



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103885028 A

(43) 申请公布日 2014. 06. 25

(21) 申请号 201410155370. 2

(22) 申请日 2014. 04. 17

(71) 申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

(72) 发明人 孟维晓 张德坤 何晨光

(74) 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事务所 23109

代理人 杨立超

(51) Int. Cl.

G01S 5/00 (2006. 01)

H04B 17/00 (2006. 01)

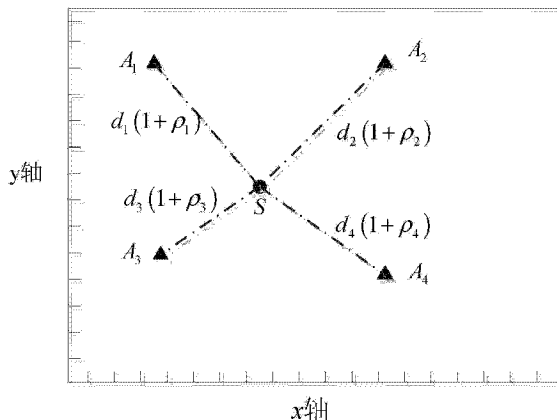
权利要求书4页 说明书9页 附图7页

(54) 发明名称

一种适用于无线传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法

(57) 摘要

一种适用于无线传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法,属于无线传感器定位技术领域。本发明针对现有的分布式传感器定位方法获得位置坐标信息精度不高,计算量大、节点的功率消耗大、计算复杂度高,可定位范围小,锚节点较少的区域中未知节点的定位精度差,甚至有些边缘节点无法定位的问题,提出了一种适用于无线传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法:通过无线传感器网络中的已有的锚节点首先完成部分位于锚节点内部的未知节点的定位,其次通过质心定位算法,进行二次定位,并利用误差概率分布校正位置信息,实现了锚节点贫瘠区未知节点的高精度定位。本发明适用于水下传感器定位,森林防火等具体的应用场景。



1. 一种适用于无线传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法,其特征在于所述方法是按照以下步骤实现的:

步骤一、利用误差概率分布实现部分未知节点的高精度定位,具体过程为:

步骤一(一):通过接收信号强度测算出未知节点与  $n$  个锚节点之间的距离,其中  $n$  表示在未知节点通信半径内的锚节点数目;

步骤一(二):解算未知节点的坐标,推导误差函数;

步骤一(三):通过测量得到误差概率密度函数;

步骤一(四):利用步骤一(三)所得函数,计算联合概率分布:

每个锚节点到未知节点的距离是独立测量的,联合概率分布函数  $f$  为

$$f = \prod_{i=1}^n f(\rho_i) \quad (10);$$

步骤一(五):计算测量误差的期望值:

$$\begin{cases} E(x\_error) = \iint x\_error \times f d\rho_1 d\rho_2 \\ E(y\_error) = \iint y\_error \times f d\rho_1 d\rho_2 \end{cases} \quad (11)$$

$E(x\_error)$ ,  $E(y\_error)$  分别表示横纵坐标的误差期望值;

步骤一(六):利用其他组合的锚节点,重复步骤一(四)和步骤一(五),得到  $M$  组误差均值,之后求平均值,即

$$\begin{cases} \overline{x\_error} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E_j(x\_error) \\ \overline{y\_error} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E_j(y\_error) \end{cases} \quad (12)$$

其中  $M = \binom{n}{2} = \frac{n!}{2 \times (n-2)!}$ ,  $\overline{x\_error}$ ,  $\overline{y\_error}$  分别表示横纵坐标测量误差的平均值;

步骤一(七):利用未知节点通信半径内三个等效锚节点坐标  $(x_i, y_i; x_j, y_j; x_k, y_k)$  估算未知节点的粗略坐标  $(x\_estimate, y\_estimate)$  的均值;

步骤一(八):求最终坐标  $(x\_end, y\_end)$  :

$$\begin{cases} x\_end = \overline{x\_estimate} - \overline{x\_error} \\ y\_end = \overline{y\_estimate} - \overline{y\_error} \end{cases} \quad (15);$$

步骤一(九)精度评估:利用指标均方根距离来衡量定位精度,其表达式为

$$rmsd = (|\overline{x\_end} - x\_true|^2 + |\overline{y\_end} - y\_true|^2)^{1/2} \quad (16)$$

其中  $(x\_true, y\_true)$  表示未知节点的真实位置坐标,  $rmsd$  为指标均方根距离;

步骤二:利用基于误差校正的联合质心算法完成剩余节点的定位,具体过程为:

步骤二(一):选择部分已定位出的未知节点,作为准锚节点,和已有的锚节点共同作为等效锚节点,参与其他未知节点的二次定位;

步骤二(二):通过接收信号强度测算出未知节点与等效锚节点之间的距离;

步骤二(三):利用未知节点通信半径内的三个等效锚节点坐标,算出未知节点的粗略

$$\text{坐标:} \begin{cases} x\_estimate = \frac{a_0 a_1 - a_1 a_2}{a_3 b_1 - a_2 b_2} \\ y\_estimate = \frac{a_0 b_2 - a_1 b_1}{a_2 b_2 - a_3 b_1} \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} a_0 = 0.5[(x_i^2 - x_j^2) + (y_i^2 - y_j^2)] - 0.5(m_i^2 - m_j^2) \\ a_1 = 0.5[(x_j^2 - x_k^2) + (y_j^2 - y_k^2)] - 0.5(m_j^2 - m_k^2) \\ a_2 = y_i - y_j \\ a_3 = y_j - y_k \\ b_1 = x_i - x_j \\ b_2 = x_j - x_k \end{cases} ;$$

步骤二(四):利用其它等效锚节点的重新组合,重复步骤二(三)并获得 N 组坐标粗略估算值,记作  $(x\_eatimate, y\_eatimate)_i, i=1, 2, \dots, N$ , 其中  $N = \binom{q}{3} = \frac{q!}{3 \times (q-3)!}$ , q 表示未知节点通信半径内的锚节点和第一次定位选出的准锚节点的总和;

步骤二(五):从 N 组估算出的位置点中选取 G 个点,其中  $3 \leq G \leq N$ ,选出的 G 构成一个点数最多的凸区域;

步骤二(六):计算凸区域的质心作为未知节点的最终的坐标:

$$\begin{cases} x\_end = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G (x\_eatimate)_i \\ y\_end = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G (y\_eatimate)_i \end{cases} \quad (17);$$

步骤二(七):重复步骤二(二)至步骤二(六),直到完成网络中剩余未知节点的定位。

2. 根据权利要求 1 所述的一种适用于传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法,其特征在于步骤一(二)所述的解算未知节点的坐标过程为:

利用未知节点通信半径内的任意两个锚节点的距离解算如下:

$$\begin{cases} m_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \\ m_j = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2} \end{cases} \quad (1)$$

$(x_i, y_i; x_j, y_j)$  表示锚节点的坐标,  $m_i, m_j$  表示未知节点到锚节点 i, j 的测量距离, x 和 y 表示未知节点的坐标,其中  $i, j=1, 2, \dots, n$ , 且

$$m_k = d_k + \lambda_k = d_k (1 + \rho_k) \quad (2)$$

其中,  $k=1, 2, \dots, n$ ,  $m_k$  表示未知节点到锚节点 k 的测量距离,  $d_k$  表示未知节点到锚节点 k 的真实距离,  $\lambda_k$  表示未知节点到锚节点 k 测量误差,  $\rho_k$  表示未知节点到锚节点 k 测量的不确定度;

结合 (1) 式和 (2) 式,得出未知节点的坐标为:

$$\bar{x} = \frac{1}{4} [(d_i^2 + 2d_i \lambda_i + \lambda_i^2) - (d_j^2 + 2d_j \lambda_j + \lambda_j^2)] \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
y = 1 \pm \frac{1}{4} & \left( -16 + 8d_i^2 + 8d_j^2 - d_i^4 - d_j^4 + 2d_i^2 d_j^2 \right. \\
& + 16d_i \lambda_i + 8\lambda_i^2 + 8d_i \lambda_i d_j \lambda_j - 4d_j^3 \lambda_j \\
& - 16d_j^2 \lambda_j^2 + 2d_j^2 \lambda_i^2 - 4d_j \lambda_j^3 + 2d_j^2 \lambda_j^2 \\
& + 2\lambda_i^2 \lambda_j^2 - 4d_i^3 \lambda_i - 6d_i^2 \lambda_i^2 - 4d_i \lambda_i^3 \\
& - \lambda_i^4 - \lambda_j^4 + 16d_j \lambda_j + 8\lambda_j^2 + 4d_j^2 d_i \lambda_i \\
& \left. + 4d_i^2 d_j \lambda_j + 4\lambda_i^2 d_j \lambda_j + 4\lambda_j^2 d_i \lambda_i \right)^{1/2}
\end{aligned} \quad (19)$$

3. 根据权利要求2所述的一种适用于传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法,其特征在于步骤一(二)所述的推导误差函数过程为:

由于误差相对于距离而言是很小的,因此误差的平方项作差更小,可以忽略,由(18)和(19)式可得

$$\begin{aligned}
x &= \frac{1}{4} \left[ (d_i^2 + 2d_i \lambda_i + \lambda_i^2) - (d_j^2 + 2d_j \lambda_j + \lambda_j^2) \right] \\
&= \frac{1}{4} (d_i^2 - d_j^2) + \frac{1}{2} (d_i \lambda_i - d_j \lambda_j) + \frac{1}{4} (\lambda_i^2 - \lambda_j^2) \\
&\cong \frac{1}{4} (d_i^2 - d_j^2) + \frac{1}{2} (d_i \lambda_i - d_j \lambda_j) \\
&= \text{const} + \frac{1}{2} (d_i \lambda_i - d_j \lambda_j)
\end{aligned} \quad (3)$$

其中  $\text{const} = \frac{1}{4} (d_i^2 - d_j^2)$  表示常数,

则坐标的误差为:

$$\begin{aligned}
x\_error &= \frac{1}{2} (d_i \lambda_i - d_j \lambda_j) \\
&= \frac{1}{2} (d_i^2 \rho_i - d_j^2 \rho_j)
\end{aligned} \quad (4)$$

同理可得

$$\begin{aligned}
y\_error &= \frac{1}{4} \left( \frac{\beta_1}{2\sqrt{\alpha}} \lambda_i + \frac{\beta_2}{2\sqrt{\alpha}} \lambda_j \right) \\
&= \frac{1}{4} \left( \frac{d_1 \beta_1}{2\sqrt{\alpha}} \rho_i + \frac{d_2 \beta_2}{2\sqrt{\alpha}} \rho_j \right)
\end{aligned} \quad (5)$$

其中  $x\_error, y\_error$  分别表示坐标  $x, y$  的误差,且令

$$\begin{cases} \alpha = -16 + 8d_i^2 + 8d_j^2 - d_i^4 - d_j^4 + 2d_i^2 d_j^2 \\ \beta_1 = 16d_i - 4d_i^3 + 4d_i^3 d_j \\ \beta_2 = 16d_j - 4d_j^3 + 4d_j^3 d_i \end{cases}$$

将  $d_i = m_i / (1 + \rho_i)$  和  $g(\rho_i) = (m_i \beta_i \rho_i) / (2(1 + \rho_i) \sqrt{\alpha})$  带入(4)和(5)式得

$$\begin{cases} x\_error = \frac{1}{2} \left( \frac{m_i^2 \rho_i}{(1 + \rho_i)} - \frac{m_j^2 \rho_j}{(1 + \rho_j)} \right) \\ y\_error = \frac{1}{4} (g(\rho_i) + g(\rho_j)) \end{cases} \quad (6)$$

4. 根据权利要求3所述的一种适用于传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质

心定位方法,其特征在于步骤一(三)所述的误差概率密度函数如下:

$$(1) \text{ 无遮挡的环境下服从正态分布: } f(\rho_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\rho_i^2}{2\sigma^2}}, \rho_i \in (-\delta, \delta) \quad (7)$$

$$(2) \text{ 有遮挡的环境下服从瑞利分布: } f(\rho_i) = \frac{\rho_i}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\rho_i^2}{2\sigma^2}\right), \rho_i \geq 0 \quad (8)$$

$$(3) \text{ 空旷环境下服从均匀分布: } f(\rho_i) = \frac{1}{2\delta}, \rho_i \in (-\delta, \delta) \quad (9)$$

其中  $f(\rho_i)$  表示第  $i$  个测量不确定度  $\rho_i$  的概率密度函数,  $i=1, 2$ ,  $\sigma$  表示标准差,  $\delta$  表示误差范围。

5. 根据权利要求 4 所述的一种适用于传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法,其特征在于步骤一(七)所述的估算未知节点的粗略坐标 ( $x\_estimate, y\_estimate$ ) 的均值过程为:根据式(13)进行  $M' = \binom{n}{3}$  次估算,可得估算均值

$(\overline{x\_estimate}, \overline{y\_estimate})$  为

$$\begin{cases} \overline{x\_estimate} = \frac{1}{M'} \sum_{j=1}^{M'} (x\_estimate)_j \\ \overline{y\_estimate} = \frac{1}{M'} \sum_{j=1}^{M'} (y\_estimate)_j \end{cases} \quad (14)。$$

## 一种适用于无线传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种无线传感器网络节点的定位方法,属于无线传感器定位技术领域。

### 背景技术

[0002] 无线传感器网络中定位问题是一个非常活跃的研究领域,目前国内外在该方向上已经有很多的综述和论文发表。这些文献的作者讨论了在各种情况下无线传感器网络中的定位方法,分析和评价了这些方法的优劣和适用的条件。

[0003] 在诸多的应用中,无线传感器网络一个最为重要的用途就是对事件位置信息的获取,譬如水下传感器定位,森林防火等具体的应用场景,因为对于这些事件就是需要知道较为准确的位置信息,否则传感器获得的参数是没有意义的。当利用无线传感器网络对外界进行感知和测量时,传感器网络节点必须先知道自己的位置。传统的传感器节点位置的获取一般包括人工给传感器节点输入位置信息和利用传感器上的 GPS 设备来获得位置信息,考虑到无线传感器网络的规模和部署的环境,人工注入位置信息的方式并不可取,而为每个传感器配备 GPS 设备则大大增加了无线传感器网络的成本和功耗。因此,研究传感器网络中仅有部分节点已知自身位置信息的情况下,如何让其余节点准确的获得自身位置信息显得至关重要。

[0004] 无线传感器网络中的定位方法按照网络定位是否需要获取各节点之间的物理距离,定位方法又可以分为基于测距的定位方法和无需测距的定位方法。

[0005] 相比于其他形式的网络,无线传感器网络没有基础设施支撑,节点能量供应和成本的限制更为严格。对于存在中心节点的集中式传感器网络,由于其他节点和中心节点之间不断进行控制信息和数据信息的交换,中心节点及其周围节点无疑是整个网络通信和能量的瓶颈,同时中心的损毁必然导致整个网络的不能使用。与之相比,分布式传感器网络在网络健壮性和能量利用方面有着更大的优势。因此,研究在分布式无线传感器网络中的定位问题更有实际意义和应用价值。

[0006] 很多文献和专利中提出的方法都是考虑如何利用迭代的手段来获取较为精准的位置信息,但是没有考虑利用误差概率分布来校正获得的位置信息,从而得到精度更高的位置信息,本发明提出的基于误差校正的联合质心定位方法则充分考虑这一点,实现了高精度定位。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的是提出一种适用于无线传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法,以解决针对现有的分布式传感器定位方法获得位置坐标信息精度不高,计算量大、节点的功率消耗大、计算复杂度高,可定位范围小,锚节点(位置已知的传感器节点)较少的区域中未知节点的定位精度差,甚至有些边缘节点无法定位的问题。

[0008] 本发明为解决上述技术问题所采用的技术方案是：

[0009] 本发明利用先定位出的传感器节点，将第一部分定位出的未知节点视为准锚节点，参与二次迭代定位。由于二次迭代定位等效锚节点增多，因此可以利用质心算法定位锚节点贫瘠的区域，这样可以在较少的分布不均匀的无线传感器网络中扩大定位区域。之后，将利用第一部分的误差概率分布方法校正定位坐标。因此本发明提出的方法对于锚节点较少，且无线传感器节点分布不均匀的无线传感器网络具有十分重要的意义。尤其对于相对偏远的节点，经典的质心定位算法会因为信道条件的恶化，存在很大的迭代累积误差，而基于误差校正的联合质心方法则可以提高定位精度。

[0010] 本发明所述的一种适用于无线传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法，是按照以下步骤实现的：

[0011] 步骤一、利用误差概率分布实现部分未知节点的高精度定位，具体过程为：

[0012] 步骤一(一)：通过接收信号强度测算出未知节点与  $n$  个锚节点之间的距离，其中  $n$  表示在未知节点通信半径内的锚节点数目；

[0013] 步骤一(二)：解算未知节点的坐标，推导误差函数；

[0014] 步骤一(三)：通过测量得到误差概率密度函数；

[0015] 步骤一(四)：利用步骤一(三)所得函数，计算联合概率分布；

[0016] 每个锚节点到未知节点的距离是独立测量的，联合概率分布函数  $f$  为

$$[0017] \quad f = \prod_{i=1}^n f(\rho_i) \quad (10);$$

[0018] 步骤一(五)：计算测量误差的期望值：

$$[0019] \quad \begin{cases} E(x\_error) = \iint x\_error \times f d\rho_1 d\rho_2 \\ E(y\_error) = \iint y\_error \times f d\rho_1 d\rho_2 \end{cases} \quad (11)$$

[0020]  $E(x\_error)$ ,  $E(y\_error)$  分别表示横纵坐标的误差期望值；

[0021] 步骤一(六)：利用其他组合的锚节点，重复步骤一(四)和步骤一(五)，得到  $M$  组误差均值，之后求平均值，即

$$[0022] \quad \begin{cases} \overline{x\_error} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E_j(x\_error) \\ \overline{y\_error} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E_j(y\_error) \end{cases} \quad (12)$$

[0023] 其中  $M = \binom{n}{2} = \frac{n!}{2 \times (n-2)!}$ ,  $\overline{x\_error}$ ,  $\overline{y\_error}$  分别表示横纵坐标测量误差的平均

值；

[0024] 步骤一(七)：利用未知节点通信半径内三个等效锚节点坐标  $(x_i, y_i; x_j, y_j; x_k, y_k)$  估算未知节点的粗略坐标  $(x\_estimate, y\_estimate)$  的均值；

[0025] 步骤一(八)：求最终坐标  $(x\_end, y\_end)$ ：

$$[0026] \quad \begin{cases} x\_end = \overline{x\_estimate} - \overline{x\_error} \\ y\_end = \overline{y\_estimate} - \overline{y\_error} \end{cases} \quad (15);$$

[0027] 步骤一(九)精度评估：利用指标均方根距离来衡量定位精度，其表达式为

[0028]  $\text{rmsd} = (||x_{\text{end}} - x_{\text{true}}||^2 + ||y_{\text{end}} - y_{\text{true}}||^2)^{1/2}$  (16)

[0029] 其中  $(x_{\text{true}}, y_{\text{true}})$  表示未知节点的真实位置坐标, rmsd 为指标均方根距离;

[0030] 步骤二:利用基于误差校正的联合质心算法完成剩余节点的定位,具体过程为:

[0031] 步骤二(一):选择部分已定位出的未知节点,作为准锚节点,和已有的锚节点共同作为等效锚节点,参与其他未知节点的二次定位;

[0032] 步骤二(二):通过接收信号强度测算出未知节点与等效锚节点之间的距离;

[0033] 步骤二(三):利用未知节点通信半径内的三个等效锚节点坐标,算出未知节点的粗

[0034] 略坐标: 
$$\begin{cases} x_{\text{estimate}} = \frac{a_0 a_1 - a_1 a_2}{a_3 b_1 - a_2 b_2} \\ y_{\text{estimate}} = \frac{a_0 b_2 - a_1 b_1}{a_2 b_2 - a_3 b_1} \end{cases}$$

[0035] (13)

[0036] 其中

[0037] 
$$\begin{cases} a_0 = 0.5[(x_i^2 - x_j^2) + (y_i^2 - y_j^2)] - 0.5(m_i^2 - m_j^2) \\ a_1 = 0.5[(x_j^2 - x_k^2) + (y_j^2 - y_k^2)] - 0.5(m_j^2 - m_k^2) \\ a_2 = y_i - y_j \\ a_3 = y_j - y_k \\ b_1 = x_i - x_j \\ b_2 = x_j - x_k \end{cases};$$

[0038] 步骤二(四):利用其它等效锚节点的重新组合,重复步骤二(三)并获得 N 组坐标粗

略估算值,记作  $(x_{\text{eatimate}}, y_{\text{eatimate}})_i, i=1, 2, \dots, N$ , 其中  $N = \binom{q}{3} = \frac{q!}{3! \times (q-3)!}$ , q 表示未

知节点通信半径内的锚节点和第一次定位选出的准锚节点的总和;

[0039] 步骤二(五):从 N 组估算出的位置点中选取 G 个点,其中  $3 \leq G \leq N$ ,选出的 G 构成一个点数最多的凸区域;

[0040] 步骤二(六):计算凸区域的质心作为未知节点的最终的坐标:

[0041] 
$$\begin{cases} x_{\text{end}} = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G (x_{\text{eatimate}})_i \\ y_{\text{end}} = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G (y_{\text{eatimate}})_i \end{cases} \quad (17);$$

[0042] 步骤二(七):重复步骤二(二)至步骤二(六),直到完成网络中剩余未知节点的定位。

[0043] 本发明的有益效果是:

[0044] 本发明与现有的分布式传感器定位方法相比优点在于:

[0045] 一、在基于 RSSI (接收信号强度)获得的带有误差的位置坐标的基础上,利用误差概率分布特性,校正了获得的坐标信息,使获得的位置坐标信息精度提高了 28% ~ 32%。

[0046] 二、与现有的方法利用迭代的手段相比降低了计算量,节点的功率消耗降低,计算复杂度低。



[0047] 三、扩大了定位范围,并解决了锚节点(位置已知的传感器节点)较少的区域中未知节点的定位精度差,甚至有些边缘节点无法定位的问题。

### 附图说明

[0048] 图 1 为本发明的差错概率分布定位原理示意图,其中  $A_1, A_2, A_3, A_4$  为锚节点,  $S$  为未知节点,  $d_1(1+\rho_1), d_2(1+\rho_2), d_3(1+\rho_3), d_4(1+\rho_4)$  分别表示未知节点  $S$  到锚节点  $A_1, A_2, A_3, A_4$  的测量距离;

[0049] 图 2 为本发明的基于误差校正的联合质心方法定位原理图;

[0050] 图 3 为本发明的定位节点分布图;

[0051] 图 4 为本发明的定位误差分布图;

[0052] 图 5(a) 为服从均匀分布时,现有的最小二乘估计算法估计误差分布直方图;

[0053] 图 5(b) 为服从均匀分布时,本发明的基于误差校正的联合质心定位方法的估计误差分布直方图;

[0054] 图 6 为服从均匀分布时,现有的最小二乘估计算法和本发明的基于误差校正的联合质心定位方法的累积分布函数, CDF 表示累积分布函数;

[0055] 图 7(a) 为服从正态分布时,现有的最小二乘估计算法估计误差分布直方图;

[0056] 图 7(b) 为服从正态分布时,本发明的基于误差校正的联合质心定位方法的估计误差分布直方图;

[0057] 图 8 为服从正态分布时,现有的最小二乘估计算法和本发明的基于误差校正的联合质心定位方法的累积分布函数;

[0058] 图 9(a) 为现有的质心定位算法估计误差分布直方图;

[0059] 图 9(b) 为本发明的基于误差校正的联合质心定位方法估计误差分布直方图;

[0060] 图 10 为现有的质心算法与本发明的基于误差校正的联合质心定位方法的累积概率密度函数。

### 具体实施方式

[0061] 具体实施方式一:本实施方式所述的一种适用于无线传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法,是按照以下步骤实现的:

[0062] 步骤一、利用误差概率分布实现部分未知节点的高精度定位,具体过程为:

[0063] 步骤一(一):通过接收信号强度测算出未知节点与  $n$  个锚节点之间的距离,其中  $n$  表示在未知节点通信半径内的锚节点数目;

[0064] 步骤一(二):解算未知节点的坐标,推导误差函数;

[0065] 步骤一(三):通过测量得到误差概率密度函数;

[0066] 步骤一(四):利用步骤一(三)所得函数,计算联合概率分布;

[0067] 每个锚节点到未知节点的距离是独立测量的,联合概率分布函数  $f$  为

$$[0068] \quad f = \prod_{i=1}^n f(\rho_i) \quad (10);$$

[0069] 步骤一(五):计算测量误差的期望值:

$$[0070] \quad \begin{cases} E(x\_error) = \iint x\_error \times f d\rho_1 d\rho_2 \\ E(y\_error) = \iint y\_error \times f d\rho_1 d\rho_2 \end{cases} \quad (11)$$

[0071]  $E(x\_error)$ ,  $E(y\_error)$  分别表示横纵坐标的误差期望值；

[0072] 步骤一(六):利用其他组合的锚节点,重复步骤一(四)和步骤一(五),得到 M 组误差均值,之后求平均值,即

$$[0073] \quad \begin{cases} \overline{x\_error} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E_j(x\_error) \\ \overline{y\_error} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E_j(y\_error) \end{cases} \quad (12)$$

[0074] 其中  $M = \binom{n}{2} = \frac{n!}{2 \times (n-2)!}$ ,  $\overline{x\_error}$ ,  $\overline{y\_error}$  分别表示横纵坐标测量误差的平均值；

[0075] 步骤一(七):利用未知节点通信半径内三个等效锚节点坐标  $(x_i, y_i; x_j, y_j; x_k, y_k)$  估算未知节点的粗略坐标  $(x\_estimate, y\_estimate)$  的均值；

[0076] 步骤一(八):求最终坐标  $(x\_end, y\_end)$ ：

$$[0077] \quad \begin{cases} x\_end = \overline{x\_estimate} - \overline{x\_error} \\ y\_end = \overline{y\_estimate} - \overline{y\_error} \end{cases} \quad (15);$$

[0078] 步骤一(九)精度评估:利用指标均方根距离来衡量定位精度,其表达式为

$$[0079] \quad rmsd = (||x\_end - x\_true||^2 + ||y\_end - y\_true||^2)^{1/2} \quad (16)$$

[0080] 其中  $(x\_true, y\_true)$  表示未知节点的真实位置坐标,  $rmsd$  为指标均方根距离；

[0081] 步骤二:利用基于误差校正的联合质心算法完成剩余节点的定位,具体过程为：

[0082] 步骤二(一):选择部分已定位出的未知节点,作为准锚节点,和已有的锚节点共同作为等效锚节点,参与其他未知节点的二次定位；

[0083] 步骤二(二):通过接收信号强度测算出未知节点与等效锚节点之间的距离；

[0084] 步骤二(三):利用未知节点通信半径内的三个等效锚节点坐标,算出未知节点的粗

$$[0085] \quad \text{略坐标:} \begin{cases} x\_estimate = \frac{a_0 a_1 - a_1 a_2}{a_3 b_1 - a_2 b_2} \\ y\_estimate = \frac{a_0 b_2 - a_1 b_1}{a_2 b_2 - a_3 b_1} \end{cases}$$

[0086] (13)

[0087] 其中

$$[0088] \quad \begin{cases} a_0 = 0.5[(x_i^2 - x_j^2) + (y_i^2 - y_j^2)] - 0.5(m_i^2 - m_j^2) \\ a_1 = 0.5[(x_j^2 - x_k^2) + (y_j^2 - y_k^2)] - 0.5(m_j^2 - m_k^2) \\ a_2 = y_i - y_j \\ a_3 = y_j - y_k \\ b_1 = x_i - x_j \\ b_2 = x_j - x_k \end{cases} ;$$

[0089] 步骤二(四):利用其它等效锚节点的重新组合,重复步骤二(三)并获得 N 组坐标粗略估算值,记作  $(x\_eatimate, y\_eatimate)_i, i=1, 2, \dots, N$ , 其中  $N = \binom{q}{3} = \frac{q!}{3! \times (q-3)!}$ , q 表示未知节点通信半径内的锚节点和第一次定位选出的准锚节点的总和;

[0090] 步骤二(五):从 N 组估算出的位置点中选取 G 个点,其中  $3 \leq G \leq N$ ,选出的 G 构成一个点数最多的凸区域;

[0091] 步骤二(六):计算凸区域的质心作为未知节点的最终的坐标:

$$[0092] \quad \begin{cases} x\_end = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G (x\_eatimate)_i \\ y\_end = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G (y\_eatimate)_i \end{cases} \quad (17);$$

[0093] 步骤二(七):重复步骤二(二)至步骤二(六),直到完成网络中剩余未知节点的定位。

[0094] 具体实施方式二:本实施方式与具体实施方式一不同的是:步骤一(二)所述的解算未知节点的坐标过程为:

[0095] 利用未知节点通信半径内的任意两个锚节点的距离解算如下:

$$[0096] \quad \begin{cases} m_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \\ m_j = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2} \end{cases} \quad (1)$$

[0097]  $(x_i, y_i; x_j, y_j)$  表示锚节点的坐标,  $m_i, m_j$  表示未知节点到锚节点 i, j 的测量距离, x 和 y 表示未知节点的坐标,其中  $i, j=1, 2, \dots, n$ , 且

$$[0098] \quad m_k = d_k + \lambda_k = d_k (1 + \rho_k) \quad (2)$$

[0099] 其中,  $k=1, 2, \dots, n$ ,  $m_k$  表示未知节点到锚节点 k 的测量距离,  $d_k$  表示未知节点到锚节点 k 的真实距离,  $\lambda_k$  表示未知节点到锚节点 k 测量误差,  $\rho_k$  表示未知节点到锚节点 k 测量的不确定度;

[0100] 结合 (1) 式和 (2) 式,得出未知节点的坐标为:

$$[0101] \quad x = \frac{1}{4} [(d_i^2 + 2d_i \lambda_i + \lambda_i^2) - (d_j^2 + 2d_j \lambda_j + \lambda_j^2)] \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
y = 1 \pm \frac{1}{4} & \left( -16 + 8d_i^2 + 8d_j^2 - d_i^4 - d_j^4 + 2d_i^2 d_j^2 \right. \\
& + 16d_i \lambda_i + 8\lambda_i^2 + 8d_i \lambda_i d_j \lambda_j - 4d_j^3 \lambda_j \\
& - 16d_j^2 \lambda_j^2 + 2d_j^2 \lambda_i^2 - 4d_j \lambda_j^3 + 2d_i^2 \lambda_j^2 \\
& + 2\lambda_i^2 \lambda_j^2 - 4d_i^3 \lambda_i - 6d_i^2 \lambda_i^2 - 4d_i \lambda_i^3 \\
& - \lambda_i^4 - \lambda_j^4 + 16d_j \lambda_j + 8\lambda_j^2 + 4d_j^2 d_i \lambda_i \\
& \left. + 4d_i^2 d_j \lambda_j + 4\lambda_i^2 d_j \lambda_j + 4\lambda_j^2 d_i \lambda_i \right)^{1/2}
\end{aligned} \tag{19}$$

[0103] 其它步骤及参数与具体实施方式一相同。

[0104] 具体实施方式三：本实施方式与具体实施方式一或二不同的是：步骤一(二)所述的推导误差函数过程为：

[0105] 由于误差相对于距离而言是很小的，因此误差的平方项作差更小，可以忽略，由(18)和(19)式可得

$$\begin{aligned}
x &= \frac{1}{4} \left[ (d_i^2 + 2d_i \lambda_i + \lambda_i^2) - (d_j^2 + 2d_j \lambda_j + \lambda_j^2) \right] \\
&= \frac{1}{4} (d_i^2 - d_j^2) + \frac{1}{2} (d_i \lambda_i - d_j \lambda_j) + \frac{1}{4} (\lambda_i^2 - \lambda_j^2) \\
&\cong \frac{1}{4} (d_i^2 - d_j^2) + \frac{1}{2} (d_i \lambda_i - d_j \lambda_j) \\
&= \text{const} + \frac{1}{2} (d_i \lambda_i - d_j \lambda_j)
\end{aligned} \tag{3}$$

[0107] 其中  $\text{const} = \frac{1}{4} (d_i^2 - d_j^2)$  表示常数，

[0108] 则坐标的误差为：

$$\begin{aligned}
x_{\text{error}} &= \frac{1}{2} (d_i \lambda_i - d_j \lambda_j) \\
&= \frac{1}{2} (d_i^2 \rho_i - d_j^2 \rho_j)
\end{aligned} \tag{4}$$

[0110] 同理可得

$$\begin{aligned}
y_{\text{error}} &= \frac{1}{4} \left( \frac{\beta_1}{2\sqrt{\alpha}} \lambda_i + \frac{\beta_2}{2\sqrt{\alpha}} \lambda_j \right) \\
&= \frac{1}{4} \left( \frac{d_1 \beta_1}{2\sqrt{\alpha}} \rho_i + \frac{d_2 \beta_2}{2\sqrt{\alpha}} \rho_j \right)
\end{aligned} \tag{5}$$

[0112] 其中  $x_{\text{error}}, y_{\text{error}}$  分别表示坐标  $x, y$  的误差，且令

$$\begin{cases} \alpha = -16 + 8d_j^2 + 8d_i^2 - d_j^4 - d_i^4 + 2d_i^2 d_j^2 \\ \beta_1 = 16d_i - 4d_i^3 + 4d_j^3 d_i \\ \beta_2 = 16d_j - 4d_j^3 + 4d_i^3 d_j \end{cases} ,$$

[0114] 将  $d_i = m_i / (1 + \rho_i)$  和  $g(\rho_i) = (m_i \beta_i \rho_i) / (2(1 + \rho_i) \sqrt{\alpha})$  带入(4)和(5)式得

$$[0115] \quad \begin{cases} x\_error = \frac{1}{2} \left( \frac{m_i^2 \rho_i}{(1+\rho_i)} - \frac{m_j^2 \rho_j}{(1+\rho_j)} \right) \\ y\_error = \frac{1}{4} (g(\rho_i) + g(\rho_j)) \end{cases} \quad (6)。$$

[0116] 其它步骤及参数与具体实施方式一或二相同。

[0117] 具体实施方式四：本实施方式与具体实施方式一至三之一不同的是：步骤一(三)所述的误差概率密度函数如下：

[0118] (1) 无遮挡的环境下服从正态分布：

$$f(\rho_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\rho_i^2}{2\sigma^2}}, \quad \rho_i \in (-\delta, \delta) \quad (7)$$

[0119] (2) 有遮挡的环境下服从瑞利分布： $f(\rho_i) = \frac{\rho_i}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\rho_i^2}{2\sigma^2}\right)$ ,  $\rho_i \geq 0$  (8)

[0120] (3) 空旷环境下服从均匀分布： $f(\rho_i) = \frac{1}{2\delta}$ ,  $\rho_i \in (-\delta, \delta)$  (9)

[0121] 其中  $f(\rho_i)$  表示第  $i$  个测量不确定度  $\rho_i$  的概率密度函数,  $i=1, 2$ ,  $\sigma$  表示标准差,  $\delta$  表示误差范围。

[0122] 其它步骤及参数与具体实施方式一至三之一相同。

[0123] 具体实施方式五：本实施方式与具体实施方式一至四之一不同的是：步骤一(七)所述的估算未知节点的粗略坐标  $(x\_estimate, y\_estimate)$  的均值过程为：根据式(13)进行  $M^{\wedge} = \binom{n}{3}$  次估算, 可得估算均值  $(\overline{x\_estimate}, \overline{y\_estimate})$  为

$$[0124] \quad \begin{cases} \overline{x\_estimate} = \frac{1}{M^{\wedge}} \sum_{j=1}^{M^{\wedge}} (x\_estimate)_j \\ \overline{y\_estimate} = \frac{1}{M^{\wedge}} \sum_{j=1}^{M^{\wedge}} (y\_estimate)_j \end{cases} \quad (14)。$$

[0125] 其它步骤及参数与具体实施方式一至四之一相同。

[0126] 本发明提出的一种适用于无线传感器网络节点定位的基于误差校正的联合质心定位方法, 在每一个未知节点定位时必须在其通信半径范围内有至少两个位置信息已知的传感器节点, 即锚节点；且通过测量获得误差概率分布情况的前提下适用于节点分布不均匀的无线传感器网络。基于误差校正的联合质心定位方法主要是利用误差概率分布来校正通过 RSSI (接收信号强度) 估算出的位置信息, 提高了定位精度。通过无线传感器网络中的已有的锚节点首先完成部分位于锚节点内部的未知节点的定位。其次通过质心定位算法, 进行二次定位, 并利用误差概率分布校正位置信息, 实现了锚节点贫瘠区未知节点的高精度定位。

[0127] 实施例一、定位效果：图 3 中“□”表示锚节点, “☆”表示未知节点, 共 30 个节点, 其中 24 个未知节点, 分布在  $100 \times 100m$  的区域内。图 4 表示定位结束后误差分布图, 当“圆圈”和“五角星”重合时表示定位成功, 没有圆圈表示未定位成功。很明显 20 个未知节点定位成功。

[0128] 实施例二、当误差服从均匀分布时,基于  $100 \times 100\text{m}$  区域内随机部署 30 个点,仍然是 24 个未知节点,采用现有的最小二乘估计算法和本发明方法分别进行定位,重复此过程 10000 次,统计得到了图 5 与图 6 的仿真结果。

[0129] 图 5 给出了现有的经典的经典的最小二乘估计算法的误差分布和本发明提出的基于误差校正的联合质心定位方法误差分布,很明显本发明方法的定位精度要好于经典的方法。

[0130] 图 6 中的两种算法的累积分布函数可以更加清晰地看出本发明的优势。

[0131] 比较衡量指标 RMSD (均方根距离),最小二乘法与基于误差校正的联合质心定位方法的比值为 :0.017 :0.0078。

[0132] 实施例三、当误差服从正态分布时,基于  $100 \times 100\text{m}$  区域内随机部署 30 个点,其中 24 个未知节点,采用现有的最小二乘估计算法和本发明方法分别进行定位,重复此过程 10000 次,统计得到了图 7 与图 8 的仿真结果。

[0133] 从图 7 和图 8 可以看出,当传感器网络处于的环境服从正态分布时,本发明提出的定位方法优势更加明显。

[0134] 比较衡量指标 RMSD (均方根距离),现有的最小二乘法与本发明提出的基于误差校正的联合质心定位方法比值为 :0.00133 :0.00097。

[0135] 实施例四、基于  $100 \times 100\text{m}$  区域内随机部署 30 个点,其中 24 个未知节点,采用本发明提出的基于误差校正的联合质心定位方法与现有的质心定位方法分别进行定位,重复此过程 10000 次,统计得到了图 9 与图 10 的仿真结果。

[0136] 本发明提出的基于误差校正的联合质心定位方法与现有的质心定位方法的仿真结果比较分析 :由图 9 和图 10 可以看出本发明提出的基于误差校正的联合质心定位方法的定位精度更高,并且扩大了定位的范围。

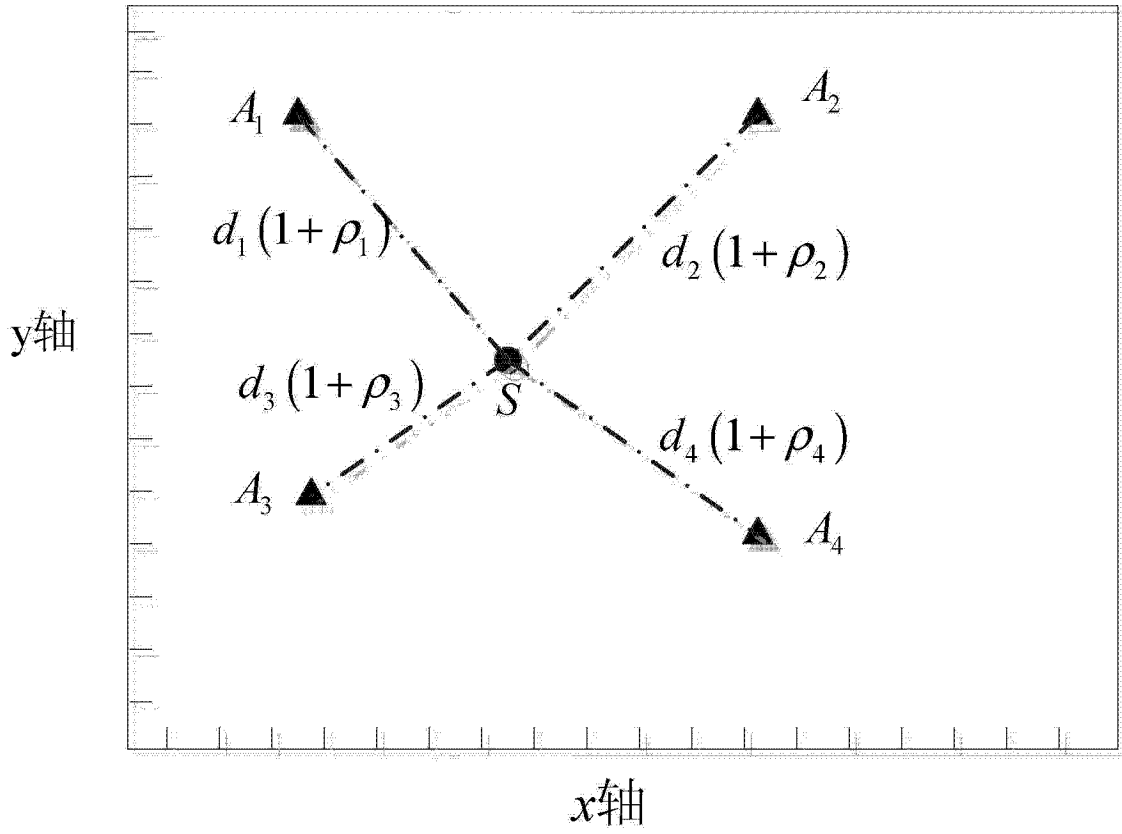


图 1

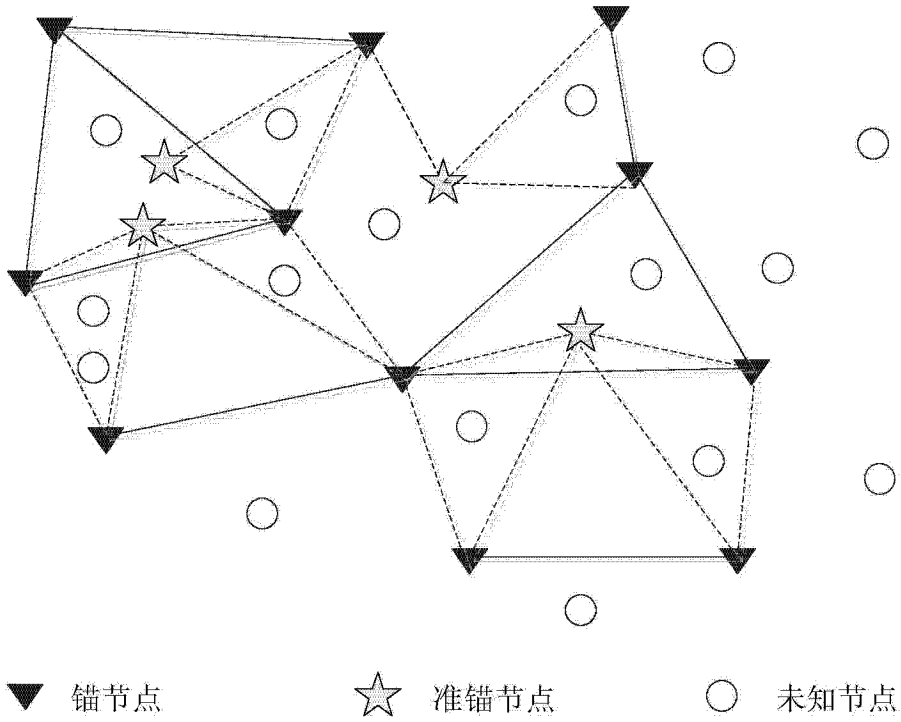


图 2

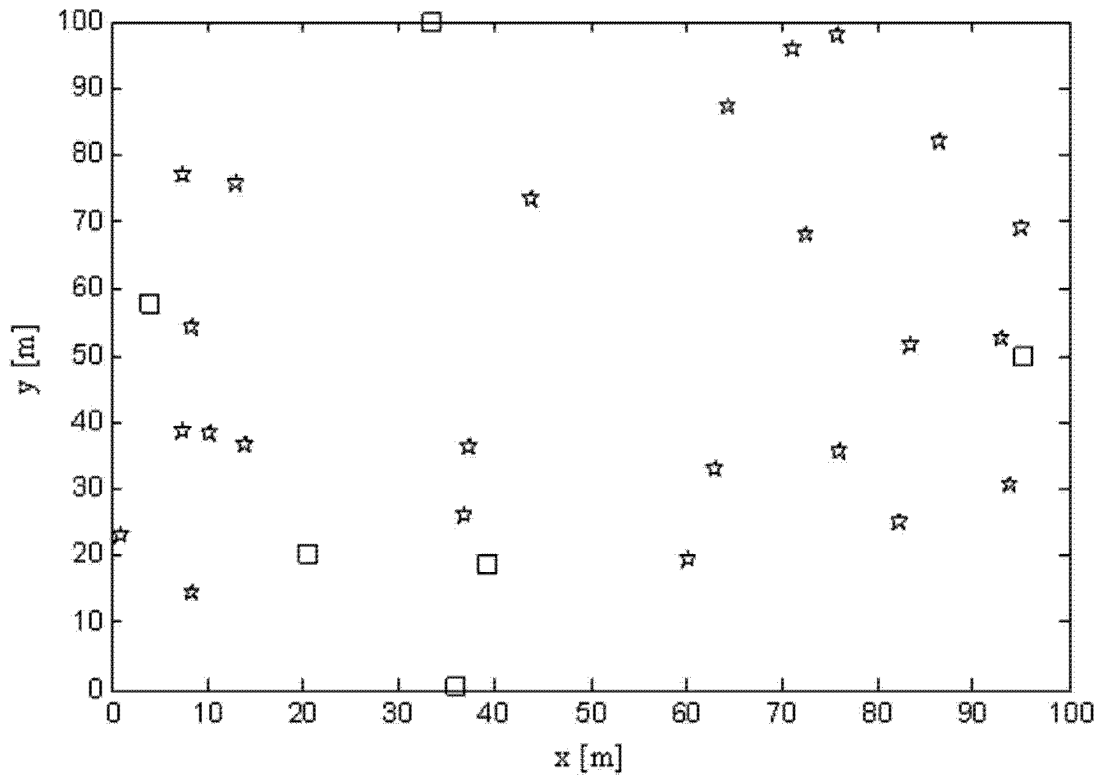


图 3



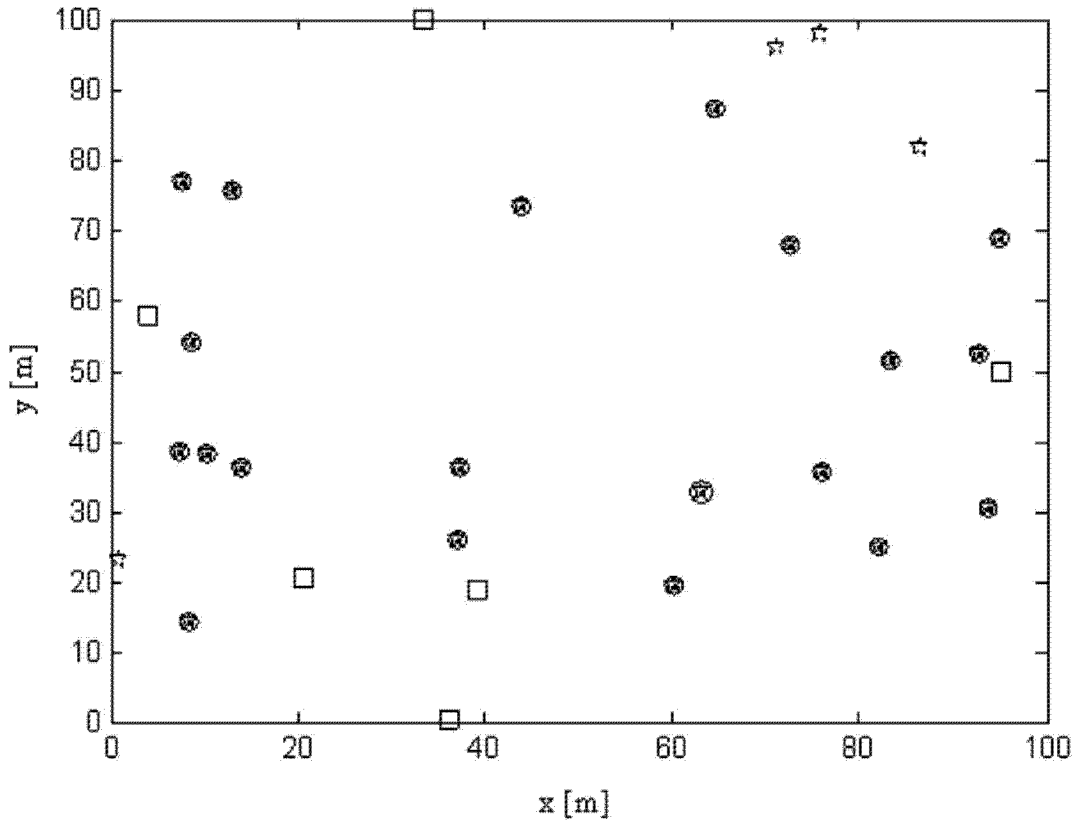


图 4

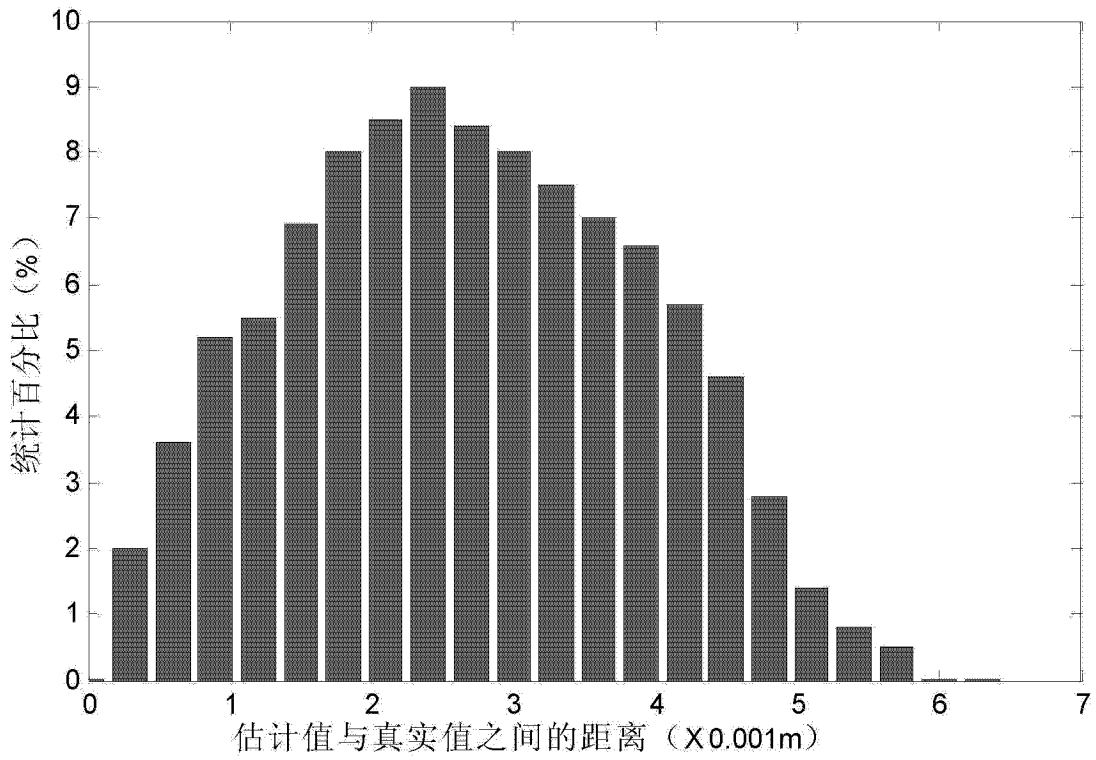


图 5(a)

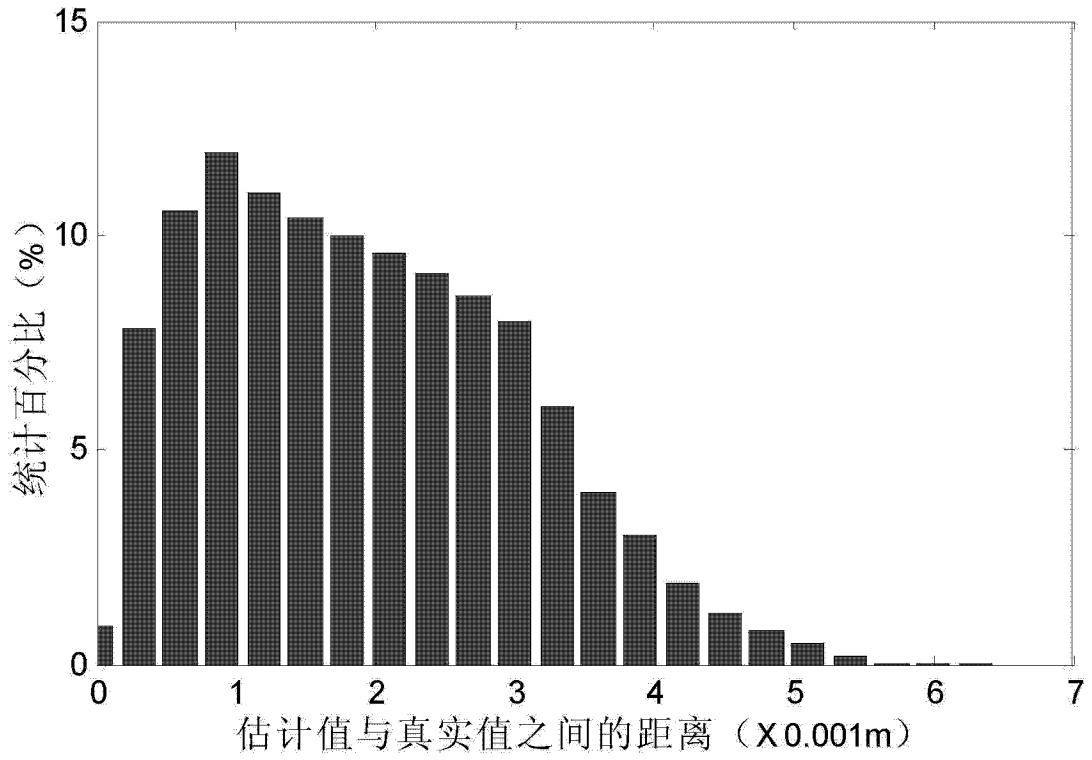


图 5(b)

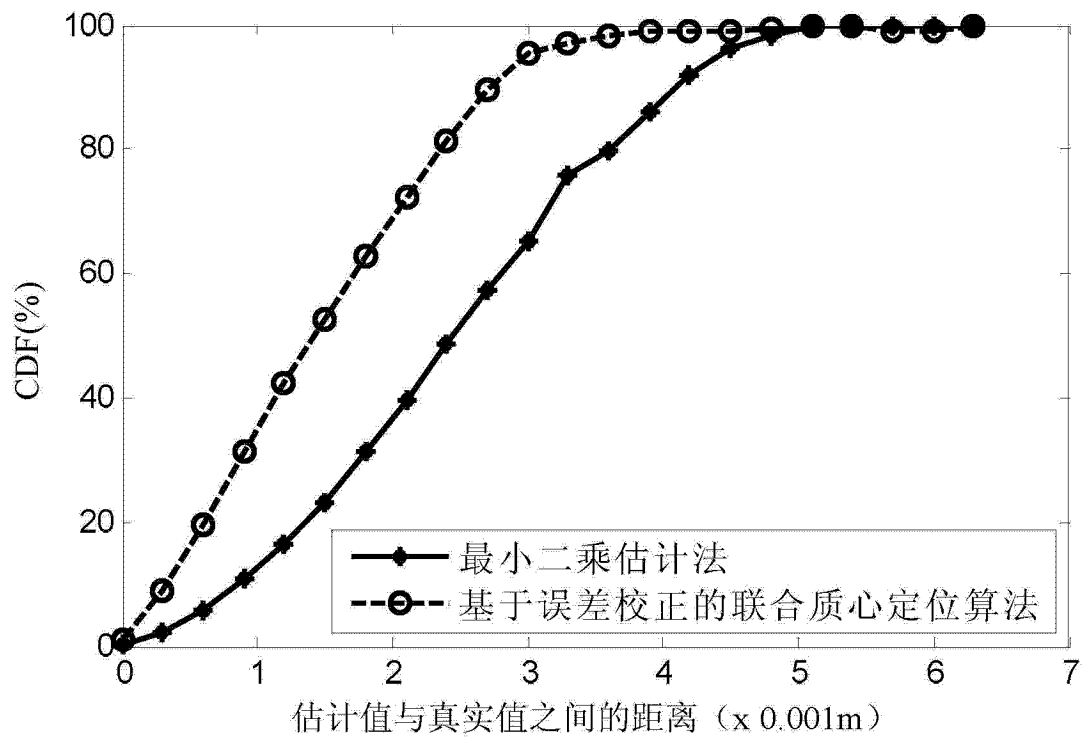


图 6

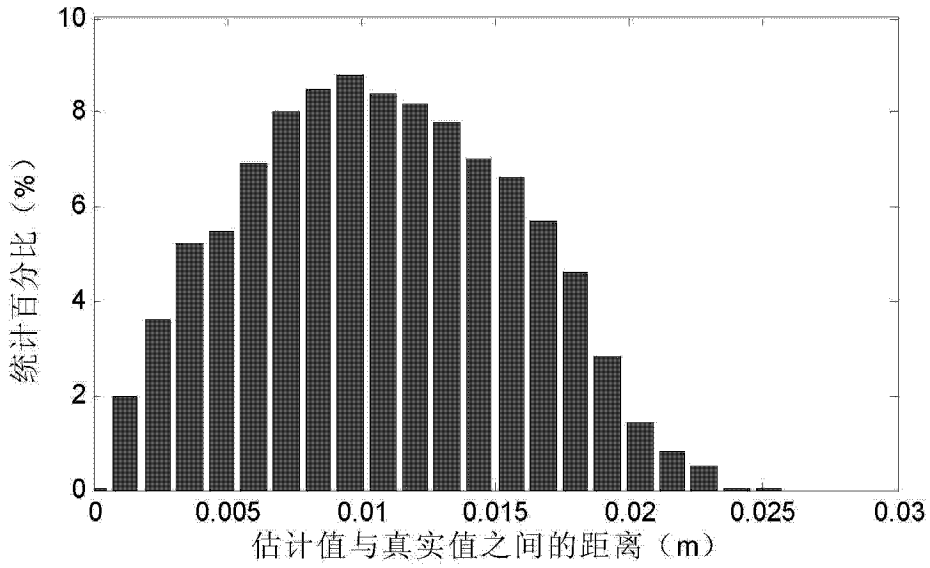


图 7(a)

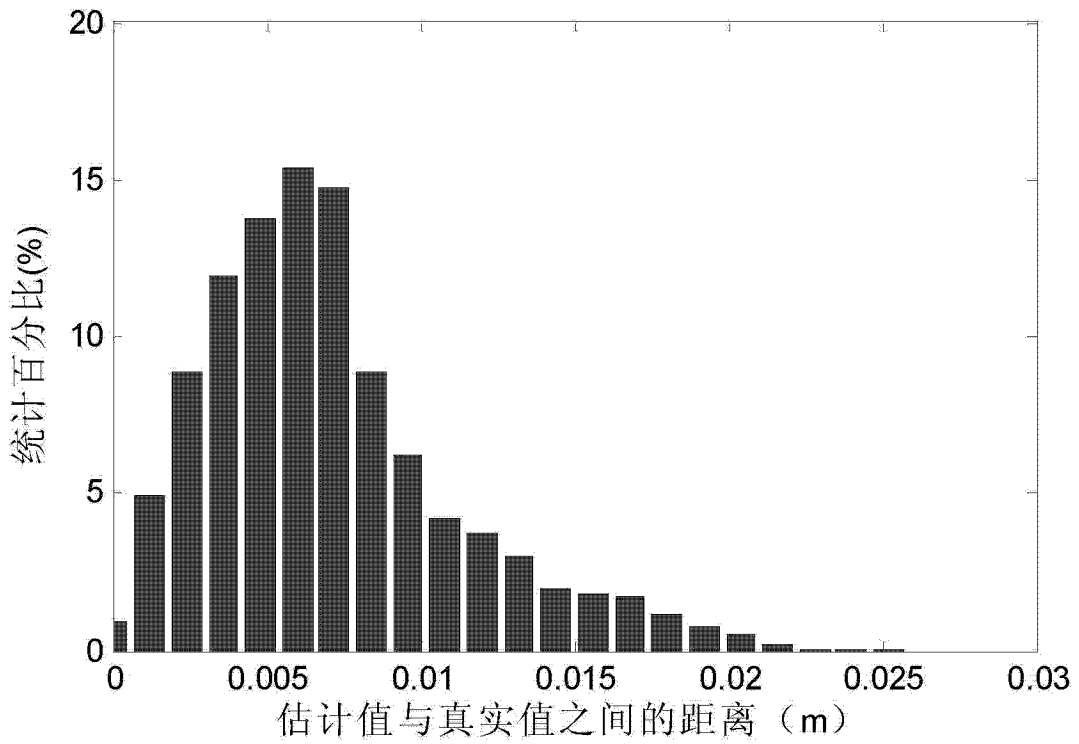


图 7(b)

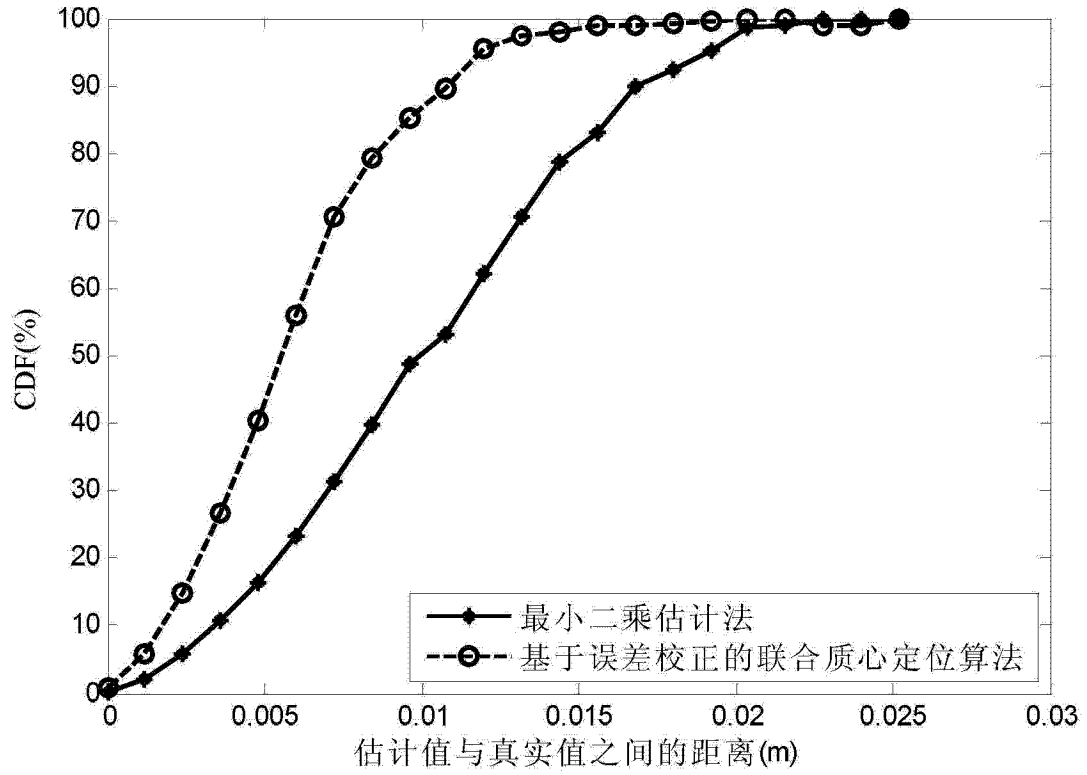


图 8

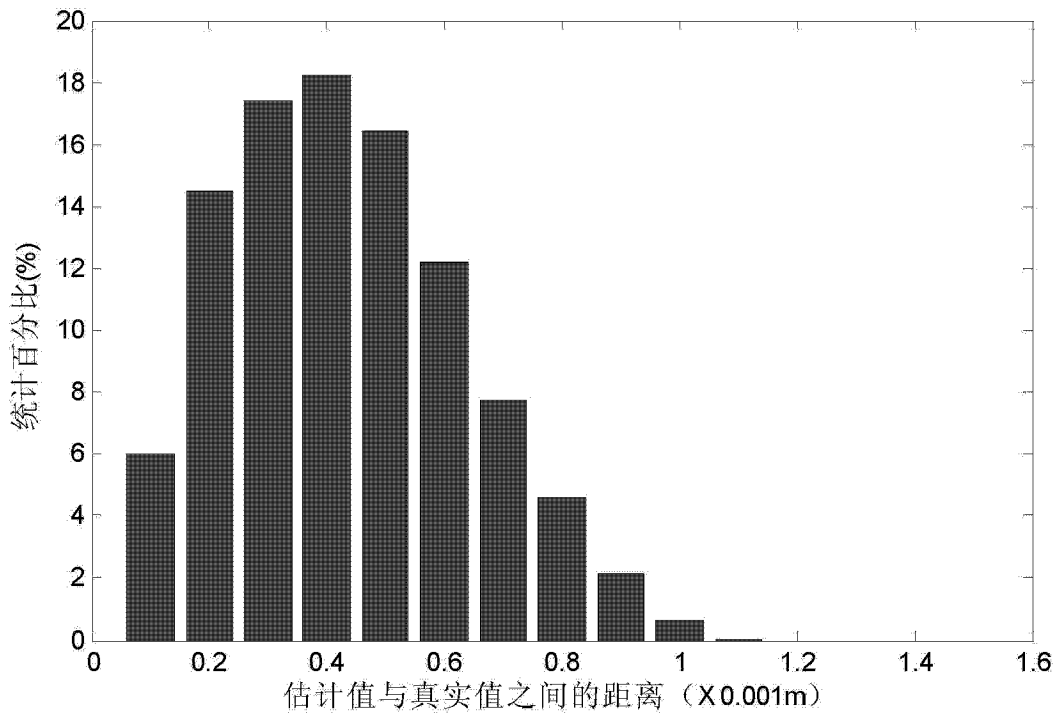


图 9(a)

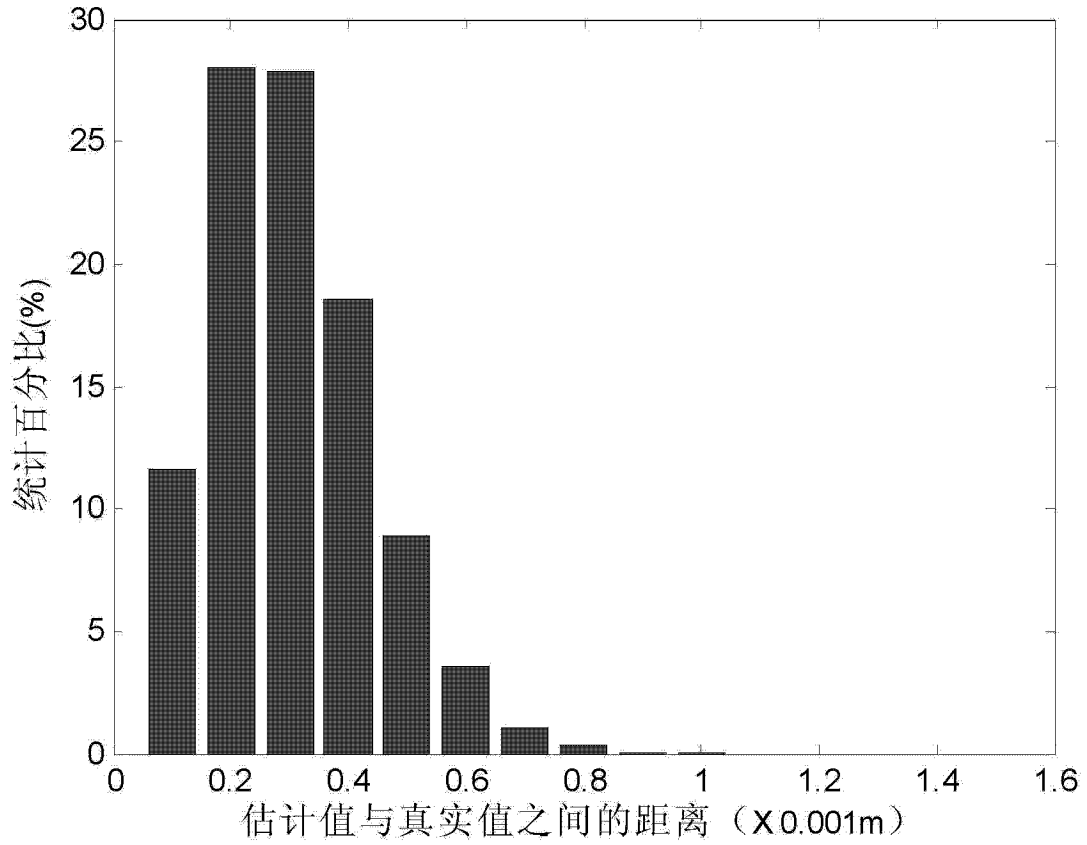


图 9(b)

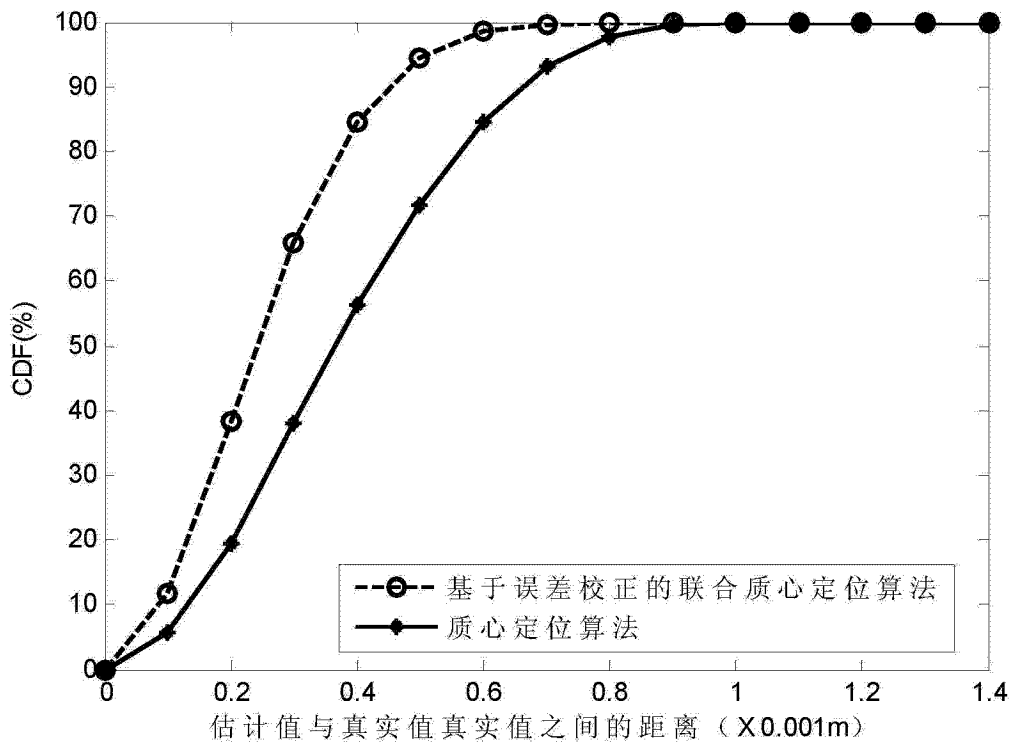


图 10