



基于到达时间的无线传感器网络协作定位算法

卢倩倩, 李有明, 常生明, 李娜娜

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 提出了一种基于到达时间的无线传感器网络协作定位方法。首先, 建立关于目标位置的优化问题, 其次通过运用混合半正定和二阶锥松弛理论, 将原非凸优化问题转换为一种凸的优化问题, 由此快速得到原问题的一个次优解。计算机模拟结果显示, 新算法估计均方根误差更接近克拉美-罗界。

关键词: 到达时间; 协作定位; 混合半正定和二阶锥松弛; 克拉美-罗界

中图分类号: TP929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019004

Cooperative localization algorithm based on time-of-arrival in wireless sensor network

LU Qianqian, LI Youming, CHANG Shengming, LI Nana

Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: A novel cooperative location method based on time-of-arrival in wireless sensor networks was proposed. Firstly, the optimization problem for the target location was established. Secondly, the mixed semi-positive definite and second-order cone relaxation techniques were used to convert the original non-convex problem into a convex optimization problem. In this way, a fast suboptimal solution to the original problem was obtained. Finally, computer simulations show that the proposed method has lower root mean square error (RMSE) which is closer to the Cramer-Rao lower bound (CRB).

Key words: time-of-arrival, cooperative localization, mixed semi-positive definite and second-order cone relaxation, Cramer-Rao bound

1 引言

无线传感器网络 (WSN) 技术在军事和民用领域中有广泛应用, 而如何确定网络中每个传感

器的具体位置是该技术获得应用的关键。全球定位系统 (GPS) 和北斗系统在室外环境下均能有效确定位置信息, 而在室内等特殊场景, 必须寻求新的定位方法。这类定位方法的基本思想是,

收稿日期: 2018-05-16; 修回日期: 2018-09-04

通信作者: 李有明, liyouming@nbu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571250); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY18F010010)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571250), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (No.LY18F010010)

首先,通过人工或其他手段部署的位置已知的节点称为锚节点(anchor-node),预先不知道自身位置,需要通过锚节点来定位的节点称为未知节点(unknown-node),也称为目标节点;然后,利用带有噪声的测量值来确定大量未知节点的位置^[1],该方法也称为目标定位。由于应用环境和应用目的不同,获得信号信息的方式也不同,根据这一特点可将目标定位方法分为到达时间差(TDOA)^[2]、接收信号强度(RSS)^[3]、到达角度(AOA)^[4]和到达时间(TOA)^[5]等。

早期的研究主要基于非协作方式,虽然该类方法简单,但是它只允许锚节点和未知节点之间的通信,而当通信距离较大时,这种通信方式容易出现随时中断通信的问题,不能保证通信的连续性。另外,在非协作定位中,每个未知目标需要连接 3 个及以上锚节点才能完成未知目标定位。这就要求锚节点的分布密度高,造成高成本^[4]。

为了避免产生非协作定位的弊端,提高定位精度,基于协作方式的定位方法引起重视^[4,6]。与非协作定位相比,协作定位不但可以利用锚节点与目标节点之间的通信连接,还可以利用目标节点之间的相互通信连接^[6-7]。因此,使用协作定位不仅能降低对锚节点的分布密度高的需求,而且能大大提高估计精度和顽健性^[8]。参考文献[9]中利用最大似然准则处理测距信息,但是该类问题的目标函数非线性且非凸,不存在闭式解,求解十分困难。为了克服最大似然估计问题的缺陷,参考文献[10]将该问题转化为半正定规划(SDP)问题,然后求取次优的近似解。参考文献[11]利用不完整和不准确的距离信息提出了基于半正定规划松弛的顽健协作定位方法。参考文献[12]利用了各种半正定的松弛方法,将原问题优化松弛成一个凸问题,提高了算法的估计精度,但是复杂度高。参考文献[13]提出了一种分布式算法,将原问题转化为二阶锥规划问题(SCOP),降低了计算

复杂度。上述定位算法都基于凸优化松弛技术,和 ML 算法比较,虽然算法复杂度降低了,但估计性能损失较大。

为了提高定位算法的估计精度,本文研究了一类基于 TOA 的无线传感器网络协作定位问题。运用混合半正定和二阶锥松弛技术,将原非凸的优化问题转化为一个凸优化问题,由此快速求解。仿真结果表明,新算法的估计性能明显改善。

2 协作定位网络模型

考虑一个由 M 个锚节点和 N 个目标节点组成的二维无线传感器网络作为协作定位网络,如图 1 所示。

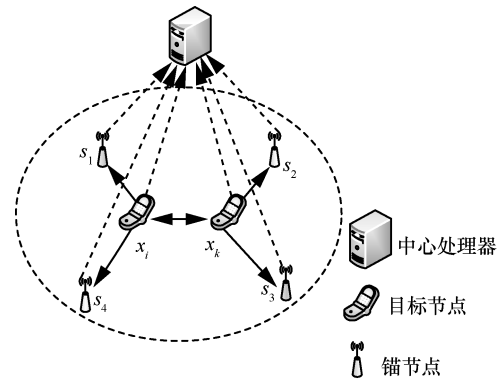


图 1 协作定位网络示意图

将目标节点记为 $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^2, i=1,2,\dots,N$, 锚节点记为 $\mathbf{s}_j \in \mathbb{R}^2, j=1,2,\dots,M$ 。基于距离的测距可以分为两类: A 包括锚节点与目标节点之间的连接; B 包括目标节点和目标节点之间的连接。基于协作定位的系统模型定义为:

$$d_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{s}_j\| + n_{ij}, (i,j) \in A \quad (1a)$$

$$d_{ik} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\| + n_{ik}, (i,k) \in B \quad (1b)$$

其中, $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{s}_j\|, (i,j) \in A$ 为目标节点与锚节点之间的真实距离, $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\|, (i,k) \in B$ 为不同目标节点之间的真实距离, n_{ij} 为目标节点与锚节点之间的测量噪声, n_{ik} 为目标节点与目标节点之间的测量噪声, d_{ij} 为锚节点与目标节点之间的测量距离, d_{ik} 为不同目标节点之间的测量距离。



将式(1)中测量噪声移到等式左边,将其两边求平方。通过忽略噪声二次项可得到近似式(2):

$$d_{ij}^2 - 2d_{ij}n_{ij} \approx \|\mathbf{x}_i - \mathbf{s}_j\|^2 \quad (2a)$$

$$d_{ik}^2 - 2d_{ik}n_{ik} \approx \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\|^2 \quad (2b)$$

移项得到:

$$\frac{d_{ij}^2}{2d_{ij}} \approx \frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{s}_j\|^2}{2d_{ij}} + n_{ij} \quad (3a)$$

$$\frac{d_{ik}^2}{2d_{ik}} \approx \frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\|^2}{d_{ik}} + n_{ik} \quad (3b)$$

根据最大似然准则,式(3)中的测量模型可以写为如下的最小化问题^[14]:

$$\min_{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k} \left(\sum_{(i,j)} \left(\frac{d_{ij}^2 - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{s}_j\|^2}{2d_{ij}\sigma_{ij}} \right)^2 + \sum_{(i,k)} \left(\frac{d_{ik}^2 - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\|^2}{2d_{ik}\sigma_{ik}} \right)^2 \right) \quad (4)$$

其中, σ_{ij} 、 σ_{ik} 分别表示第 n_{ij} 、 n_{ik} 的标准差,符号“ $\|\cdot\|$ ”为欧几里德范数。然而,式(4)中的目标函数是严重非线性和非凸的,难以求解,如何将上述问题转换成一类基于凸优化问题是第3节的研究重点。

3 混合半正定和二阶锥松弛方法

为了将式(4)转化为凸的形式,引入如下符号:

$$y_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{s}_j\|^2 = \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i - 2\mathbf{x}_i^T \mathbf{s}_j + \|\mathbf{s}_j\|^2, (i,j) \in A \quad (5)$$

$$g_{ik} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\|^2 = \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_k - \mathbf{x}_k^T \mathbf{x}_i + \mathbf{x}_k^T \mathbf{x}_k, (i,k) \in B \quad (6)$$

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N] \quad (7)$$

其中, y_{ij} 表示第 i 个目标节点和第 j 个锚节点之间距离的平方, g_{ik} 表示第 i 个目标节点和第 k 个目标节点之间距离的平方, $\mathbf{X}$ 是待估计的目标节点的矩阵。

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= [\mathbf{X} \quad \mathbf{I}_2]^T [\mathbf{X} \quad \mathbf{I}_2] = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^T \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} [\mathbf{X} \quad \mathbf{I}_2] \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{X}^T \mathbf{X} & \mathbf{X}^T \\ \mathbf{X} & \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{I}_2$ 是二阶的单位矩阵。

基于上述分析,原式(4)的问题转化为:

$$\min_{\mathbf{X}, \mathbf{F}, y_{ij}, g_{ik}} \sum_{(i,j)} u_{ij} + \sum_{(i,k)} t_{ik} \quad (9a)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{d_{ij}^2 - y_{ij}^2}{2d_{ij}\sigma_{ij}} \leq u_{ij} \quad (9b)$$

$$\frac{d_{ik}^2 - g_{ik}^2}{2d_{ik}\sigma_{ik}} \leq t_{ik} \quad (9c)$$

$$y_{ij} = \mathbf{F}_{ii} - 2\mathbf{s}_j^T \mathbf{F}_{N+1:N+2,i} + \|\mathbf{s}_j\|^2 \quad (9d)$$

$$g_{ik} = \mathbf{F}_{ii} - \mathbf{F}_{ik} - \mathbf{F}_{ki} + \mathbf{F}_{kk} \quad (9e)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^T \mathbf{X} & \mathbf{X}^T \\ \mathbf{X} & \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \quad (9f)$$

为继续优化目标函数,可以利用二阶锥松弛技术对式(9b)、式(9c)进行松弛,则可写为:

$$\left\| \begin{bmatrix} 2(d_{ij}^2 - y_{ij}^2) & 4d_{ij}^2\sigma_{ij}^2 - u_{ij} \end{bmatrix} \right\| \leq 4d_{ij}^2\sigma_{ij}^2 + u_{ij} \quad (10a)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} 2(d_{ik}^2 - g_{ik}^2) & 4d_{ik}^2\sigma_{ik}^2 - t_{ik} \end{bmatrix} \right\| \leq 4d_{ik}^2\sigma_{ik}^2 + t_{ik} \quad (10b)$$

然而,在矩阵 $\mathbf{F}$ 上仍然有一个非凸约束,使得问题是非凸的。利用半正定松弛技术,将矩阵 $\mathbf{F}$ 松弛,并写成线性矩阵不等式(LMI):

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^T \mathbf{X} & \mathbf{X}^T \\ \mathbf{X} & \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{F} \geq 0 \\ \text{rank}(\mathbf{F}) = 2 \end{cases} \quad (11)$$

综上所述,式(9)的问题可以被描述为:

$$\min_{\mathbf{X}, \mathbf{F}, y_{ij}, g_{ik}} \sum_{(i,j)} u_{ij} + \sum_{(i,k)} t_{ik} \quad (12a)$$

$$\text{s.t.} \quad \left\| \begin{bmatrix} 2(d_{ij}^2 - y_{ij}^2) & 4d_{ij}^2\sigma_{ij}^2 - u_{ij} \end{bmatrix} \right\| \leq 4d_{ij}^2\sigma_{ij}^2 + u_{ij} \quad (12b)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} 2(d_{ik}^2 - g_{ik}^2) & 4d_{ik}^2\sigma_{ik}^2 - t_{ik} \end{bmatrix} \right\| \leq 4d_{ik}^2\sigma_{ik}^2 + t_{ik} \quad (12c)$$

$$y_{ij} = \mathbf{F}_{ii} - 2\mathbf{s}_j^T \mathbf{F}_{N+1:N+2,i} + \|\mathbf{s}_j\|^2 \quad (12d)$$

$$g_{ik} = \mathbf{F}_{ii} - \mathbf{F}_{ik} - \mathbf{F}_{ki} + \mathbf{F}_{kk} \quad (12e)$$

$$\begin{bmatrix} X^T X & X^T \\ X & I_2 \end{bmatrix} \geq 0 \quad (12f)$$

$$\text{rank}(F) = 2 \quad (12g)$$

这是一个凸优化问题,在 MATLAB 中,可以使用 CVX 工具箱来解决式(12)的凸优化问题。

4 仿真分析

本节通过蒙特卡洛实验来验证本文所提算法与其他定位方法的性能。具体包括参考文献[11]方法、参考文献[12]方法、参考文献[13]方法和本文方法,同时也与 CRB 进行比较。仿真环境如下:目标节点是从 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的一个正方形区域中随机均匀选取的,目标节点与锚节点之间的测量噪声 n_{ij} 以及目标节点与目标节点之间的测量噪声 n_{ik} 服从均值为 0、方差分别为 σ_{ij}^2 和 σ_{ik}^2 的高斯分布。本文以均方根误差(root mean square error, RMSE)评估所有定位算法的性能,其定义为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M_c} \sum_{i=1}^{M_c} \|\hat{x}_i - x_i\|^2} \quad (13)$$

其中, M_c 是蒙特卡洛运行的次数, $\hat{x}_i$ 是第 i 次真实目标位置 x_i 的估计值。以下仿真分析中取 $M_c = 1000$ 。

图 2 表示不同方法的 RMSE 随噪声标准差的变化曲线。从图 2 中可以看出,随着噪声标准差的变大,4 种方法以及 CRB 的 RMSE 均呈上升趋势,并且当噪声标准差变大时,各方法和 CRB 的均方误差逐渐增大。进一步看出,本文方法与 CRB 的均方误差最接近。

图 3 表示 RMSE 随锚节点个数的变化曲线。从图 3 中可以看出,随着锚节点个数的增加,4 种方法和 CRB 的均方根误差均呈下降趋势。本文方法在不同锚节点个数下均具有较低的均方根误差,并且随着锚节点数目的增加,其均方根误差要小于其他方法,更接近 CRB。

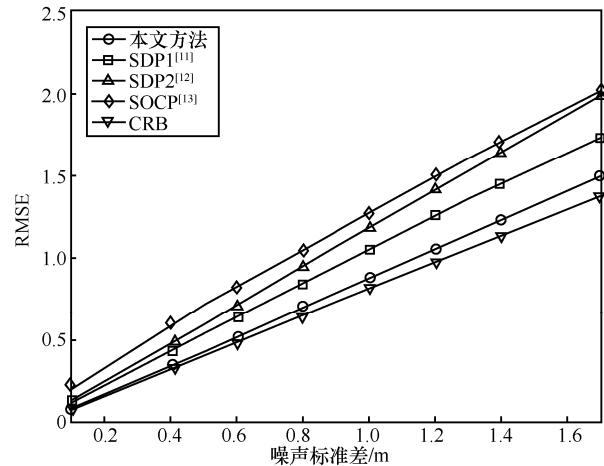


图 2 不同方法的 RMSE 随噪声标准差的变化

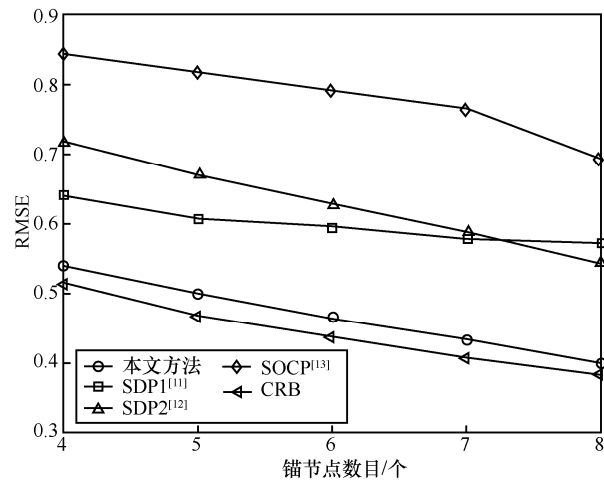


图 3 不同方法的 RMSE 随锚节点数量的变化

5 结束语

针对基于到达时间的协作定位问题,提出了一种运用混合半正定和二阶锥松弛技术的无线网络协作定位方法。此方法有效地降低了定位误差,保证了定位精度。仿真结果表明,本文方法在均方根误差和累积分布函数的性能上优于其他方法,达到了较好的定位性能。下一步的工作是在保证噪声估计性能以及低复杂度的前提下,研究发射时间未知条件下的协作定位方法。

参考文献:

- [1] ZEKAVAT R, BUEHRER R. Handbook of position location: theory, practice, and advances[M]. Hoboken: Wiley-IEEE Press,



- 2012.
- [2] MA F, ZHANG M, GUO F. A localization method based on TDOA self-calibrating of rotating short baseline on single observer[C]//IEEE International Conference on Signal and Image Processing, Aug13-15, 2016, Beijing, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 368-373.
- [3] 朱亚萍, 夏玮玮, 章跃跃, 等. 基于 RSSI 和惯性导航的融合室内定位算法[J]. 电信科学, 2017, 33(10): 99-106.
- ZHU Y P, XIA W W, ZHANG Y Y, et al. A hybrid indoor localization algorithm based on RSSI and inertial navigation[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(10): 99-106.
- [4] PATWARI N, ASH J N, KYPEROUNTAS S, et al. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 54-69.
- [5] CHAN Y T, HANG H Y C, CHING P C. Exact and approximate maximum likelihood localization algorithms[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1): 10-16.
- [6] WYMEERSCH H, LIEN J, WIN M Z. Cooperative localization in wireless networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 427-450.
- [7] WIN M Z, CONTI A, MAZUELAS S, et al. Network localization and navigation via cooperation[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(5): 56-62.
- [8] KHAN M W, SALMAN N, KEMP A H. Optimised hybrid localisation with cooperation in wireless sensor networks[J]. Iet Signal Processing, 2017, 11(3): 341-348.
- [9] SHI X, MAO G, YANG Z, et al. Localization algorithm design and performance analysis in probabilistic LOS/NLOS environment[C]//IEEE International Conference on Communications, May 22-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [10] SALARI S, SHAHBAZPANAHI S, OZDEMIR K. Mobility-aided wireless sensor network localization via semidefinite programming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(12): 5966-5978.
- [11] BISWAS P, LIAN T C, WANG T C, et al. Semidefinite programming based algorithms for sensor network localization[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2006, 2(2): 188-220.
- [12] WANG N, YANG L. Further results on cooperative localization via semidefinite programming[C]//Information Sciences and Systems, March 23-25, 2011, Baltimore, MD, USA. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [13] NADDAFZADEH-SHIRAZI G, SHENOUDA M B, LAMPE L. Second order cone programming for sensor network localization with anchor position uncertainty[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 749-763.
- [14] KAY S M M. Fundamentals of statistical signal processing, vol I: estimation theory[J]. Detection Theory, 1993, 37(4): 465-466.

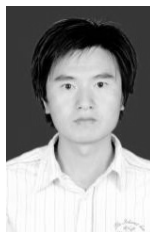
[作者简介]



卢倩倩 (1991-), 女, 宁波大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络中的协作定位技术。



李有明 (1963-), 男, 宁波大学信息科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带通信、电力线通信、协作中继、认知无线电等。



常生明 (1982-), 男, 宁波大学信息科学与工程学院博士生, 主要研究方向为无线传感器网络定位。



李娜娜 (1992-), 女, 宁波大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为水声通信中的信号处理方法。