

WSNs 中测距时延与定位精度权衡的研究

王自力

(驻马店职业技术学院 信息工程系, 河南 驻马店 463000)

摘要: 现存的定位算法侧重于定位精度,并没有考虑传输测距信息所产生的时延问题;相比于单播机制,以广播机制传输测距信息时延可缩短时延;据此,面向基于广播机制传输测距信息的定位算法,研究时延-定位精度的权衡关系;先推导协作定位和非协作定位模式下的费舍尔信息矩阵,再推导时延-定位精度的最优权衡关系;仿真数据表明:在节点密集网络条件下,协作定位模式的时延-定位精度间的权衡关系与非协作模式下的相同;但节点密集网络下,时延与定位精度间的权衡关系不能达到最优。

关键词: 无线传感网络;到达时间;时延;定位精度;权衡;费舍尔信息矩阵

本文引用格式: 王自力. WSNs 中测距时延与定位精度权衡的研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(6): 125-128.

Citation format: WANG Zili. Study on Delay-Accuracy Trade-off for Localization[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(6): 125-128.

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)06-0125-04

Study on Delay-Accuracy Trade-off for Localization

WANG Zili

(Department of Information Engineering, Zhumadian Career Technical College, Zhumadian 463000, China)

Abstract: Existing localization algorithm place emphasizes on accuracy of localization, and has no regard for the delay in transmitting ranging information. Compared with unicast, broadcast schemes have an advantage in terms of the delay. Therefore, we analyzed the delay-accuracy trade-off, for localization schemes in which the position estimates were obtained based on broadcasted ranging signals. Then, we established that the optimal trade-off was bounded and the same for cooperative and non-cooperative networks. We find that for dense networks, the trade-off is the same for cooperative and non-cooperative networks. And for dense networks, no better trade-off is achievable.

Key words: wireless sensor networks; time of arrival; delay; position-accuracy; trade-off; fisher information matrix

无线传感网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)^[1-2]已在医疗、环境监测、军事等领域得到广泛应用。这些应用均以节点有效地收集数据为前提,并且节点所感知的数据需配备准确的位置才具有价值。因此,节点定位算法已成 WSNs 的研究焦点^[3-4]。

已有的定位算法常将节点分为锚节点(参考节点)和传感节点两类,并通过费雪(Fisher)信息估计定位性能。Fisher 信息包含了节点间的测量信息^[3-5]。然而,收集测量信息存

在时延问题^[6-7],并且在传输测量信息时,涉及到资源分配策略^[8-10]。但现存的定位算法只侧重于定位精度,并没有讨论传输定位信息时所产生的时延问题。例如,文献[11]提出基于改进的到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)定位算法。而文献[12]提出基于修正容积卡尔曼滤波定位算法,其利用子空间数据融合方法降低观察数据的噪声,提高定位精度。然而,这些算法只关注于定位精度,并没有强调定位时延问题。

收稿日期: 2018-11-14; 修回日期: 2019-01-10

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师计划项目(2015GGJS-300); 河南省科技计划项目(182102210599)

作者简介: 王自力(1978—),男,硕士,副教授,主要从事计算机应用及物联网技术研究。

文献[13]分析了利用时分多址接入(Time-division Multiple Access, TDMA),并依超宽带(Ultra-Wideband, UWB)测距环境下,定位精度和测量时延间的平衡性能,并且分析了协作和非协作这两类定位方式的性能。分析结果表明,对于节点密度分布低的环境(锚节点数多于传感节点数),基于TDOA测距定位算法具有良好的平衡性能。但在节点密度分布高的环境下,协作定位和非协作定位算法具有一致的平衡性能。然而,文献[13]只是研究单播测量信息(TDOA),并没有研究在广播测量信息条件下的定位精度和测量时延间的平衡问题。

为此,受文献[13]研究内容的启发,针对节点密集分布条件,重点分析广播测量信息所实现的传输时延与定位精度间的平衡关系。假定所有节点(包括传感节点和锚节点)均能收到广播的测距信号。若是协作定位,传感节点和锚节点均可广播测距信号,反之,便是非协作定位,则只由锚节点广播测距信号。

本文分析了基于协作和非协作这两类模式下的权衡参数。主要工作可归纳如下:针对协作和非协作广播测距,推导了Fisher信息矩阵;建立最优的权衡关系;建立仿真平台,分析时延-精度的权衡关系,验证分析结果。

1 系统模型

假定网络内有 N 个传感节点和 M 个锚节点,它们的位置表示为 x_i ,且 $i=1,2,\dots,M+N$ 。锚节点位置已知,而传感节点位置未知。网络定位算法就是利用锚节点位置信息以及相关的测距信息估计传感节点位置。

此外,本文考协作(Cooperative, CO)和非协作(Non Co-operative, NC)两类定位模式。在CO模式中,所有节点广播、接收测距信号;而在NC模式中,只有锚节点广播测距信号。假定发射节点 i 在时间 t_i 广播测距信号,其他节点(假定节点 j)接收了此信号。节点 j 所接收的信号可表示为

$$z_{ij} = \delta_i + d_{ij} + o_j + \omega_{ij}, \quad i \neq j \quad (1)$$

其中 $d_{ij} = \|x_i - x_j\|$, $\omega_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ 为测距噪声变量。而 $\delta_i = c \times t_i$,其中 c 为信号传播速度。而传输时间未知,需要通过同步算法进行估计。

利用TDMA控制节点接入信道。因此,在任意给定时刻,只允许一个节点广播测距信号。假定来自节点 i 传输的测量信号表示为 z_i ,令 $z = [z_L^T, \dots, z_{M+N}^T]^T$,其中 L 为二值变量。当 $L=1$,表示为协作模式,当 $L=N+1$,表示非协作模式。

引用矢量 $\theta = [x^T \delta^T o^T]^T$ 表示传感节点位置信息,其中 $x = [x_1^T, \dots, x_N^T]^T$, $o = [o_1, \dots, o_K]^T$, $\delta = [\delta_L, \dots, \delta_{N+M}]^T$,且 $K=M+N-1$ 。此外,引用 φ_{nm} 表示节点 n 与节点 m 连线与水平线的夹角,且 $\varphi_{nm} \in (0, 2\pi)$ 。

2 时延-准确性间的权衡的定义

本节,推导收集测距值的时延与定位准确性间的权衡关

系 $\delta(\rho)$ 。

假定每次测距传输所需时延为 T 。当采用协作定位模式时,所需 $M+N$ 次传输;而当采用非协作定位模式,需 M 次传输。令 D 表示两种定位模式下的时延,定义如式(2)所示:

$$D = \begin{cases} (M+N)T, & \text{for CO model} \\ MT, & \text{for NC model} \end{cases} \quad (2)$$

用Fisher信息表征定位准确性。依据文献[14],可得 θ 的Fisher信息矩阵(Fisher information Matrix, FIM),如式(3)所示:

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \Phi(x, x) & \Phi(x, \delta) & \Phi(x, o) \\ \Phi(\delta, x) & \Phi(\delta, \delta) & \Phi(\delta, o) \\ \Phi(o, x) & \Phi(o, \delta) & \Phi(o, o) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $\Phi(a, b) = E_{z|\theta} \{ -\nabla_a \nabla_b^T \log p(z|\theta) \}$ 。而 $\log p(z|\theta)$ 的定义如式(4)所示:

$$\log p(z|\theta) = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=L}^{N+M} \sum_{j=1}^i (z_{ij} - \delta_i - d_{ij} - o_j)^2 \quad (4)$$

当参数 o 和 δ 未知时,可用 x 的等效FIM(Equivalent, EFIM)表述含有节点位置的Fisher信息,如式(5)所示:

$$J^E(x) = \Phi(x, x) - BC^{-1}B^T \quad (5)$$

其中 $B = [\Phi(x, \delta), \Phi(x, o)]$,而 C 的定义如式(6)所示:

$$C = C = \begin{bmatrix} \Phi(\delta, \delta) & \Phi(\delta, o) \\ \Phi(o, \delta) & \Phi(o, o) \end{bmatrix} \quad (7)$$

最后,利用定位误差界限(Position Error Bound, PEB)估计网络的定位精度,如式(8)所示^[5]:

$$P = (\text{tr} \{ [J^E(x)]^{-1} \} / N)^{1/2} \quad (8)$$

因此,节点 i 的PEB可表示为 $P_i = (\text{tr} \{ [J^E(x_i)]^{-1} \})^{1/2}$ 。若假定节点分布趋近均匀,则 $P_i = P$ 。

本文研究工作目的就是估计定位精度与时延间关系,并分析当节点数 N 和锚节点数 M 均增加($N = M^\rho, \rho > 0$)时,网络的渐近特性。用 $D \in O(f_D(M, \rho))$ 表示时延尺度(delay scaling),而用 $P \in O(f_P(M, \rho))$ 表示PEB尺度(PEB scaling)。因此,定位精度与时延间的权衡关系 $\delta(\rho)$ ^[11]:

$$\delta(\rho) = -\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\log f_P(M, \rho)}{\log f_D(M, \rho)} \quad (9)$$

$\delta(\rho)$ 值越大,则定位精度与时延间的权衡关系越平衡。

3 时延-准确性间的权衡的推算

在本节,分别估计协作和非协作定位模式下的 $\delta(\rho)$ 值。首先,令 $q_{m,n}$ 表示从 x_n 至 x_m 的单位矢量,其定义如式(10)所示:

$$q_{m,n} = (x_m - x_n) / \|x_m - x_n\| \quad (10)$$

此外,引用定理1:当 $U \rightarrow \infty$ $\sum_{n=1}^U q_{m,n} \rightarrow 0$, $\sum_{n=1}^U q_{nm} q_{nm}^T \rightarrow \frac{U}{2} I_2$,

则 $(\sum_{n=1}^U q_{m,n})(\sum_{n=1}^U q_{m,n})^T \rightarrow \frac{U}{2} I_2$ 。

3.1 协作定位模式下的 $\delta(\rho)$ 值

从式(9)可知, $\delta(\rho)$ 与 $f_D(M,\rho)$ 值密切相关。而 $f_D(M,\rho)$ 表征了时延尺度。在协作定位模式下, $f_D(M,\rho)$ 的定义如式(11)所示:

$$f_D(M,\rho) = \begin{cases} M^\rho, & \text{if } \rho \geq 1 \\ M, & \text{if } \rho < 1 \end{cases} \quad (11)$$

为了评估式(5)中的 $J^E(x)$,先分块矩阵求逆公式计算 C^{-1} ,如式(12)所示:

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha I_{M+N} + \alpha^2 \beta \Phi(\delta,o)(I_K + 1_K) \Phi(\delta,o)^T & -\alpha \beta \Phi(\delta,o)(I_K + 1_K) \\ -\alpha \beta \Phi(\delta,o)(I_K + 1_K) & \beta(I_K + 1_K) \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 $\alpha = \sigma^2/K, \beta = \sigma^2/(K - K^{-1})$ 。

再依据式(12),计算 $D = BC^{-1}B^T$,如式(13)所示:

$$D = BC^{-1}B^T = \alpha \Phi(x,\delta) \Phi(x,\delta)^T + \alpha^2 \beta \Phi(x,\delta) \Phi(\delta,o) \Phi(\delta,o)^T \Phi(x,\delta)^T - \alpha \beta \Phi(x,o) \Phi(\delta,o) \Phi(x,\delta)^T - \alpha \beta \Phi(x,\delta) \Phi(\delta,o) 1_K \Phi(x,o)^T + \beta \Phi(x,o) \Phi(x,o)^T + \Phi(x,o) 1_K \Phi(x,o)^T \quad (13)$$

其中 1_K 表示 $K \times K$ 维单位矩阵。依据定理1可知,式(13)中的8个独立项的主要元素值分别为: $\frac{1}{\sigma^2} I_{2N}, 0_{2N}, \frac{2}{\sigma^2} I_{2N}, 0_{2N}, -\frac{2}{\sigma^2} I_{2N}, 0_{2N}, -\frac{2}{\sigma^2} I_{2N}, \frac{1}{\sigma^2} I_{2N}, \frac{2}{\sigma^2} I_{2N}$,其中 0_{2N} 表示 $2N \times 2N$ 维的零矩阵。

此外,当 $K \rightarrow \infty$ 时, $J^E(x) \rightarrow \Phi(x,x)$ 。 $J^E(x)$ 的定义如式(14)所示:

$$J^E(x) = \frac{2}{\sigma^2} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{M+N} q_{1i} q_{1i}^T & -q_{12} q_{12}^T & \cdots & -q_{1N} q_{1N}^T \\ -q_{21} q_{21}^T & \sum_{i=1}^{M+N} q_{2i} q_{2i}^T & 0_2 & 0_2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ -q_{M1} q_{M1}^T & 0_2 & 0_2 & \sum_{i=1}^{M+N} q_{Ni} q_{Ni}^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

最后,当 $P \rightarrow \sigma \sqrt{2/K}$,可得PEB尺度 $f_P(M,\rho)$,如式(15)所示:

$$f_P(M,\rho) = \begin{cases} 1/\sqrt{M^\rho}, & \text{if } \rho \geq 1 \\ 1/\sqrt{M}, & \text{if } \rho < 1 \end{cases} \quad (15)$$

最后,将式(11)和式(15)代入式(9),可得:

$$\delta(\rho) = \frac{1}{2}, \quad \forall \rho > 0 \quad (16)$$

从式(16)可知,无论是密集网络,还是稀疏节网络,协作广播测距策略提供了固定的权衡关系。此权衡关系优于单播策略^[11]。

3.2 非协作定位模式下的 $\delta(\rho)$ 值

依据非协作定位模式的工作原理,可得非协作的时延尺度,如式(17)所示:

$$f_D(M,\rho) = M, \quad \text{if } \forall \rho > 0 \quad (17)$$

与协作定位模式类似,先计算 C^{-1} ,如式(18)所示:

$$C^{-1} = \sigma^2 \begin{bmatrix} \frac{1}{M + M^\rho} I_M + \frac{1}{M} 1_M & -\frac{1}{M} 1_{M,K} \\ -\frac{1}{M} 1_{M,K}^T & \frac{1}{M} (I_K + 1_K) \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中 $1_{M,K}^T$ 为 $M \times K$ 的单位矩阵。

由于 $D = BC^{-1}B^T$,则当 $\forall \rho > 0$ 时, $D = \sigma^2 \frac{1}{2} \frac{M^\rho + 2M}{M^\rho + M} I_{2N}$ 。

因此,当 $P \rightarrow 2\sigma \sqrt{1/M}$ 时,可得 $f_P(M,\rho)$:

$$f_P(M,\rho) = 1/\sqrt{M}, \quad \forall \rho > 0 \quad (19)$$

最后,将式(17)和式(19)代入式(9)可得,非协作模式下的权衡关系 $\delta(\rho)$:

$$\delta(\rho) = \frac{1}{2}, \quad \forall \rho > 0 \quad (20)$$

此结果与协作模式下的权衡关系值相同。值得注意的是:推导到的式(16)和式(20)是基于 $M \rightarrow \infty$ 的条件。换言之, $\delta(\rho) = \frac{1}{2}$ 是权衡关系的极限值。为此,接下来,通过实验分析 $\delta(\rho)$ 随 M 值和 ρ 值的变化情况。

4 实验数据分析

第4节的推导过程是基于 $M \rightarrow \infty$ 条件,为此,本节建立实验,进一步分析 $\delta(\rho)$ 随 M 值和 ρ 值变化性能。利用Matlab软件建立仿真平台。假定 M 个传感节点,且 $M \in [10, 90]$ 区间, $N = M^\rho$ 个锚节点。这些节点均匀地分布于 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的区域。而 ρ 值取1.5和0.5。实验数据如图1、2所示。

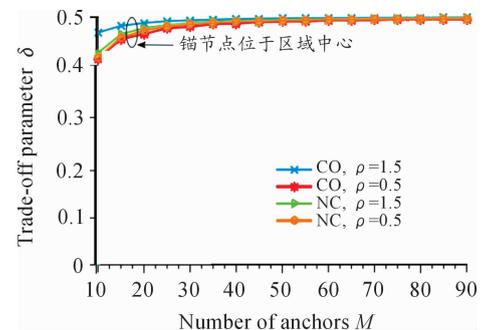


图1 $\delta(\rho)$ 随锚节点数 M 的变化情况
(锚节点位于中心位置)

首先,分析位于仿真区域中心位置的锚节点 $\delta(\rho)$ 的值,如图1所示。从图1可知,随着锚节点数 M 的增加,位于区域中心的锚节点的 $\delta(\rho)$ 逐渐逼近于0.5。此外,当锚节点位于区域中心时,协作模式和非协作模式下, $\delta(\rho)$ 的值相同,并无差别。

图2分析了随机部署的锚节点的 $\delta(\rho)$ 值,如图2所示。从图2可知,位于非中心位置时,锚节点的 $\delta(\rho)$ 值逼近于0.4。然而,在这种情况下,协作模式(CO)下的 $\delta(\rho)$ 值优于非协作

模式(NC), $\delta(\rho)$ 值平均提高了20%~30%。这也说明,协作模式可以获得更好的时延-定位精度间的权衡关系。

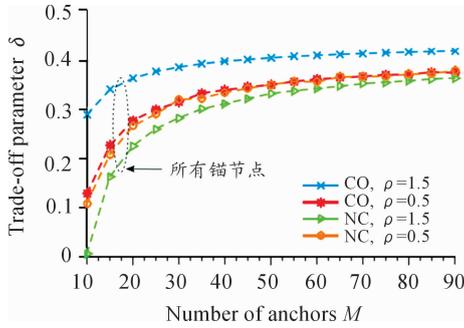


图2 $\delta(\rho)$ 随锚节点数 M 的变化情况(随机部署节点)

5 结论

针对广播测距信号的测距方案,本文分析了协作和非协作网络的时延与定位精度间的权衡关系。由于这些测距值的特性,时钟偏差和传输时延均属未知参数。通过分析表明:尽管这些参数的未知降低了Fisher信息矩阵的信息量,但是对于大型锚节点网络,仍可以获取较高的定位精度。此外,协作和非协作定位模式的时延与定位精度的权衡值相同,均为0.5。同时,分析了密集锚节点网络下的权衡关系。实验数据表明,在密集锚节点网络下,无法获取最优的权衡关系。

后期,将进一步分析WSNs中定位精度与时延的权衡关系,并针对不同的应用环境。在有些应用中,需要高的定位精度,对时延要求不严格,反之,有些应用更侧重于时延,而对定位精度要求不高。因此,后期重点分析在不同应用环境下的定位精度与时延关系,并利用真实环境,分析时延与定位精度的关系,这将是后期的工作方向。

参考文献:

[1] TOMIC S, BEKO M, DINIS R. RSS-based Localization in Wireless Sensor Networks Using Convex Relaxation: Noncooperative and Cooperative Schemes [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2015, 64(5): 2037-2050.

[2] 江禹生, 冯砚毫, 管芳, 等. 无线传感网非测距三维节点定位算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2016, 39(5): 140-148.

[3] WIN M Z, CONTI A, MAZUELAS S, et al. Network localization and navigation via cooperation [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 49(5): 56-62.

[4] PATWARI N, ASH J N, KYPEROUNTAS S, et al. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2015, 22(4): 54-69.

[5] SHEN Y, WYMEERSCH H, WIN M Z. Fundamental Limits of Wide-band Localization; Part II: Cooperative Networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 56(10): 4981-5000.

[6] SOTTILE F, VESCO A, SCOPIGNO R, et al. MAC layer impact on the performance of real-time cooperative positioning [C]//2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012: 1858-1863.

[7] LINDBERG C, MUPPIRISETTY L S, DAHLN K M. Mac delay in belief consensus for distributed tracking [C]//2013 10th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC), 2013: 1-6.

[8] S. V. de VELDE, G. T. F. de Abreu. Improved Censoring and NLOS Avoidance for Wireless Localization in Dense Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 11(3): 2302-2312.

[9] ZHANG T, MOLISCH A F, SHEN Y. Joint Power and Bandwidth Allocation in Wireless Cooperative Localization Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(10): 6527-6540.

[10] SONG L, ZHANG T, YU X, et al. Scheduling in Cooperative UWB Localization Networks Using Round Trip Measurements [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(7): 1409-1412.

[11] 王文秀, 董峰, 张昊洋. 一种改进的到达时间差无线定位算法研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(21): 258-262.

[12] 逮志宇, 王建辉, 巴斌. 修正容积卡尔曼滤波数据域直接定位算法 [J]. 航空学报, 2018, 39(9): 1-8.

[13] GARCIA G E, MUPPIRISETTY L S, SCHILLE E M. On the Trade-Off Between Accuracy and Delay in Cooperative UWB Localization: Performance Bounds and Scaling Laws [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4574-4585.

[14] GHOLAMI M R, GEZICI S. TW-TOA Based Positioning in the Presence of Clock Imperfections [J]. Digital Signal Process, 2016, 59(3): 19-30.