

## 无线传感器网络 TDOA 定位系统的设计与实现

可方玲<sup>1</sup>, 黄晓利<sup>1</sup>, 段渭军<sup>1</sup>, 王洪斌<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 宽带网络研究所, 陕西 西安 710072;

2. 哈尔滨理工大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 分析现有的基于 TDOA 的无线传感器网络定位系统与算法, 使用基于超声波传感器和无线射频模块的到达时间差 (TDOA) 测距技术, 完成了该定位系统、机制和算法的设计和实现; 针对传感器网络在实际应用中的不均匀性布撒和不良节点定位等问题, 在 TDOA 测距技术和多边测量定位算法的基础上, 提出一种改进的定位算法, 以提高网络定位性能; 实验表明, 改进后的定位系统有效的减小了网络的定位误差, 解决了不良定位问题, 可应用到无线传感器网络中。

**关键词:** 无线传感器网络; 自身定位; TDOA; 多边测量法

Design and Implementation of Localization System  
Based on TDOA for Wireless Sensor Networks

Ke Fangling, Huang Xiaoli, Duan Weijun, Wang Hongbin

(1. Institute of Broadband Network, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. College of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Based on the analysis of existed localization system and algorithm for wireless sensor networks, time difference of arrival (TDOA) ranging of ultrasonic sensor and RF module is used, and localization system, mechanism and algorithm are designed and completed. A self-localization algorithm based on (TDOA) ranging and multilateration is presented to improve localization performance in practice for wireless sensor networks. Test shows that by applying the proposed algorithm, the affection of localization error is reduced efficiently, and localization performance is improved.

**Key words:** wireless sensor networks (WSN); self-localization; TDOA; multilateration

## 0 引言

无线传感器网络 (WSN) 是一种新的信息采集技术, 由布撒在监控敏感区域, 大量廉价的、具有感知、计算、无线通讯能力的传感器节点组成。WSN 在军事、环境、医疗和商业领域都有很高的应用价值。在大多数领域的应用中, 如果 WSN 不能提供相应的位置信息, 很多功能将失去实际意义<sup>[1]</sup>。定位信息可以用来报告事件发生的地理位置, 协助目标追踪, 辅助路由, 管理网络和评价网络的覆盖质量<sup>[2]</sup>。

准确度和精确度是无线传感器网络定位系统重要的指标。比较而言, 基于 TDOA (time difference of arrival) 的定位有较高的精度。目前, 使用 TDOA 技术的定位系统和算法主要有 Active Bats、Cricket、AHLos、Calamari、n-hop multilateration primitive, 和一些机器人定位如 CMU 的 Millibots。

MIT 开发了最早的松散耦合型室内定位系统 Cricket<sup>[3]</sup>, 使用基于超声波和 RF 的测距技术和基于最小二乘和卡尔曼滤波的三边定位算法, 测距范围为 10m, 经发展测距精度可达 1~3cm, 定位精度在 10cm 以下。

UCLA 的 Andreas Savvides 等人设计了配有超声波模块的

Medusa MK-2<sup>[4]</sup> (测距范围 3m, 测距精度为 2cm), 并在该平台上开发了 AHLos 和 n-hop multilateration primitive 定位算法。AHLos 算法, 定义了原子式、协作式和重复式最大似然估计定位, 并将已定位的未知节点直接升级为锚节点以缓解锚节点稀疏问题, 但会造成误差累计, 且没有给出能否执行 collaborative multilateration 的充分条件, 定位精度约为 20cm。

n-hop multilateration primitive 定位算法<sup>[5]</sup>, 首先根据节点间的累计距离确定节点的初始位置 (缺点为锚节点必须部署在网络的边缘), 给出了判定参与 collaborative multilateration 的充分条件, 并使用卡尔曼滤波技术循环求精, 减小了误差积累, 定位精度可达 3cm。

WhiteHouse 等人开发的基于 Ad-Hoc 的 Calamari<sup>[6]</sup> 定位系统, 使用声波探测器和麦克风, 利用声波测距 (TOF) 和信号强度 (RSS) 定位, 测距范围为 30m, 经过联合校正方法, 测距误差大约为 10%。

分析以上算法, AHLos 和 n-hop multilateration primitive 定位算法较复杂, 测距范围小; Calamari 定位系统开销小, 测距范围较大且近似全方向, 但测距精度较低; Cricket 算法易于实现、校正简单, 但算法在 pc 上实现, 需要更精确的设备。

通过上述 TDOA 定位系统与算法的分析, 本文使用基于超声波传感器和无线射频模块的 TDOA 测距技术, 节点采用 atmel AVR 系列 8 位处理器、CC1000 射频模块和中心频率为 40.0kHz 的超声波发射/接收器; 采用基于事件驱动的定位机制, 以节约系统功耗, 完成了基于 TDOA 的定位系统设计和实现。针对传感器网络实际应用中, 不均匀性布撒和不良节点定

收稿日期: 2007-09-21。 修回日期: 2007-10-29。

基金项目: 国家自然科学基金 (60472074)。

作者简介: 可方玲 (1964-), 工程师, 主要从事计算机应用方向的研究。

段渭军 (1962-), 男, 陕西人, 博士, 教授, 主要从事流媒体, 无线通信等方向的研究。

位等问题,提出了改进方案。

## 1 定位系统设计

### 1.1 节点的设计

传感器网络节点一般由处理器模块、无线通信模块、传感器模块和电源模块 4 部分组成,如图 1 所示。

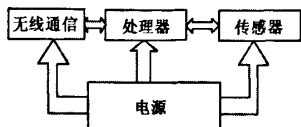


图 1 无线传感器网络节点体系结构

处理器模块采用的是 Atmel AVR 系列的一款 8 位处理器 ATmega128L, 其时钟频率为 7.3728MHz, 具有 128K 字节的系统内可编程 Flash、4K 字节的 SRAM, 以及六种可以通过软件选择的省电模式。无线收发模块采用的是 Chipcon 公司的 CC1000 无线射频模块, 其通信频率为 433MHz, 有三个频道, 可编程输出功率 ( -20 ~ 10 dBm ), 高灵敏度 (一般 -109 dBm); 传感器模块通过 51 针接口与其他模块相连, 该模块包括 Kobitone 公司的超声波发射器 255-400ST12 和接收器 255-400SR12<sup>[7]</sup>, 其中心频率为 40.0kHz, 带宽为 2 kHz, MAX5405 放大器, 其增益设置为 235。当接收器接收到超声波信号时, 使用放大器将其放大, 如果检测到放大后的电压值大于某个阈值时, 便触发中断报告超声波的到达。使用超声波与 RF 到达时间差完成测距, 其测距范围为 5 ~ 7m。

在基于事件驱动的操作系统 TinyOS 开发环境下, 利用组件化/模块化的 nesC 语言, 完成定位系统及算法的设计和实现。为了更快捷、方便地开发定位系统, 在 TinyOS 系统基础上, 可以借助于 GDB<sup>[8]</sup> 调试工具和利用 TOSSIM<sup>[8]</sup> 提供的调试功能, 高效地完成节点定位系统的应用开发。

### 1.2 TDOA 测距模型

TDOA 测距技术一般是利用两种不同的信号到达同一节点所产生的时间差, 或同种信号到达不同的节点所产生的时间差来确定节点间的距离。本实验采用前者, 即利用射频 (RF) 和超声波 (US) 传播速度不同, 通过检测两种信号到达节点的时间差异  $\Delta t$  对到信号源的距离进行估计, 基于已知的信号传播速度, 可直接把时间转化为距离。

$$\Delta t = \frac{d}{V_{us}} - \frac{d}{V_{rf}} \quad (1)$$

其中,  $V_{us}$  和  $V_{rf}$  分别为超声波和无线射频信号在空气中的传播速度。

在正常的室内温度和湿度情况下, 超声波的速度  $V_{us} \approx 344\text{m/s}$ , 且 RF 速度为  $V_{rf} \approx 3 \times 10^8\text{m/s}$ 。由于  $V_{rf} \gg V_{us}$ , 近似表示  $d$  为:

$$d = V_{us} * \Delta t \quad (2)$$

### 1.3 定位机制

定位系统采用基于事件驱动的定位机制, 以使定位系统更有效。如图 2 所示, 未知节点大致分为位置请求、距离测量和

位置计算三个阶段状态, 如虚线框所示。

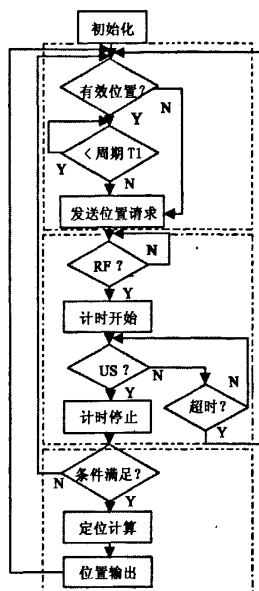


图 2 未知节点系统状态图

未知节点初始化之后, 进入第一阶段状态, 如果节点的位置无效或空闲时间超过某个周期, 未知节点开始向信标节点发送位置请求信息。处于监听状态的信标节点接收到该消息后, 则在某个时间内同时发射超声波和 RF 信号。接收到该信号的未知节点便进入第二阶段, 接收到 RF 信号时开始计时, 接收到超声波信号时停止计时, 根据两种信号到达时间差感知它到邻节点的距离。当定位条件不满足时, 回到第一阶段状态重新开始上述过程; 当定位条件满足时, 将进入第三阶段状态, 未知节点将结合信标节点已知的定位信息, 使用相应的定位算法估计它们的位置。

很多基于 TDOA 的定位系统如 Cricket 定位系统, 信标节点周期的发射超声波和 RF 信号以使未知节点感知到信标节点的距离。本定位系统采用基于位置请求的定位机制可使系统更有效。在 WSN 实际应用中, 传感器节点的移动可能性较小或在某个时间内可能性不大, 而周期的发射位置请求信息可减少能量的浪费。

## 2 定位算法设计

在实际 WSN 的应用中节点的布撒如采用飞机布撒, 具有很强不可预知性和随机性, 很容易产生节点的不均匀分布和节点工作不良的情况。针对传感器网络实际应用中, 不均匀性布撒和不良节点定位等问题, 提出如下改进方案。节点密度较高时充分利用冗余信息, 提高定位精度; 在信标节点密度较低时尤其一些节点工作不良时, 即不能满足三边测量法的定位条件, 采用相应算法确定未知节点位置。

### 2.1 改进的多边测量法

精度较高的定位算法大多基于密集部署的网络, 因为密集部署网络提供充足的数据冗余信息, 这是算法改进的基础;

而无线传感器网络的实际布撒中,在某子区域内很容易产生节点的高密度分布,这是算法改进存在的条件。

设未知节点真实坐标为  $A_T(x_T, y_T)$ , 定位计算的坐标为  $A(x, y)$ , 未知节点所感知到距离的信标节点个数为  $n$ , 信标节点坐标为  $B_1(x_1, y_1), \dots, B_n(x_n, y_n)$ , 未知节点到信标节点的真实距离分别为  $r_1, r_2, \dots, r_n$ , 测量距离为  $d_1, d_2, \dots, d_n$ 。

使用多边测量法,根据毕达哥拉斯定理,下列方程组成立:

$$d_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其理想模型为:

$$r_i^2 = (x_T - x_i)^2 + (y_T - y_i)^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

由于存在误差  $\varepsilon_i$ , 真实的距离为  $d_i - \varepsilon_i$ , 假设校正函数  $f$  (d) 形式为:  $r_i = d_i + \varepsilon_i = a * d_i + b$ ,

带入(4)并联立方程、展开有:

$$\begin{aligned} x_n^2 - x_i^2 + y_n^2 - y_i^2 &= 2x(x_n - x_i) + \\ 2y(y_n - y_i) + a^2(d_n^2 - d_i^2) + 2ab(d_n - d_i) \end{aligned} \quad (5)$$

设  $a^2, ab$  为  $u, v$ , 则有

$$Ax = B \quad (6)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_n - x_1) & 2(y_n - y_1) & d_n^2 - d_1^2 & 2(d_n - d_1) \\ 2(x_n - x_2) & 2(y_n - y_2) & d_n^2 - d_2^2 & 2(d_n - d_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(x_n - x_{n-2}) & 2(y_n - y_{n-2}) & d_n^2 - d_{n-2}^2 & 2(d_n - d_{n-2}) \\ 2(x_n - x_{n-1}) & 2(y_n - y_{n-1}) & d_n^2 - d_{n-1}^2 & 2(d_n - d_{n-1}) \end{bmatrix},$$

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ u \\ v \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} x_n^2 - x_1^2 + y_n^2 - y_1^2 \\ x_n^2 - x_2^2 + y_n^2 - y_2^2 \\ \vdots \\ x_n^2 - x_{n-2}^2 + y_n^2 - y_{n-2}^2 \\ x_n^2 - x_{n-1}^2 + y_n^2 - y_{n-1}^2 \end{bmatrix}$$

这里  $n \geq 5$ 。经最小二乘法求解后,  $a * d_i + b$  即为校正函数  $f(d)$ ,  $(x, y)$  即校正后的坐标值。

稀疏网络可利用密集部署网络定位的性能,以提高本地网络的定位精度。稀疏网络中的未知节点可以利用测量距离与经过改进后定位算法计算得到的估计距离的映射关系,对本地节点的测量距离进行校正。校正可以采用基于最小二乘回归的校正算法对测量距离进行校正,并定义残差平方误差

$$Ess = \sum_{i=1}^n e(i)^2 \quad (7)$$

其中:

$$e(i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - d_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

通常测量距离与真实距离误差  $e_i$  越小, 计算出的位置  $(x, y)$  就越接近于真实位置, 便会有较小的  $e(i)$  和  $Ess$ 。定义  $Ess$  以判定校正后的位置是否更接近于真实位置。

## 2.2 不良节点的定位

节点工作不良的情况有:

(1) 三个信标节点位于一条直线上, 这种情况使用三边测量法计算节点坐标无解。

(2) 某信标节点不能正常工作, 如信标节点个数  $< 3$ , 使得三边测量法计算条件不满足。

(3) 未知节点检测到两个信标节点的距离小于两个信标节点之间的距离, 三边测量法更是无法估计未知节点的坐标。

解决方法:

(1) 前两个问题可转化为如图3所示的两个信标节点定位问题。

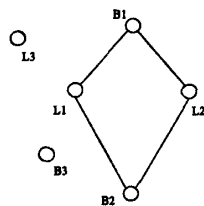


图3 不良节点定位问题

通过如式(3)的联立, 和一元二次方程的求解, 得到未知节点  $L$  两个可能的位置  $L1$  和  $L2$ , 如果信标节点  $B3$  (或带误差的未知节点  $L3$ ) 与  $B1, B2$  相邻, 却与未知节点不相邻, 则说明与未知节点异侧, 即位置为  $L1$ ; 如果带有误差的未知节点  $L3$  与未知节点  $L$  相邻, 可根据其与  $L$  的距离判断为  $L1$  或  $L2$ , 从而避免误差积累问题。

2) 如果  $L$  检测到  $B1, B2$  的距离小于两个信标节点之间的距离时, 即  $d1 + d2 < |B1 - B2|$ , 则在两信标节点坐标之间的直线上, 按到两信标节点的距离比例取一点作为未知节点的坐标, 无需邻居节点辅助。假设  $B1(x, y), B2(x, y), L(x, y)$ , 具体方法如下:

由于  $L$  在  $B1, B2$  所在的直线上,  $L$  分别与  $B1, B2$  所在直线的斜率相同, 则有:

$$\frac{y_2 - y}{x_2 - x} = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (9)$$

$L$  到  $B1, B2$  的距离的比例为  $d1 : d2$ , 则有:

$$\frac{d_1}{d_1 + d_2} = \frac{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (10)$$

方程(9), (10)的联立即可求出未知节点的位置。

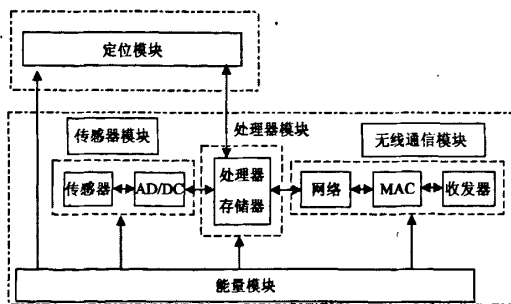


图4 无线传感器网络节点系统结构图

### 3 实验验证

典型的传感器网络节点体系结构包括处理器模块, 传感器模块, 无线通信模块及能量模块, 如图4所示。传感器模块包括采集数据的传感器和数模转换模块等, 负责网络覆盖区域内信息的数据采集和转换; 处理器模块包括处理器, 嵌入式操作系统, 存储器等, 负责处理和存储其他模块传递的数据; 无线通信模块负责与其他节点间的无线通信, 控制信息和采集数据的交换; 能量模块为其他模块提供所需的能量。定位模块建立在该结构基础之上, 一般包括测距和位置计算两个阶段。测距阶段, 定位模块通过处理器模块控制超声波和 RF 信号的同时发射; 当两种信号先后到达信标节点时, 处理器模块便向定位模块报告信号的到达、定位相关信息及对计时器的控制操作等。位置计算阶段则完全在定位模块上进行。

实验在室内环境中进行, 温度为  $26^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ 。在  $4\text{m} \times 5\text{m}$  的实验台上摆放 36 个节点, 其中信标节点 7 个, 其他为未知节点。未知节点大部分均匀分布在  $4\text{m} \times 3\text{m}$  的网格内, 其他 4 个布置在网格外, 以构成不良定位情况; 信标节点则分布在未知节点的边缘。由于超声波的测距范围和非全向性, 未知节点感知信标节点的数目有所不同。其中感知到 5、4、3、2 个信标节点的未知节点数量分别为 11、8、6、4 个。改进前的方案为, 对感知信标节点数量大于等于三个的未知节点, 应用多边测量法误差较高, 如表 1 所示。观察到  $n$  越大, 计算的位置误差越小。平均定位误差为 24cm。

表 1 改进前后定位平均误差的比较 (cm)

	改进前	改进后
$NB = 5$ $NL = 11$	15	8
$NB = 4$ $NL = 8$	28	15
$NB = 3$ $NL = 6$	34	19
$NB = 2$ $NL = 4$	-	23

(注:  $NB$  为参与计算的信标节点的数量;  $NL$  为相同  $NB$  的未知节点数量。)

对上述实验设置应用改进的定位算法, 具体如下: 对感知信标节点数量超过 5 的未知节点应用改进的多边测量法, 产生更精确定位坐标, 同时获得更精确的估计距离值, 如图 5 所示。

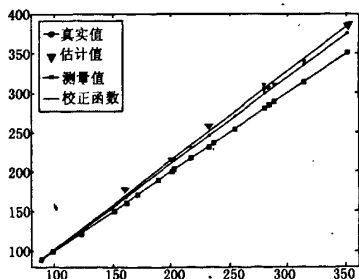


图 5 测量值、估计值与真实值的比较

示, 估计值相对于测量值更接近于真实值。将产生的  $(d, d')$  距离映射关系信息, 即 55 对数据对向网络中其他未知节点广播; 稀疏网络中的未知节点接收到这些信息, 首先将包含一对多的映射转化为一对一的映射, 并建立如下图所示的基于最小二乘回归的校正函数, 使用该校正函数对测量距离  $d$  进行校正; 当条件满足时, 采用多边测量定位, 并使用残差平方误差对结果给予判定, 结果如表 1, 其定位误差明显下降 ( $NB = 3, 4$ ); 感知到信标节点数量为 2 的未知节点根据自身网络情况, 应用不良节点定位算法, 可以获得未知节点的坐标。应用改进后的算法, 平均定位误差为 14cm, 大约降低了 40%, 其中包括不良定位情况。

### 4 结论

本文分析现有的无线传感器网络 TDOA 定位系统与算法, 针对传感器网络实际应用中, 不均匀性布撒和不良节点定位等问题, 在基于超声波传感器和无线射频模块的 TDOA 测距和多边测量定位算法的基础上, 对算法进行了改进, 并设计和实现了该定位系统。实验表明, 该系统有效地减小了网络的定位误差, 解决了不良定位问题, 可应用到无线传感器网络中。

#### 参考文献:

- [1] Willig H K A. Protocols and architectures for wireless sensor Networks [M]. John Wiley & Sons. 2005 - 06 - 24.
- [2] 王福豹, 史 龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法 [J]. 软件学报, 2005.
- [3] Priyantha N B. The cricket indoor location system [D]. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [4] The AHLs System. <http://nesl.ee.ucla.edu/projects/ahlos/>.
- [5] Avvides A, Park H, Srivastava M B. The n-Hop multilateration primitive for node localization problems [J]. Mobile Networks and Applications, 2003, 443 - 451.
- [6] Cameron Dean Whitehouse. The design of calamari: an Ad-hoc localization system for sensing Networks [J]. Master's Thesis, University of California at Berkeley, 2002.
- [7] <http://www.mouser.com/catalog/specsheets/KT-400243.pdf>.
- [8] TinyOS Tutorial [EB/OL]. <http://www.tinyos.net/tinyos-1.x/doc/>.
- [9] Langendoen K, Reijers J. Distributed localization algorithms. In R. Zurawski, editor, Embedded Systems Handbook [M]. CRC Press, 2005.
- [10] Langendoen K, Reijers N, Elsevier. Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison. Computer Networks, 2003.
- [11] Feng J, Megerian S, Potkonjak M. Model-based calibration for sensor Networks. IEEE. 2003.
- [12] Burden R L, Faires J D. Numerical analysis (Seventh Edition) [M]. Higher Education Press, 2005.
- [13] Chapra S C, Canale R P. Numerical methods for engineers (third Edition). McGraw-Hill Companies, Inc. 2000.
- [14] Heath M T. Scientific computing: an introductory survey 2<sup>nd</sup> ed [Z]. McGraw-Hill Companies, Inc 2002.
- [15] Bazaraa M, Shetty C M, Sherali H. Nonlinear programming: theory & applications [Z]. Wiley, 1994.
- [16] Press W, Flannery B, Teukolsky S, et al. Numerical recipes [Z]. Cambridge, 1986.