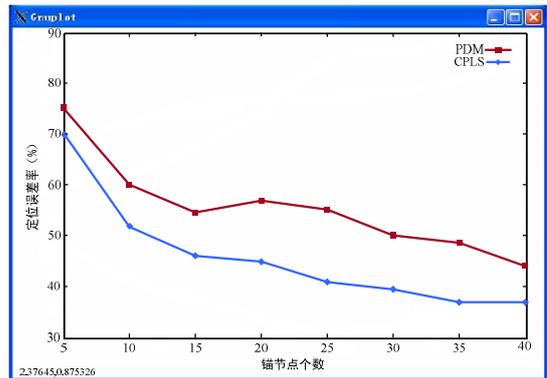


图3 通信半径 20m, 不同锚节点的定位误差率

表1给了在锚节点发生变化时, CPLS算法根据哪种算法定位情况表. 例锚节点为20时, 有32个未知节点选用了优化质心定位算法, 48个未知节点选择了优化的PDM定位算法. 锚节点只会向选择优化PDM定位算法的未知节点发送信息, 不再向那些选择优化质心定位算法的未知节点发送信息, 因此降低了通信开销, 即降低了锚节点的能量消耗。

表1 通信半径20m, 锚节点不同时节点选择算法的情况表

5	14	23	32	40
(2,93)	(35,51)	(32,45)	(28,40)	(21,39)

当在120m\*120m的区域内随机部署20个锚节点且数目保持不变, 传感器节点的总数发生变化时, 两种算法的定位误差曲线如图4所示. 可以看出, 定位误差率随着节点总数的增加而降低, 在整个区域内, CPLS定位算法的定位误差明显比PDM算法好。

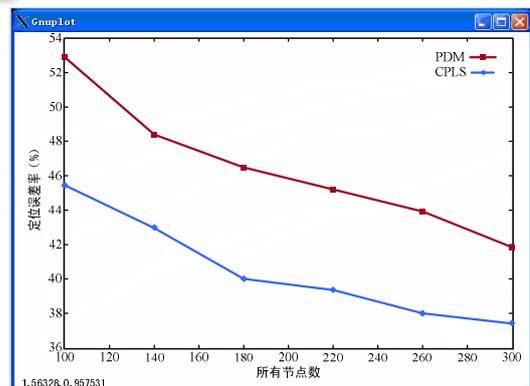


图4 通信半径 20m, 不同节点总数的定位误差率

表2给了在节点总数发生变化时, CPLS算法根据

哪种算法定位情况表. 例节点总数为200时, 有103个未知节点选用了优化质心定位算法, 77个未知节点选择了优化的PDM定位算法. 从表2能够看到, 当节点总数为200、250、300时, 利用优化PDM定位算法的节点比使用优化质心定位算法的未知节点少, 可见, 与仅利用PDM算法相比较, CPLS算法减少了能量消耗以及降低了通信开销.

表2 通信半径20m, 不同节点总数时节点选择算法的情况表

100	150	200	250	300
(38,42)	(27,103)	(103,77)	(126,104)	(146,134)

由于定位误差精确度受到网络连通性的影响, 因此在仿真实验中把节点的通信半径增加到30m, 仿真图如图5、6所示. 从图5、6可以很明显的看到, CPLS定位算法的定位误差明显比节点通信半径在20m的定位误差率还要小.

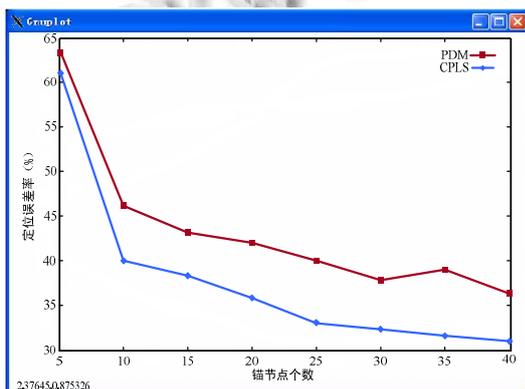


图5 通信半径 30m, 不同锚节点的定位误差率

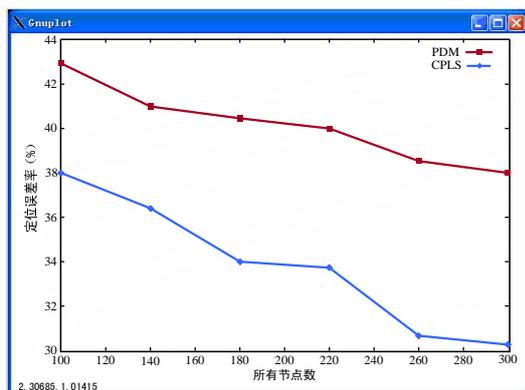


图6 通信半径 30m, 不同节点总数的定位误差率

将通信半径变成 30m 时, 网络连通度也随着发生变化. 当保持节点总数不变的情况下, 则 CPLS 选择算

法的情况如表 3 所示. 当节点总数发生变化时未知节点选择何种算法的情况如表 4 所示. 比较可以看出, 当通信半径为 30m 时, 未知节点选用优化质心定位算法的相应的比半径 20m 时的要多. 更多的减少了能量消耗和通信开销.

表3通信半径30m, 锚节点不同时节点选择算法的情况表

5	14	23	32	40
(13,82)	(27,59)	(40,37)	(42,26)	(25,35)

表4 通信半径30m, 不同节点总数时节点选择算法的情况表

100	150	200	250	300
(37,43)	(68,62)	(76,104)	(94,136)	(155,125)

## 5 结论

本文在对改进混合优化(CPLS)定位算法与PDM定位算法分析比较的基础上, 通过仿真实验, 可以看出CPLS定位算法有效地提高了定位精度、大大降低了通信和计算成本, 而且不需要增加节点, 节省了硬件开销, 符合WSN低成本、低功耗的要求. 改进后的算法具有稳定、可靠以及容易实现等优点.

## 参考文献

- Rabaey JJ, Ammer MJ, da Silva Jr JL, Patel D, Roundy S. Pieorodio supports ad-hoc ultra-low power wirelessnet working. *Computer*, 2009, 33(7): 42-45.
- 李辉. 无线传感器网络节点定位技术研究[学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- 刘庆, 吴哲夫, 何熊熊, 等. Min-Max 节点定位算法的分析与改进. *传感技术学报*, 2012, 25(8): 1126-1131.
- 蒋鹏, 覃添, 陈岁生. 基于 AOA 降维和同心圆定位的三维传感器网络节点自定位方法. *传感技术学报*, 2012, 25(7): 999-1006.
- 李夏, 张云洲, 徐开勇等. 基于无线传感器网络的机器人定位跟踪研究. *计算机工程与应用*, 2011.
- IEEE 802.11 在无线自组织网络中的应用研究. *网络与应用*, 2010: 33-36.
- 李奇芯. 无线传感器网络模拟支撑技术研究[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2011.
- 钟志光. 一种基于相位差测量的 WSN 节点测距方法. *传感技术学报*, 2007, 20(12): 2728-2732.
- Wu X, Chen G, Das S. On the energy hole problem of nonuniform node distribution in wire-less sensor networks. *Proc. of IEEE MASS*. 2006.
- 李夏, 张云洲, 徐开勇等. 基于无线传感器网络的机器人定位跟踪研究. *计算机工程与应用*, 2011.7.
- Cheng XZ, Thaeler A, Xue GL, et al. TPS: a time-based positioning scheme for outdoor wireless sensor networks. *Proc. of IEEE Conference on Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, 2004(4): 2685-2696.
- 许力. 无线传感器网络的安全和优化. 北京: 电子工业出版社, 2010.