

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.012

# 伪随机码相关检测的 MDS-MAP 定位算法\*

刘洲洲<sup>1</sup> 张亚杰<sup>2</sup>

(1. 西安航空学院 电子工程学院 西安 710077; 2. 西北工业大学 电子信息学院 西安 710072)

**摘要:**针对当前无线传感器网络超声波设备定位精度不高的问题,改进了伪随机码相关的 MDS-MAP 定位算法。首先利用伪随机码相关检测技术,对节点发射出的超声信号进行编码,有效地增加了节点的测距距离和测量精度。然后对于未能测量到距离的节点使用 Euclidean 和最短路径融合算法进行处理,然后使用 MDS-MAP 算法生成节点的相对坐标,最后利用平面转换模型获取节点的最终坐标位置。仿真实验结果表明改进算法在不同网络规模和测距误差条件下均能够获得更高的定位精度和较小的定位误差。

**关键词:**无线传感器网络;伪随机码检测;MDS-MAP 算法;定位

**中图分类号:** TP393; TN918.91      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## MDS-MAP localization algorithm based on pseudo random code correlation detection

Liu Zhouzhou<sup>1</sup> Zhang Yajie<sup>2</sup>

(1. Electrical Engineering Department, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China;  
2. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the equipment of wireless sensor network ranging distance is short and the positioning accuracy is not high, MDS-MAP positioning algorithm based on pseudo random code correlation is proposed. Firstly, the ultrasonic signal emitted from the node is coded by using the pseudo random code correlation detection technology, the node distance and the accuracy are effectively increased. For a node failed to measure the distance, which is processed by using the Euclidean and the shortest path fusion algorithm, and then relative coordinate of node is generated by using the relative coordinates of MDS-MAP algorithm. Finally, the final coordinate of node is obtained by using the plane transform model. The experiment results of simulation show that the improved algorithm can achieve a higher positioning accuracy and smaller positioning error under different network size and distance error conditions.

**Keywords:** wireless sensor network; pseudo-random code detection; MDS-MAP algorithm; positioning

## 1 引言

随着无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)的不断研究和发展, WSN 已经广泛应用于军事国防、环境监测、反恐、危险区域监视等诸多领域<sup>[1]</sup>。尤其在目前日益紧张的国际和国内反恐形势背景下,当 WSN 应用在战场目标打击任务中,其节点通过抛洒的方式布置在

工作地域内,节点的初始位置不可知。传感器节点在工作区域内首先需要通过定位网络系统来确定自身在网络中的位置以及自身与其他节点之间的位置关系。当传感器网络在工作区域内感知到目标对象的时候,根据感知到的目标对象的位置、移动方向以及速度等信息,预估出对目标对象进行攻击的最佳攻击位置,选取当前网络中的若干个节点对目标对象进行打击。而节点定位性能的优劣,对任务如何分配有着重要的影响。因此,实现节

点定位具有十分重要的研究意义与使用价值<sup>[2]</sup>。

在 WSN 中,依据节点是否知道自身的具体位置,可以将节点分为锚节点和未知节点两种;由于未知节点在实际应用对硬件的要求高,实际操作复杂度大。因此本文只针对基于锚节点定位进行研究。近年来,国内外学者已经提出了很多 WSN 节点定位相关的算法,每种算法都各有优点。但是到目前为止,还没有一个统一的标准对这些定位算法进行分类。根据节点的定位过程是否需要测量节点间的距离或者角度信息,分为基于测距和基于距离无关的定位<sup>[3-5]</sup>。基于测距的定位技术需要测量两个相邻的节点间的距离值或者角度值,利用实际测得的距离值来计算未知节点的坐标。现有的测距技术有很多种,常用的测距技术有信号强度(radio signal strength indicator, RSSI)测量法<sup>[6]</sup>、到达角(angel of arrival, AOA)测量法<sup>[7]</sup>、到达时间(time of arrival, TOA)测量法<sup>[8]</sup>以及到达时间差(time difference of arrival, TDOA)测量法<sup>[9]</sup>等。基于距离无关的定位技术主要是利用节点的连通性信息等方法来估测节点之间的距离值,实现节点的位置估计。主要有 DV-Hop 定位<sup>[10]</sup>、质心定位<sup>[11]</sup>及 APIT 定位<sup>[12]</sup>等,这些方法无需直接测量节点间的真实距离,只需要进行距离估算即可,大大降低了定位节点对硬件的要求,但是定位精度较差。其中基于 TDOA 测距法<sup>[13]</sup>是基于超声波硬件进行测距,无需同步节点之间的系统时间,测距精度较高,抗干扰能力强,易于实现,且能够提供厘米级甚至毫米级的测距精度,在 WSN 定位方案中使用较为广泛,但是当前的超声波设备由硬件条件限制,测距距离较短。密苏里哥伦比亚大学的 Shang 等人<sup>[14]</sup>采用多维定标技术(multidimensional scaling, MDS)提出了 MDS-MAP 超声波定位算法。MDS 根据各个实体之间的相似相异性,构建多维空间上的实体相对坐标信息。该算法获取所有节点间的距离信息,构造节点的空间距离矩阵,将节点的空间距离矩阵处理成所有节点的 2 维或者 3 维空间相对坐标系统,再通过平移、翻转、映射等方法将相对坐标转换为绝对坐标,节点定位计算复杂度低,适合传感器节点低能耗环境,但是定位精度优势并不明显。

针对 MDS-MAP 超声波定位精度不高问题,为实现较高精度的定位,本文提出一种基于伪随机码 TDOA 测距技术,采用改进的采用基于伪随机码相关检测的 MDS-MAP 定位算法,可有效实现网络高精度相对定位和绝对定位,从而为 WSN 提供更好地节点定位服务支持。

## 2 伪随机码相关的 TDOA 检测技术

超声波测距的关键技术之一是对超声波信号传播时间的检测,对超声信号的处理方法直接关系到节点的测距范围和测距精度。对于信号传输时间的检测方法,针

对不同的硬件条件和系统需求,目前已有多种检测方法,其中实际应用最为广泛的是阈值检测法和相关检测法。阈值检测法是最简单的测距方法,其根据接收信号的强度幅值是否超过阈值来判断信号的到达时刻,接收信号的强度幅值设定不同,检测到的信号到达时刻就不同,收发节点之间的距离也随之改变。该方法具有实现简单、速度快等优点,但是对噪声的抗干扰能力较弱,当接收信号受到严重干扰或者测量距离较远时,有效信号可能被噪声所“淹没”,阈值检测将无法正确判定出信号的到达时刻。

针对阈值检测方法的不足,本文采用相关检测的方法来实现节点之间信号传输时间的检测。相关检测法是一种对时域信号进行处理的方法,根据超声波信号的有规律性和噪声的随机性,对接收信号与本地信号进行互相关计算处理。找到相关结果峰值出现时刻,便可以确定超声波的到达时间,进而算出距离值。相比于单脉冲信号而言,使用伪随机码对超声波信号编码有优势,有更强的抗干扰能力和抑制信号“拖尾”现象。

### 2.1 m 序列的生成

伪随机二进制序列(pseudo-random binary sequence, PRBS)是一种周期性的二进制序列。假设一个  $n$  级移位寄存器的起始状态:  $a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-n}$ , 经过  $i$  次移位之后,移位寄存器状态变化为  $a_{-1+i}a_{-2+i}\cdots a_{-n+i}$ 。根据如图 1 所示线路连接关系,对响应状态进行模 2 加,可得:

$$a_n = c_1 a_{n-1} \oplus c_2 a_{n-2} \oplus \cdots \oplus c_{n-1} a_1 \oplus c_n a_0 \quad (1)$$

一般的,对任意输入  $a_m$ , 有:

$$a_m = \sum_{i=1}^n c_i a_{m-i} \quad (2)$$

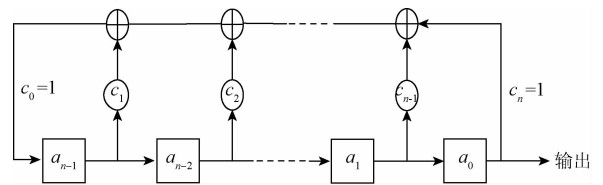


图 1 线性反馈移位寄存器原理

Fig. 1 Schematic diagram of linear feedback shift register

$c_i$  表示反馈线连接状态,将其使用方程表示为:

$$f(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \cdots + c_n x^n = \sum_{i=0}^n c_i x^i \quad (3)$$

式(3)称为特征方程。可以依据递推方程和特征方程,直接计算生成  $m$  序列。

### 2.2 2ASK 调制 $m$ 序列

将  $m$  序列使用超声波进行二进制振幅键控(2ASK)调制生成超声发射信号。 $m$  序列调制信号使用 2ASK 调制方法来生成。使用 2ASK 作为信号的调制方式,当  $m$  序列的码元为高电平“1”码时,硬件电路发送超声波脉

冲,当  $m$  序列的码元为低电平“0”码时,硬件电路不发送超声波脉冲。超声波换能器的收发探头的中心频率均为  $40.0 \pm 1.0$  kHz,接收探头可视为中心频率为 40 kHz,带宽为 2 kHz 的带通滤波器。使用频率为 40 kHz 的脉冲信号作为载波信号,对  $m$  序列进行调制,然后通过硬件电路发射出去。利用 RF 信号作为时间同步信号,超声波发射端将调制信号发出,接收端将携带伪随机序列的超声信号进行采集。使用 3 级移位寄存器生成的  $m$  序列码作为调制信号,码值为“1001011”。受超声波探头硬件自身属性的影响,硬件探头起振到振动停止时间较长。为了接收信号可以较好的区分出“0”码和“1”码,在调制的过程中将“0”码的持续时间设置为“1”码宽度的 4 倍,更好的区分出信号包络。使同时,采样模块对超声信号进行 AD 采样,然后得到信号强度的数字化量值。数字化量值  $Value$  与信号电压值  $U$  之间的转换关系为:

$$Value = 32768 \times U \div 5.0 \quad (4)$$

将采集到的数字量化值转换为电压值并使用 MATLAB 进行处理显示,可得到采样的  $m$  序列超声信号。可以看到,采集到的信号与示波器显示的超声信号相似,幅度大小不同。将采集到的超声信号进行归一化处理,然后与本地序列进行相关处理,为了更加清楚的显示结果,将相关结果再次进行归一化处理,得到的结果如图所示。实验时,两节点之间的距离为 1.0 m,环境温度为 15 °C,AD 采样频率为 100 kHz。

设用于相关的本地序列的长度为  $M$ ,互相关函数的峰值对应的采样点为  $L$ ,采样周期为  $T_s$ ,此时需要减去发送信号的持续时间,对超声波的传播时间进行修正:

$$t = T_s \times (L - M) \quad (5)$$

此时,收发节点之间的距离值为:

$$d = v \times t \quad (6)$$

式中:  $v$  为当前环境中的声波速度。

### 3 伪随机码相关检测的 MDS-MAP 定位算法

为了实现节点的精确定位,本文提出一种改进的基于伪随机码相关检测的 MDS-MAP 定位算法。该算法首先基于超声波伪随机码相关检测的方法测量传感器网络内节点对之间的距离值,利用 Euclidean 距离算法及最短路融合算法计算其他超出测距范围的节点对之间的距离,然后优化处理空间距离矩阵转换过程,最后利用平面四参数转换模型生成绝对坐标值。假设在一个二维空间区域中,随机部署若干个超声波传感器节点,节点通过无线网络协议加入至一个网络中,实现网络通信。此时,节点开始进行定位。算法的定位过程主要分成以下 3 个阶段。

#### 3.1 构建实对称距离矩阵

节点在实现组网功能之后,Sink 节点为网络中的所有节点生成一个网络拓扑连通图,为连通图中任意两个不同的节点构成的边赋予一个距离值  $d_{ij}$  ( $i, j$  分别表示节点  $i$  和节点  $j$ ),根据节点的实际测距情况,网络拓扑图的完善由 3 部分构成。

1) 如果节点之间的距离小于最大测距范围,节点之间的距离直接可测,则将真实的节点间测距值直接记录  $d_{ij}$ 。

2) 如果两节点之间的距离超出最大测距范围不能直接测出,而这两个节点具有共同的邻居节点且除这两个节点外其他节点之间的距离均已知,如图 2 所示,利用 Euclidean 距离算法进行计算并赋值给对应的  $d_{ij}$ 。

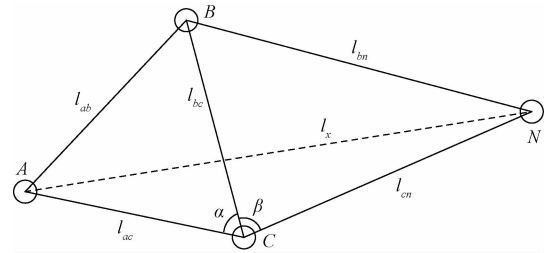


图 2 Euclidean 算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Euclidean algorithm

设  $A, B, C, N$  为网络中的 4 个节点,节点  $A, B, C$  两两间距在节点的测距范围之内,节点  $B, C, N$  两两间距也在节点的测距范围之内,其中,  $A, B$  的间距为  $l_{ab}$ ,  $A, C$  的间距为  $l_{ac}$ ,  $B, C$  的间距为  $l_{bc}$ ,  $B, N$  的间距为  $l_{bn}$ ,  $C, N$  的间距为  $l_{cn}$ ,  $\angle ACB$  记作  $\alpha$ ,  $\angle NCB$  记作  $\beta$ 。而  $A, N$  的间距超出了节点的测距最大测距范围,且距离未知,记为  $l_x$ 。利用三角形余弦定理有:

$$\cos\alpha = \frac{l_{ac}^2 + l_{bc}^2 - l_{ab}^2}{2 \cdot l_{ac} \cdot l_{bc}} \quad (7)$$

$$\cos\beta = \frac{l_{cn}^2 + l_{bc}^2 - l_{bn}^2}{2 \cdot l_{cn} \cdot l_{bc}} \quad (8)$$

$$l_x^2 = l_{ac}^2 + l_{cn}^2 - 2 \cdot l_{ac} \cdot l_{cn} \cdot \cos(\alpha + \beta) \quad (9)$$

此时,直接利用式(7)~(9)计算出节点  $A, N$  的距离。

3) 经过 Euclidean 算法计算之后,仍存在距离无法获取的节点对,使用最短路算法获取节点之间的距离值并赋值给对应的  $d_{ij}$ 。

根据最终获得的距离数据,Sink 节点构建出一个完整的距离矩阵  $D = (d_{ij})_{n \times n}$ 。

#### 3.2 定位估计

节点  $i, j$  之间的 Euclidean 距离可以表示为:

$$d_{ij} = \sqrt{(X_{i1} - X_{j1})^2 + (X_{i2} - X_{j2})^2} \quad (10)$$

当  $i = j$  时,  $d_{ij}$  表示节点到自身的距离, 此时  $d_{ij} = 0$ 。  
( $X_{i1}, X_{i2}$ ), ( $X_{j1}, X_{j2}$ ) 分别表示节点  $i, j$  的坐标值, 则式  
(10) 可以表示为:

$$d_{ij}^2 = \sum_{\alpha=1}^2 (X_{i\alpha} - X_{j\alpha})^2 \quad (11)$$

或

$$d_{ij}^2 = \sum_{\alpha=1}^2 (X_{i\alpha}^2 + X_{j\alpha}^2 - 2 \cdot X_{i\alpha} \cdot X_{j\alpha}) \quad (12)$$

设  $D^2(X)$  为元素为  $d_{ij}^2$  的矩阵, 表示  $n$  个节点对间距离的平方, 记为:

$$D^2(X) = \begin{bmatrix} 0 & d_{12}^2 & d_{13}^2 & \cdots & d_{1n}^2 \\ d_{21}^2 & 0 & d_{23}^2 & \cdots & d_{2n}^2 \\ d_{31}^2 & d_{32}^2 & 0 & \cdots & d_{3n}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1}^2 & d_{n2}^2 & d_{n3}^2 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (13)$$

对  $D^2(X)$  进行双中心化处理, 用  $B$  表示  $D^2(X)$  的双中心形式, 即:

$$B = -\frac{1}{2} J D^2 J \quad (14)$$

式中:  $J = E - \frac{1}{n} I I^T$ ,  $E$  为  $n$  阶单位矩阵,  $I$  为  $n$  阶全 1 矩阵。已知节点坐标为  $X$ , 且有  $X = [X_1, X_2, L, X_n]^T$ , 则矩阵  $B$  也可以表示为

$$B = X X^T \quad (15)$$

此时对  $B$  应用奇异值分解, 设  $A$  表示  $B$  奇异值分解后的特征值所构成的矩阵,  $Q$  表示其对应的特征向量所构成的矩阵, 则有:

$$B = Q A Q^T = Q (\Lambda^{1/2} \times \Lambda^{1/2}) Q^T = (Q \Lambda^{1/2}) \times (Q \Lambda^{1/2})^T \quad (16)$$

所以, 根据式(15)、(16)得:

$$X = Q \Lambda^{1/2} \quad (17)$$

### 3.3 坐标转换

经过前两个步骤, 已经可以计算出网络中所有节点的相对坐标, 但是其方向、角度等均与实际位置不同, 是节点真实位置经过平移、旋转及尺度变换之后的结果。

为了获取节点真实的位置, 利用平面转换模型对坐标位置进行转换。一般而言, 平面转换模型的坐标转换的参数有 4 个。两个平移参数主要是为了解决两个坐标系的原点不重合问题, 一个旋转参数是为了解决两个坐标系的坐标轴不平行问题, 一个尺度参数是为了解决两个坐标系之间尺度不一致问题。

设  $(x_A, y_A)$  为在空间  $A$  的坐标系下某一点的坐标,  $(x_B, y_B)$  为在空间  $B$  的坐标系下对应的该点的坐标。 $(\Delta x, \Delta y)$  为该点从空间  $A$  转换到空间  $B$  中所需要的两个平移参数,  $\theta$  为该点从空间  $A$  转换到空间  $B$  中所需要

的一个旋转参数,  $m$  为该点从空间  $A$  转换到空间  $B$  中所需要的一个尺度参数。则一个点从空间  $A$  转换到空间  $B$  的模型为:

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \end{pmatrix} = (1+m) \left[ \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \end{pmatrix} \right] = (1+m) \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \end{pmatrix} + (1+m) \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (18)$$

令:

$$\alpha = (1+m) \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ \alpha_3 & \alpha_4 \end{pmatrix} \quad (19)$$

可以直接看出  $\alpha_1 = \alpha_2 = (1+m) \cdot \cos\theta$ ,  $\alpha_2 = -\alpha_3 = (1+m) \cdot \sin\theta$ , 利用变量间的内在关系, 减少变量个数, 重新定义  $\alpha$  为:

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ \alpha_2 & \alpha_1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

令

$$\beta = (1+m) \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix} \quad (21)$$

则式(18)整理表示为:

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \end{pmatrix} = \alpha \cdot \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \end{pmatrix} + \beta \quad (22)$$

选择 3 个参考节点  $M(m_1, m_2, m_3)$ , 将其在两个坐标系统下的坐标值代入式(23), 求解方程组, 可得系数矩阵  $\alpha$  和常数矩阵  $\beta$  的值。根据已知的系数矩阵及参考节点, 利用式(23)将网络中所有节点的相对坐标值转换为以某几个点为参考点的绝对坐标值。

## 4 实验与仿真分析

由于节点数量有限, 本实验同样采用多次进行定位操作, 取结果的平均值的方法。在实验过程中, 将 4 个未知节点任意的放置在  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  的方形区域中, PC 利用上位机软件通过 UART 串口和 Sink 节点进行通信, Sink 节点通过无线方式与未知节点进行通信。所有节点上电后, 开始组网, 利用 PC 上位机软件下发命令, Sink 节点收集并上传网络内消息, 显示未知节点的坐标信息。为了直观显示节点坐标信息, 选择未知节点 ID 号分别为 1、2、3 的节点作为参考点, 设定 1 号未知节点为实验的坐标原点, 1 号节点到 2 号节点的方向设定为  $X$  轴的正方向, 以  $X$  轴为基准, 3 号节点所在的方向为  $Y$  轴正方向, 实验场景如图 3 所示, 定位监控软件显示的节点定位结果如图 4 所示。

经过 10 次重复定位操作, 节点的平均定位误差为  $0.27 \text{ m}$ , 最大定位误差为  $0.76 \text{ m}$ 。节点自身的形态大小为  $18 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。相对于节点大小而言, 节点在较大的

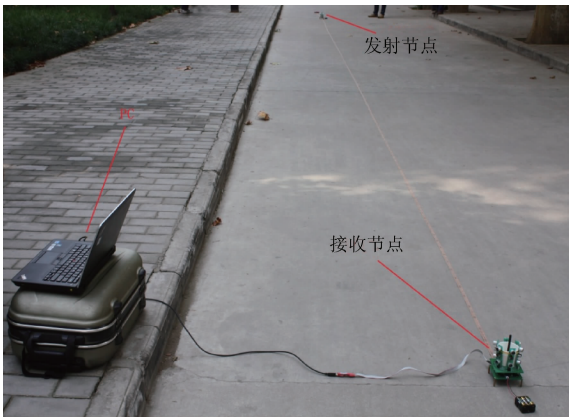


图3 实验场景

Fig.3 Experimental scene

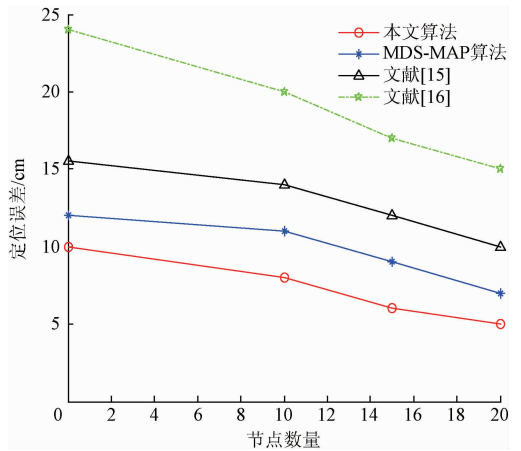


图5 定位结果误差对比

Fig.5 Comparison of positioning results

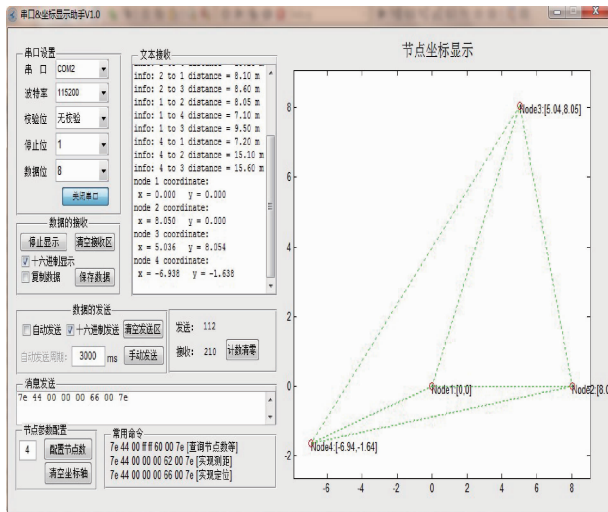


图4 定位结果

Fig.4 Positioning results

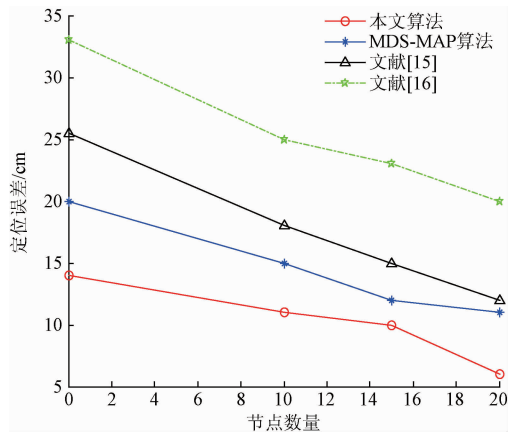


图6 定位结果误差对比

Fig.6 Comparison of positioning results

空间范围内定位精度较高,满足节点定位的技术要求。

本文同时在 MATLAB 平台对该算法进行了仿真实验来验证算法的有效性。将节点随机部署在 30 m × 30 m 的平面空间中,假设节点间的测距长度为 20 m,测距过程的噪声为均值为 0 的高斯白噪声。使用平均定位误差来对算法的性能进行评价:

$$Error = \frac{\sum_{i=1}^n pos_i^{(estimated)} - pos_i^{(true)}}{n - N} \quad (23)$$

式中:表示 n 表示网络内节点的个数, N 表示锚节点的数量, pos<sub>i</sub><sup>(estimated)</sup> 表示第 i 个节点的估计位置, pos<sub>i</sub><sup>(true)</sup> 表示第 i 个节点的真实位置。误差值越小,算法的定位性能就越好。仿真实验的平均相对差 σ 设置为 0.25% 和 0.45% 分别进行实验。将本文提出的算法与文献[15-16]以及 MDS-MAP 算法进行仿真实验对比,如图 5 和 6 所示。

仿真结果表明,在平均相对误差 σ 相同的情况下,随着节点数量的增加,3 种定位算法的定位误差均有所下

降;在平均相对误差 σ 不同的情况下,σ 越小,定位误差越小。本文提出的定位算法与另外两种算法相比,具有更高的定位精度。在本文提出的定位算法下,当节点数量较少时,节点分布较为稀疏,部分节点对需要通过最短路径算法才能构建出完整的距离矩阵,无法获得较为准确的距离数据,会产生一定的距离误差,影响系统的定位精度;当节点数量较多时,节点分布较为密集,可以获取到更多的距离信息,更加精准的构建节点距离矩阵,降低系统的定位误差。

### 5 结论

本文研究了基于伪随机码相关检测 MDS-MAP 的 WSN 网络节点定位技术。针对超声波阈值检测方法的不足,采用相关检测的方法来实现节点之间信号传输时间的检测。在此基础上提出一种改进的基于伪随机码相关检测的 MDS-MAP 算法实现 WSN 精确定位。仿真实

验,结果表明改进算法定位精度更高,定位误差分别降低,可满足较大范围定位需求。

## 参考文献

- [1] 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, 16(5): 857-868.  
WANG F B, SHI L, REN F Y. Wireless sensor network localization system and algorithm [J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 857-868.
- [2] 张松涛. 无线传感器网络定位问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.  
ZHANG S T. Localization of wireless sensor networks [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [3] LI B Z, WANG H. A low complexity localization algorithm in wireless sensor network[C]. Proceedings of CICC-ITOE International Conference on Innovative Computing and Communication, IEEE, 2010: 217-220.
- [4] YU K, GUO Y J, HEDLEY M. TOA-based distributed localization with unknown internal delays and clock frequency offsets in wireless sensor networks [J]. IET Signal Processing, 2009, 3(2): 106-118.
- [5] GIROD L, ESTRIN D. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing [C]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'01), IEEE, 2001: 1312-1320.
- [6] 赵海, 张宽, 朱剑, 等. 基于TDOA的超声波测距误差分析与改进[J]. 东北大学学报, 2011(6): 802-805.  
ZHAO H, ZHANG K, ZHU J, et al. Error analysis and improvement of ultrasonic distance measurement based on TDOA [J]. Journal of Northeastern University, 2011(6): 802-805.
- [7] 常华伟, 王福豹, 严国强, 等. 无线传感器网络的TOF测距方法研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(1): 35-38.  
CHANG H W, WANG F B, YAN G Q, et al. Research on TOF ranging method for wireless sensor networks [J]. Modern Electronic Technology, 2011, 34(1): 35-38.
- [8] El E, LI X, MARTIN R. The limits of localization using signal strength: A comparative study [C]. Proceedings of First Annual IEEE Conference on Sensor and Ad-hoc Communications and Networks (SECON), 2004(10): 4-7.
- [9] 王晟. 无线传感网络节点定位与覆盖控制理论及技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.  
WANG SH. Wireless sensor network node positioning and coverage control theory and technology [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [10] NICULESU D, NATH B. Ad hoc position system (APS) using AOA [C]. 22nd Annual Joint conf of the IEEE

Computer and Communications Societies (INFOCOM'2003), IEEE, 2003.

- [11] 贾静. NI平台助力物联网时代[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 14-16.  
JIA J. NI platform power of the Internet of things era [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(11): 14-16.
- [12] 卫星, 张芳荣, 段章领, 等. 基于模拟烟火无线传感节点重编程策略[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 537-544.  
WEI X, ZHANG F R, DUAN ZH L, et al. The wireless sensor node reprogramming strategy based on simulated annealing [J]. Journal of Instrument and Meter, 2015, 36(3): 537-544.
- [13] 王曙光, 王庆升, 刘美丽, 等. 无线传感器网络安全测评关键技术研究 [J]. 电子测量技术, 2015, 38(5): 93-96.  
WANG SH G, WANG Q SH, LIU M L, et al. Research on key technologies of wireless sensor network security evaluation [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(5): 93-96.
- [14] SHANG Y, RUMI W, ZHANG Y, et al., Localization from mere connectivity [C]. 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc), 2003.
- [15] 李津蓉, 王万良, 介倩, 等. 结合极大似然距离估计的MDS-MAP节点定位算法[J]. 传感技术学报, 2016, 29(4): 572-577.  
LI J R, WANG W L, JIE Q. The maximum likelihood localization distance estimation algorithm by MDS-MAP [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(4): 572-577.
- [16] 陈岁生, 卢建刚, 楼晓春. 基于MDS-MAP和非线性滤波的WSN定位算法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(5): 866-872.  
CHEN S SH, LU J G, LOU X CH. WSN positioning MDS-MAP and nonlinear filtering algorithm based on [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2012, 46(5): 866-872.

## 作者简介



刘洲洲, 1981年出生, 西北工业大学博士研究生, 西安航空学院副教授。主要研究方向为无线传感器网络, 智能优化算法, 不确定性推理。

E-mail: nazi2005@126.com

Liu Zhouzhou was born in 1981, Ph. D. candidate of Northwestern Polytechnical University, associate professor of Xi'an Aeronautical University. His research areas are wireless sensor network, intelligent optimization algorithm, and uncertainty reasoning.