

Acoustic Target Location Based on RSSI and DFP in WSN

LIU Liyang, ZHANG Jincheng*, WU Zhonglin, NI Peng

(AFEU, Missile Institute, Sanyuan Shanxi 713800, China)

Abstract: Acoustic target location is an important problem in application study of WSN. It is difficult to make a quick target location with high location accuracy under the condition that the sensor nodes are random distributed. The article converts acoustic target location problem into optimization of likelihood function based on RSSI of acoustic signal in two-dimension space. Then, it makes out the global optimum solution using DFP method in optimization theory. The emulation result shows that the method meets the need of rapid and accurate location and possesses practical application value.

Key words: wireless sensor network; target location; received signal strength indicator; energy attenuation model; DFP method

EEACC:6150P

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2011.10.019

基于 RSSI&DFP 的无线传感器网络声源目标定位算法

刘立阳, 张金成*, 吴中林, 倪鹏

(空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要: 声源目标定位是无线传感器网络应用研究的一个重要问题, 如何在传感器节点随机分布的条件下对目标进行快速定位, 并保证较高的定位精度是定位问题的一个难点, 基于二维空间中声音信号传播时的能量强度指示 (RSSI) 将声源目标的定位问题转化为似然函数的最优化问题, 利用最优化理论中的 DFP 方法求出目标位置的全局最优解。仿真结果表明, 算法达到了快速准确的要求, 具有一定的实际应用价值。

关键词: 无线传感器网络; 目标定位; 能量强度指示; 能量衰减模型; DFP 方法

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)10-1464-05

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 就是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成, 通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统^[1]。在无线传感器网络的众多应用领域中, 目标定位是其中的一个重要方面, 它是利用网络内多个传感器节点检测到的目标信息估计出某一时刻该目标的位置。而基于接收信号强度指示 (Received Signal Strength Indicator, RSSI) 的声源目标的定位方法由于其不受视线影响、隐蔽性好、能耗小、易于实现等特点普遍存在于常见目标和检测环境中。

声源目标定位算法可分为两类, 一类以最大似然方法为基础, 得到以声源位置和能量为参数的似

然函数, 然后通过搜索或者迭代的方式求出结果。另一类以最小二乘方法为基础, 将不同节点接收到的能量相比, 消去声源能量, 然后用最小二乘的方法进行计算。通过对声源定位算法进行分析不难发现, 最大似然方法要比最小二乘方法的定位精度高很多, 所以在对定位精度要求比较高的场合往往采用前一种方法。Zhao Feng 等人^[2-4]采用声音幅值衰减模型, 推导出似然函数的概率分布, 借助序贯贝叶斯估计对目标进行定位; Sheng Xiaohong 等人^[5-6]基于声音能量衰减模型, 应用极大似然法对目标进行定位。在最大似然方法中, 似然函数的建立直接决定了定位精度的好坏, 同时在对似然函数进行求解时, 算法的选取往往也对收敛速度的快慢产生重

要的影响。为此,本文以传感器节点在二维空间中自由分布为背景,以声源能量衰减模型为基础,用最大似然方法将声源的定位问题转化为似然函数的最优化问题,运用 DFP(Davidon-Fletcher-Powell)算法解决搜索似然函数极值的问题,从仿真结果来看,这种算法相比于其它运用似然函数的算法而言,定位精度有明显提高,并且能够有效地提高算法迭代的收敛速度,符合对定位精度要求较高的实际应用的需要。

1 声源能量的衰减模型

1.1 声源能量衰减模型的推导

在推导声音能量衰减模型之前需要做如下假设:(1)声音在均匀介质中全向传播;(2)不考虑传感器网络内障碍物的影响,并将目标源看作一个点声源;(3)假设背景噪音是均值为 0,方差已知的高斯白噪声;(4)假设声源衰减能量与背景噪声能量互不相关。

由声音的传播规律可知,声音信号的能量与它传播距离的平方成反比^[7-10],声源能量衰减模型正是利用这一特性,通过将每个声音传感器节点检测到的声音信号转化为能量值,代入模型估计出声源的位置。模型具体推导如下:

假设声源目标某时刻 t 进入无线传感器网络的监测区域,此时有 N 个节点检测到声音信号,则传感器节点 i 检测到的能量可表示为:

$$e_i(t) = s_i(t) + \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

其中, $e_i(t)$ 表示 t 时刻传感器节点 i 测得的声音信号能量; $s_i(t)$ 表示 t 时刻声源传播到节点 i 衰减后的能量值; $\varepsilon_i(t)$ 表示 t 时刻节点 i 处的噪声能量值。

$s_i(t)$ 又可以表示为:

$$s_i(t) = g_i \frac{S(t)}{|r(t) - r_i|^2} \quad (2)$$

其中, g_i 表示传感器节点 i 处的噪声影响系数; $S(t)$ 表示 t 时刻的声源能量; r_i 表示节点 i 的位置坐标; $r(t)$ 表示 t 时刻声源目标的位置坐标。节点和目标位置坐标均为二维坐标。

令 $d_i(t) = |r(t) - r_i|$,可以得到声音能量衰减公式:

$$e_i(t) = g_i \frac{S(t)}{|r(t) - r_i|^2} + \varepsilon_i(t) = g_i \frac{S(t)}{d_i^2(t)} + \varepsilon_i(t) \quad (3)$$

1.2 噪声能量 $\varepsilon_i(t)$ 均值和方差的推导

噪声能量 $\varepsilon_i(t)$ 概率密度的求取非常关键,它反映了测量节点受噪声的影响程度,对于后续的目标定位算法有着重要的意义。假设在时间窗 $(t-T/2,$

$t+T/2)$ 内采样点的个数为 M ,采样频率为 f_s ,则可以得到窗长为 $T=M/f_s$,假设 $a_i(t)$ 为 t 时刻传感器节点 i 处噪声的幅值,服从高斯分布 $N(0, \sigma_i^2)$,则

$$\varepsilon_i(t) = \frac{T}{M} \sum_{k=1}^M a_i^2(t) = \frac{1}{f_s} \sum_{k=1}^M a_i^2(t) \quad (4)$$

其中, $\varepsilon_i(t)$ 服从 χ^2 分布,根据中心极限定理,当 M 足够大时, $\varepsilon_i(t)$ 近似服从正态分布,并可以得到:

$\varepsilon_i(t)$ 的均值

$$\begin{aligned} \mu_i &= E[\varepsilon_i(t)] = E\left[\frac{1}{f_s} \sum_{k=1}^M a_i^2(t)\right] = \\ &= \frac{1}{f_s} E[a_i^2(1) + a_i^2(2) + \dots + a_i^2(M)] = \frac{1}{f_s} \cdot M \cdot \sigma_i^2 = T\sigma_i^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$\varepsilon_i(t)$ 的方差

$$\begin{aligned} \delta_i^2 &= D[\varepsilon_i(t)] = D\left[\frac{1}{f_s} \sum_{k=1}^M a_i^2(k)\right] = \\ &= \frac{1}{f_s^2} D[a_i^2(1) + a_i^2(2) + \dots + a_i^2(M)] = \frac{1}{f_s^2} \cdot M \cdot 2\sigma_i^4 = \frac{2T^2}{M} \sigma_i^4 \end{aligned} \quad (6)$$

2 基于 DFP 的声源定位算法

2.1 最大似然函数的求取

本文通过最大似然方法对声源目标进行定位,首先需要完成对最大似然函数的求取,基于声源能量的最大似然函数即未知量的先验概率密度函数是根据节点处噪声能量 $\varepsilon_i(t)$ 的概率密度函数来获得的。由于 $\varepsilon_i(t)$ 服从正态分布 $N(\mu_i, \delta_i^2)$,所以 $e_i(t)$ 的概率密度函数为:

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_i} \exp\left[-\frac{(e_i - \frac{s}{d_i^2} - \mu_i)^2}{2\delta_i^2}\right] \quad (7)$$

由于每个传感器节点处的噪声能量互不相关,所以最大似然函数可以表示为:

$$\begin{aligned} P(s_1, s_2, \dots, s_N | r) &= P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_N \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \delta_1 \delta_2 \dots \delta_N} \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{(e_i - s/d_i^2 - \mu_i)^2}{\delta_i^2}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

上式中节点接收的能量、噪声能量均值和方差都为测得的量,未知量为信号能量 s 和声源目标的位置坐标 r ,使似然函数最大的未知量的值即为待估计量的估计值。

2.2 DFP 算法

求解上述似然函数的最大值实际上就是求其指数 $L(s, r) = \sum_{i=1}^N [(e_i - s/d_i^2 - \mu_i)^2 / \delta_i^2]$ 的最小值,

所以将似然函数的指数作为目标函数,这样就将对声源目标的定位问题转化为了求目标函数极值的无约束最优化问题。DFP算法是最优化理论中求解这类问题的一种方法,它是由Davidon首先提出的,后来又被Fletcher和Powell改进而成。它能够弥补传统牛顿法中需要计算二阶偏导数以及目标函数的Hessian矩阵可能非正定等缺点,经理论证明和实践检验,DFP已经成为一类公认的比较有效的方法。在这种方法中,定义满足拟牛顿条件的校正矩阵为:

$$\Delta H_k = \frac{\Delta x_k \cdot \Delta x_k^T \cdot H_k \cdot \Delta g_k \cdot (H_k \cdot \Delta g_k)^T}{\Delta x_k^T \cdot \Delta g_k \cdot \Delta g_k^T \cdot H_k \cdot \Delta g_k} \quad (9)$$

同时可以得到迭代公式:

$$H_{k+1} = H_k + \Delta H_k \quad (10)$$

在本文的声源目标定位中,DFP算法的具体迭代步骤为:

(1) 给出迭代初始点 $r_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$, 设允许误差 $\eta =$

0.05;

(2) 置 $H_1 = I_3$ (单位矩阵), 计算出在 r_1 处的梯度 $g_1 = \nabla L(r_1)$, 置 $k = 1$;

(3) 令 $d_k = -H_k g_k$, 从 r_k 出发, 沿方向 d_k 搜索, 求步长 λ_k , 使它满足

$$L(r_k + \lambda_k d_k) = \min_{\lambda \geq 0} L(r_k + \lambda d_k) \quad (11)$$

令 $r_{k+1} = r_k + \lambda_k d_k \quad (12)$

(4) 检验是否满足收敛准则, 若 $\| \nabla L(r_{k+1}) \| \leq \eta$ 则停止迭代, 得到点 $\bar{r} = r_{k+1}$; 否则, 进行步(5);

(5) 若 $k = 3$ 则令 $r_1 = r_{k+1}$, 返回步(2); 否则进行步(6);

(6) 令 $g_{k+1} = \nabla L(r_{k+1})$, $\Delta r_k = r_{k+1} - r_k$, $\Delta g_k = g_{k+1} - g_k$ 。利用式(10)计算 H_{k+1} 置 $k = k + 1$, 返回步(3)。

2.3 DFP算法运用中的几个问题

2.3.1 未知声源能量的估计

目标函数中有三个未知数 x, y, s , 由于进入无线传感器网络探测区域的目标的声音能量是未知的, 其范围也是不定的, 这给DFP算法的迭代带来很多麻烦, 似然函数的收敛性也变得十分复杂, 所以需要参数 s 进行估计处理, 用范围已知的 x, y 来表示声源目标的能量 s 。由于传感器节点处接收到的声源能量 e_i 在实际应用中是可以测到的, 所以可以用声音能量衰减公式对声源能量进行估计, 本文中对能量 s 的估计采用对每个传感器节点估计值进行加权平均的方法确定, 即

$$s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2 \cdot (e_i - \mu_i) \quad (13)$$

这种表示不仅有利于对目标函数的分析, 更重要的是对求 s 关于 x, y 导数也十分方便, 如果 s 关于 x, y 的表达式非常复杂的话, 导数的表达式就难以表示出来, 使得在DFP算法中 s 就必须作为一个参数参加迭代并且需要给出初始值, 这样就很难避免目标函数局部最小, 而不能得到全局最优值。

2.3.2 迭代中收敛过慢的处理方法

由DFP算法的正定性和二次终止性可知, DFP算法的搜索方向为下降方向, 即每次迭代使函数值有所下降, 但在实际中由于计算节点数量有限以及噪声的干扰, 往往会出现收敛速度过慢的问题^[11-13], 对于此种情况处理方法有两种, 一种是增加处理节点的数量, 另一种是设定一个迭代的阈值。本文中, 参与计算的节点是能够探测到声源能量的所有节点, 所以前一种方法不适用于本文的讨论, 所以采用后一种方法进行算法的讨论和仿真。

3 仿真实验及结果分析

本文中传感器节点的分布、声源目标的设置、能量模型的建立、噪声的加入、模拟数据源的建立以及算法的运算等都在MATLAB软件中仿真实现。

假设无线传感器网络的探测区域为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的方形区域, 传感器节点的数量为 10 个, 在探测区域中随机分布 (在软件中用 randn 函数实现), 声源坐标设为探测区域的中心, 背景噪声分布为 $N(0, 1)$ 。

3.1 目标函数 L 的仿真实现

仿真中, $x \in (-25 \text{ m}, 25 \text{ m})$, $y \in (-25 \text{ m}, 25 \text{ m})$, 声源实际位置为 $(0, 0)$, 由于目标函数在不同点的值差距很大, 所以为了显示方便, 显示了目标函数以 e 为底的对数的值。可以证明该函数的对数形式和函数的单调性是一致的, 完全可以由函数对数的单调性来判断函数的单调性。图 1、图 2 为目标函数示意图。

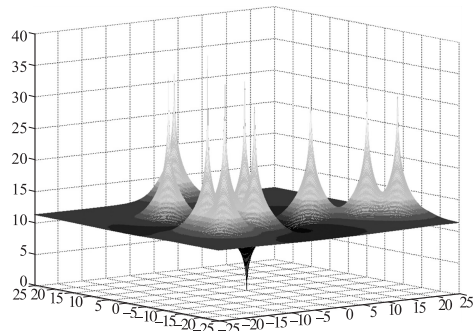


图1 目标函数侧视图

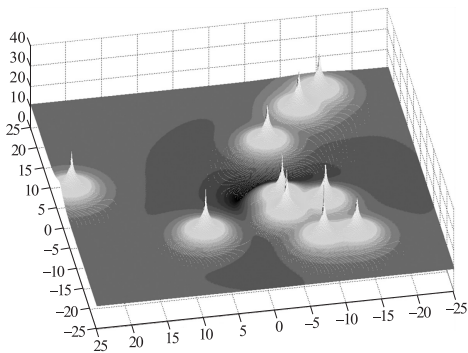


图 2 目标函数俯视图

由似然函数的物理意义可知,图中最大值所在的位置为传感器节点的位置,它们的坐标是已知的,函数只有一个全局最小值,它所在的位置即为待估的目标声源的位置。

3.2 DFP 算法的仿真实验

本次仿真目标声源位置坐标的初始迭代点设为 $x_0 = (1 \quad 1)$, 经过计算得到目标声源的最终位置坐标为 $x = (0.048 \quad 4 \quad -0.056 \quad 5)$, 迭代次数为 50 次, 耗时为 0.161 841 s。其中传感器节点与声源目标的分布如图 3 所示, x, y 在迭代中的变化如图 4 所示。

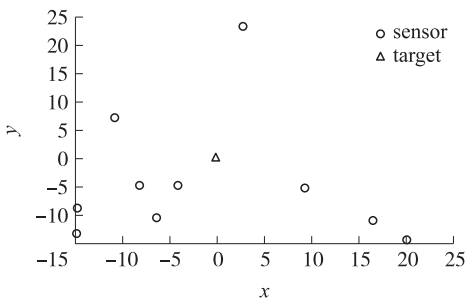
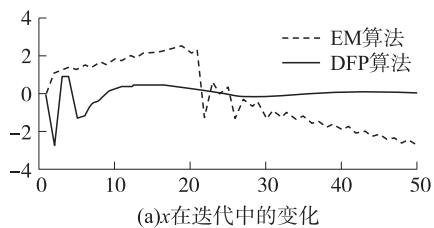
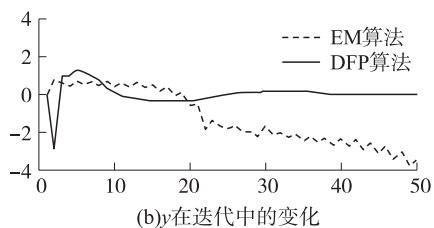


图 3 传感器节点与目标分布图



(a)x在迭代中的变化



(b)y在迭代中的变化

图 4 DFP 方法在迭代过程中 x, y 收敛情况

由上图可以看到,在迭代 10 次以后 x, y 就比较平稳不再有很大的起伏,向更高的精度逼近,而且收敛

速度也比较快,只迭代了 50 次就搜索到了全局最优解,而在相同条件下分布式 EM 算法^[14]需要更多的迭代次数,精度也比 DFP 算法下降十倍左右,所以说 DFP 方法是非常优秀的一种解决无线传感器网络声源目标定位的方法。

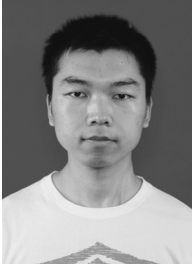
4 结论

本文基于声音能量衰减模型和最优化理论中的 DFP 算法研究了传感器节点随机分布条件下的无线传感器网络声源目标定位问题。仿真实验结果表明,文中提出的算法能够满足对目标定位精度和速度要求较高的场合,具有一定的实际应用意义。但此种算法是建立在集中式的处理方式之上的,这种处理方式会使整个网络担负较高的能耗,这一问题可以用分布式的思想加以解决,这也是下一步需要进行深入研究的问题。

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] Chu M, Haussecker H, Zhao F. Scalable Information Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks [J]. International Journal of High Performance Computing Applications, 2002, 16(3): 293-313.
- [3] Zhao Feng, Shin Jaewon, Reich J. Information Driven Dynamic Sensor Collaboration for Tracking Application [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(2): 61-72.
- [4] Liu J, Reich J, Zhao F. Collaborative In Network Processing for Target Tracking [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2003, 2003(1): 378-391.
- [5] Sheng X H, Hu Y H. Energy Based Acoustic Source Localization [C]//Proceedings of The 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03), 2003.
- [6] Xiaohong S, Yuhon H. Maximum Likelihood Multiple Source Localization Using Acoustic Energy Measurements with Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(1): 44-53.
- [7] Li D, Hu Y U. Energy Based Collaborative Source Localization Using Acoustic Micro Sensor Array [J]. EUROCHIP Applied Signal Process, 2003, 5: 321-337.
- [8] 胡仕萍,李思敏,唐智灵. 基于 WSN 的声源目标定位算法研究 [J]. 兵工自动化, 2008, 27(7): 63-65.
- [9] 赵昭,陈小惠. 无线传感器网络中基于 RSSI 差值的改进定位算法 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(3): 361-364.
- [10] 林玮,陈传峰. 基于 RSSI 的无线传感器网络三角形质心定位算法 [J]. 现代电子技术, 2009, 2: 180-182.
- [11] 李兆斌,魏占祯,徐风麟. 无线传感器网络增强的质心定位算法及性能分析 [J]. 传感技术学报, 2009, 22(04): 563-566.
- [12] 魏雅川,梁彦,陈延军,等. 无线传感器网络自适应声音目标定位算法 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(03): 418-422.

[13] 林金朝,李国军,周晓娜,等.基于动态能量管理的无线传感网络动目标定位跟踪方法[J].通信学报,2010,31(12):90-96.



刘立阳(1986-),男,空军工程大学导弹学院硕士研究生,研究方向为信号与信息处理,无线传感器网络,liuliyangtjx@163.com;

[14] 贾子熙,吴成东,张云洲,等.无线传感器网络中一种分布式声源定位方法[J].系统仿真学报,2009,21(20):6552-6555.



张金成(1960-),男,空军工程大学导弹学院教授,研究方向为信号与信息处理,嵌入式系统,无线传感器网络,zhangjincheng6001@163.com。