



网络随机指数噪声环境下时钟同步与定位的联合研究^{*}

赵 响^{1,2}, 林基明²

(1. 西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071;

2. 桂林电子科技大学信息与通信学院 桂林 541004)

摘 要: 在无线传感器网络中, 基于消息到达时间的时钟同步与定位联合研究是一项重要的研究课题。网络的随机时延一般用指数分布描述。基于消息到达时间的测量值, 推出了在指数随机噪声条件下同步与定位的联合最大似然估计(JMLE)算法以及联合最佳线性无偏估计(JBLUE)算法。仿真表明, 与已有的联合算法相比, 提出的 JMLE 算法与 JBLUE 算法估计精度较高。

关键词: 联合最大似然估计; 联合最佳线性无偏估计; 指数分布; 定位; 同步

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.10.015

Joint Research on Clock Synchronization and Localization in Wireless Sensor Network with Stochastic Exponentially Distributed Noise

Zhao Xiang^{1,2}, Lin Jiming²

(1. School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Joint clock synchronization and localization based on the time of arrival (TOA) measurements is a very important research topic for many wireless sensor network applications. The exponentially distributed link delay is usually used to describe the practical network link condition. The joint maximum likelihood estimation (JMLE) on clock synchronization and localization problem was first proposed based on the TOA measurements. JMLE was optimal only for Gaussian delay, as for the exponentially distributed delay, the joint best linear unbiased estimation (JBLUE) was then proposed. The result is derived via simulation: JMLE and JBLUE are always superior to the latest joint algorithm, with the highest estimation accuracy.

Key words: joint maximum likelihood estimation, joint best linear unbiased estimation, exponentially distributed, localization, synchronization

1 引言

在无线传感器网络(WSN)的应用中, 很多情况下既需要知道传感器节点所处位置, 又需要这些节点的时钟在同

一时间上运行。传统的时钟同步主要从协议设计角度进行研究, 如已经提出的典型协议^[1]: 传感器网络时间同步协议(TPSN)、洪泛时钟同步协议(FTSP)、参考广播同步(RBS)协议、时间扩散同步协议(TDP)等; 而定位^[2]主要从

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.61261017, No.61172054, No.61362006, No.61371107)



信号处理的角度进行研究,如基于消息到达角(AOA)、到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)、接收信号强度(RSS)以及TOA/AOA组合、TOA/RSS组合、TOA/TDOA组合的相关定位算法。WSN节点的时钟同步与定位问题已经分别被研究了很长一段时间。事实上,同步与定位有非常紧密的联系,在很多方面都有共同点。而且,时间同步的精确性是基于时间定位的一个中心问题,如IEEE 802.15.4a标准的基于TOA双向测距定位。因此,基于TOA的时钟同步与定位联合研究是一项重要的研究课题。

参考文献[3]假设WSN中有1个未知节点(时钟未同步且位置未知)与 $L(L \geq 3)$ 个锚节点(即参考节点),基于TOA建立了时钟及位置参数的线性方程,将时钟同步与定位的联合估计问题转化为求线性二次方程解析解问题,并通过加权最小二乘(LS)估计算法降低计算复杂度。参考文献[4]在分层多跳WSN中研究时钟同步与定位的联合估计问题,设任一时刻只有1个未知节点进行时钟与位置的估计,基于TOA建立同步与定位的联合方程,重点分析了最小二乘的改进算法,同时还讨论了锚节点存在误差情况下的估计精度问题。

参考文献[3]与参考文献[4]中提出的估计算法,均假设TOA误差(即随机时延)服从高斯分布。然而,在实际应用中更多的是用“指数分布”建立随机时延模型。例如,参考文献[5]利用定长的UDP(用户数据报协议)数据分组,在一个多月内观测互联网上的几种时延测量轨迹,如高斯分布、指数分布、Weibull分布、Gamma分布、log-normal分布等,最终发现指数分布是最接近测量数据的。在时钟同步与定位的联合估计过程中,目前还没有用“指数分布”建立随机时延模型的算法,而本文进行的正是“指数分布”噪声环境下的时钟同步与定位的联合估计。

因为TOA误差就像噪声一样,总是对联合估计造成影响,当TOA误差服从“指数分布”时,一般称其为随机指数噪声。本文研究的是随机指数噪声环境下时钟同步与定位的联合估计问题,研究内容如下。

- 基于TOA测量值,推导出未知节点时钟相偏与位置参数的联合最大似然估计(JMLE)算法。
- 因为只有当随机噪声为高斯噪声时,最大似然估计才是最优估计;当随机噪声为非高斯分布时,最大似然估计是次优估计。针对随机指数噪声,基于TOA测量值的阶数统计,推导出联合最佳线性无偏估计(JBLUE)算法。
- 利用MATLAB构建WSN通信系统模型,将本文提出的JBLUE算法、JMLE算法与参考文献[3]和参考文献[4]提出的算法做精度对比,并给出相应的结论。

2 系统模型

本文以双向交换的消息传输方式为基础,针对上、下行传输链路的随机指数噪声情况,进行时钟同步与定位的联合估计。下面,首先分析双向交换的消息传输方式。

假设WSN初始时有 $L(L \geq 3)$ 个锚节点,任一时刻只有1个未知节点需要时钟同步和定位,未知节点与相邻锚节点(至少3个)通过双向交换时间戳的方式进行消息传输。

第 l 个锚节点 $A_l(l=1,2,\dots,L,L \geq 3)$,其位置 $a_l=(x_l, y_l)^T$ 确知且拥有理想同步时钟 $C_l(t)=t$,其中 T 表示转置运算。待定节点 B 的位置 $x=(x, y)^T$,相对于锚节点 A_l 的欧式距离为 $d_l=\|x-a_l\|$,相对于锚节点理想时钟的相偏为 θ_l 。待定节点 B 与锚节点 A_l 之间共进行 N 次时间戳消息交换,如图1所示。在第 $n(n=1,2,\dots,N)$ 次消息交换过程中,节点 B 首先在时刻 T_n 发送一个时间戳消息,锚节点 A_l 在时刻 R_n^0 收到该消息。然后,锚节点 A_l 在时刻 T_n^0 发送一个响应消息给节点 B ,该响应消息包括 T_n^0 和 R_n^0 。节点 B 在时刻 R_n 收到该响应消息。假设节点 B 与锚节点 A_l 之间是视距(LOS)传播。根据图1,上行传输: $T_n=R_n^0-\tau_l-X_{ln}+\theta_l$;下行传输: $R_n=T_n^0+\tau_l+Y_{ln}+\theta_l$ 。其中, $\tau_l=d_l/c$ (c 是光速,为简化分析,令 $c=1$,则对 d_l 的估计转化为对 τ_l 的估计)是节点 B 与锚节点 A_l 之间时延的固定部分; X_{ln}, Y_{ln} 是

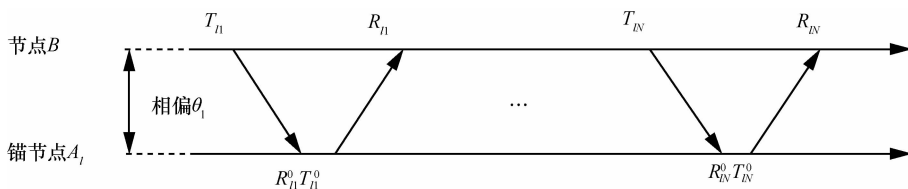


图1 双向交换时间戳的消息传输方式

TOA 误差,是节点 B 与锚节点 A_l 之间的随机时延。由于网络中各节点工作状态(唤醒或休眠)以及网络业务量的影响,随机时延随机变化,文中假设随机时延噪声 X_{ln} 与 Y_{ln} 相互统计独立,同服从指数分布。

以双向交换的消息传输方式为基础,基于 TOA 测量值,针对上、下行传输链路的随机指数型噪声情况,推导出时钟同步与定位的联合最大似然估计(JMLE)算法以及联合最佳线性无偏估计(JBLUE)算法,并总结出网络中多个节点进行时钟同步与定位联合估计的步骤;利用 MATLAB 构建 WSN 通信系统模型,将本文提出的 JBLUE 算法、JMLE 算法与参考文献[3]和参考文献[4]提出的算法作精度对比,并给出相应的结论。

3 网络级时钟同步与定位的联合估计算法

3.1 联合最大似然估计算法

令 $U_{ln} = R_{ln}^0 - T_{ln}$, $V_{ln} = R_{ln} - T_{ln}^0$, 则有: $U_{ln} = \tau_l - \theta_l + X_{ln}$, $V_{ln} = \tau_l + \theta_l + Y_{ln}$ 。

上、下行链路随机时延噪声 X_{ln} 、 Y_{ln} 相互统计独立,同服从指数分布,均值分别为 β 、 α 。此时似然函数为:

$$L(\tau_l, \theta, \alpha, \beta) = \beta^{-N} \exp \left[-\frac{1}{\beta} \left(\sum_{n=1}^N (U_{ln} - \tau_l + \theta) \right) \right] \cdot \alpha^{-N} \exp \left[-\frac{1}{\alpha} \left(\sum_{n=1}^N (V_{ln} - \tau_l - \theta) \right) \right] \cdot I(V_{l(1)} \geq \tau_l + \theta, U_{l(1)} \geq \tau_l - \theta) \quad (1)$$

其中, $I(\cdot)$ 是符号函数,当条件为真时等于 1,否则等于 0。 $V_{l(1)}$ 、 $U_{l(1)}$ 分别是观测数据 $\{V_{ln}\}_{n=1}^N$ 、 $\{U_{ln}\}_{n=1}^N$ ($l=1,2,\dots,L$, $L \geq 3$) 的最小阶数统计。一般情况下, $\tau_l > 0$, $-\infty < \theta_l < +\infty$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$ 。根据参考文献[6],得出同步与定位参数 $\Omega_{JMLE} = (\tau_l, \theta_l, \alpha, \beta)^T$ 的联合最大似然估计为:

$$\hat{\Omega}_{JMLE} = \begin{pmatrix} \hat{\tau}_l \\ \hat{\theta}_l \\ \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (V_{l(1)} + U_{l(1)})/2 \\ (V_{l(1)} - U_{l(1)})/2 \\ \bar{V}_l - V_{l(1)} \\ \bar{U}_l - U_{l(1)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 $\bar{V}_l$ 、 $\bar{U}_l$ 分别代表观测数据 $\{V_{ln}\}_{n=1}^N$ 、 $\{U_{ln}\}_{n=1}^N$ 的平均值,即 $\bar{V}_l = \sum_{n=1}^N V_{ln} / N$ 、 $\bar{U}_l = \sum_{n=1}^N U_{ln} / N$ ($l=1,2,\dots,L$, $L \geq 3$)。

因为 JMLE 算法只有在随机噪声为高斯分布时才

是最优估计,所以,当随机时延服从指数分布时,基于 TOA 测量值的阶数进行统计。下面,联合最佳线性无偏估计算法。

3.2 联合最佳线性无偏估计算法

首先,对观测数据 $\{V_{ln}\}_{n=1}^N$ 、 $\{U_{ln}\}_{n=1}^N$ 及其归一化值 $\{V'_{ln}\}_{n=1}^N$ 、 $\{U'_{ln}\}_{n=1}^N$ ($n=1,2,\dots,N$; $l=1,2,\dots,L$, $L \geq 3$) 进行阶数统计,获得次序统计数据,分别用 $\{V_{ln}\}_{n=1}^N$ 、 $\{U_{ln}\}_{n=1}^N$ 、 $\{V'_{ln}\}_{n=1}^N$ 、 $\{U'_{ln}\}_{n=1}^N$ 表示。

然后,计算次序统计数据的均值及协方差^[7]:

$$E(V'_{l(n)}) = E(U'_{l(n)}) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N-i+1} \quad (3)$$

$$\text{Cov}(V'_{l(n)} V'_{l(m)}) = \text{Cov}(U'_{l(n)} U'_{l(m)}) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(N-i+1)^2} \quad (4)$$

因此,次序统计数据 $V'_{l(n)}$ 与 $U'_{l(n)}$ 的协方差矩阵相同,用 C 表示, C 是 $N \times N$ 正定对称的矩阵。

最后,利用次序统计数据,构建矢量 $q = (V_{l(1)} V_{l(2)} \cdots V_{l(N)} U_{l(1)} U_{l(2)} \cdots U_{l(N)})^T$, $l=1,2,\dots,L$, $L \geq 3$, 建立基于次序统计量的线性模型: $E(q) = Q \cdot \Omega_{JBLUE}$, 其中:

$$\Omega_{JMLE} = (\tau_l, \theta_l, \alpha, \beta)^T$$

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & -1 & -1 & \cdots & -1 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{N-i+1} & \cdots & \sum_{i=1}^N \frac{1}{N-i+1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{N-i+1} & \cdots & \sum_{i=1}^N \frac{1}{N-i+1} \end{pmatrix}^T$$

应用高斯—马尔可夫定理,参数 Ω_{JBLUE} 的联合最佳线性无偏估计为:

$$\hat{\Omega}_{JBLUE} = (Q^T C_q^{-1} Q)^{-1} Q^T C_q^{-1} q$$

$$= \frac{1}{2(N-1)} \begin{pmatrix} N(V_{l(1)} + U_{l(1)}) - (\bar{V}_l + \bar{U}_l) \\ N(V_{l(1)} - U_{l(1)}) - (\bar{V}_l - \bar{U}_l) \\ 2N(\bar{V}_l - V_{l(1)}) \\ 2N(\bar{U}_l - U_{l(1)}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

综上所述,无线传感器网络中的多个节点进行时钟同步与定位联合估计,主要遵循以下 3 个步骤。

- 初始化。所有锚节点(至少 3 个)的时钟同步且所处的位置已知。任一时刻只有 1 个未知节点需要进行时钟参数和定位参数的联合估计。



- 参数估计。未知节点就近选择相邻锚节点(至少3个),通过双向交换时间戳消息的方式,基于TOA测量值,利用JMLE算法以及JBLUE算法,联合估计未知节点相对于锚节点的位置和时钟偏差。
- 参数调整。未知节点根据估计值进行参数调整,然后,该节点作为新的锚节点参与到网络中其他待定位节点的位置估计与时间估计中,直至网络中每个节点获得精确的位置及时钟保持一致。

4 性能估计

衡量时钟同步与定位的联合估计的最重要的性能指标之一是估计精度。网络中的节点通过双向交换消息方式来估计其时钟相偏和位置参数,时间戳消息在网络中传输时会产生不确定时延,该时延的不确定性是影响时钟同步与定位联合估计的精度的主要因素。下面,基于MATLAB,仿真随机指数时延条件下JMLE算法与JBLUE算法的定位估计精度以及时钟同步估计精度,并与参考文献[3]、[4]的算法进行精度比较,最后得出结论。

仿真环境设置如下:3个锚节点分别位于(5,9)、(19,21)、(35,3),未知节点B在区域 $[0,15] \times [0,15]$ 随机分布。节点B的相偏在 $[1,10]$ ns范围随机分布。双向交换次数 N 在 $[2,15]$ 次范围变化,步长为1。下行链路随机噪声的均值 $\beta=1$,上行链路随机噪声的均值 α 在 $[0.1,2]$ 范围取值,步长为 $1/15$ 。位置估计及时钟同步(相位)估计的均方误差(mean square error,MSE)分别定义为 $E\{(x-\hat{x})^2 + (y-\hat{y})^2\}$ 和 $E\{(\theta-\hat{\theta})^2\}$ 。所有仿真均进行1000次,并取平均值。

定位的估计性能如图2所示,按照估计精度的高低排列,依次是:JBLUE算法、JMLE算法、参考文献[3]提出的

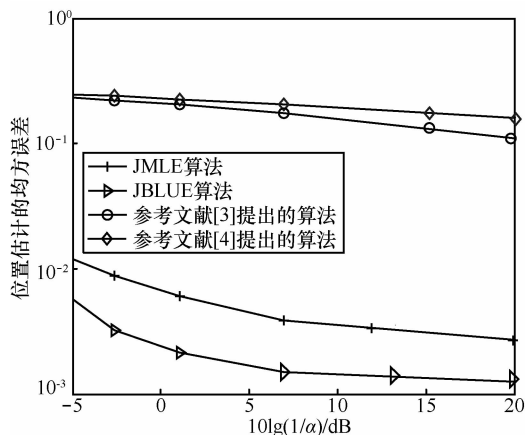


图2 定位估计性能

算法、参考文献[4]提出的算法。由图2可知,本文的JBLUE算法,精度最高,可以达到 10^{-3} 数量级。当随机噪声 $10\lg(1/\alpha)$ 较小时,参考文献[3]与参考文献[4]的算法精度非常接近;但是,随着噪声 $10\lg(1/\alpha)$ 的增大,曲线间隔变宽,两种算法的性能差距增大。

时钟同步的估计性能如图3所示,JBLUE算法、JMLE算法精度依然高于参考文献[3]与参考文献[4]的算法。当上下行链路随机噪声的均值 $\alpha \approx \beta$ 时,JMLE算法的性能优于JBLUE算法;当 $\alpha \gg \beta$ 时,JBLUE算法的性能则优于JMLE算法,可以达到 10^{-3} 数量级。参考文献[3]的算法总是优于参考文献[4]的算法,参考文献[3]提出的算法精度接近 10^{-1} 数量级,参考文献[4]提出的算法精度则只有个位数数量级。

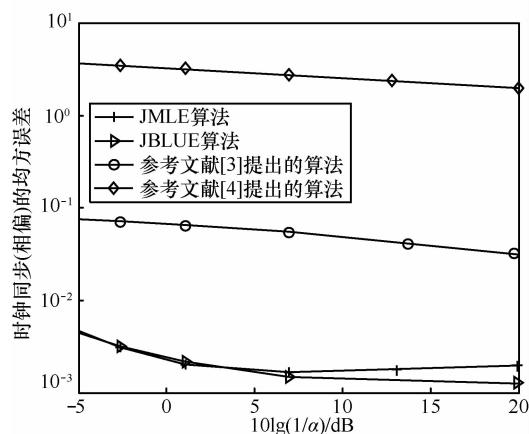


图3 时钟同步(相偏)的估计性能

5 结束语

本文以双向交换时间戳消息的传输方式为基础,基于TOA测量值,针对上、下行传输链路的随机时延为指数噪声的情况,联合估计未知节点的时间和位置参数;推导出了同步与定位的JMLE算法以及JBLUE算法。仿真表明,不管是定位估计性能还是同步估计性能,JBLUE算法与JMLE算法的精度均优于现有的联合同步与定位算法。

参考文献

- 1 Wu Y C, Chaudhari Q, Serpedin E. Clock synchronization of wireless sensor networks. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28(1): 124~138
- 2 Win M Z, Conti A, Mazuelas S, et al. Network localization and navigation via cooperation. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(5): 56~62

(下转第109页)

- 3 Feamster N, Gao L, Rexford J. How to lease the internet in your spare time. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2007, 37(1): 61~64
- 4 FIRE. <http://www.ict-firworks.eu>, 2012
- 5 Zhang L, Estrin D, Burke J, *et al.* Named Data Networking (NDN) Project. Relatório Técnico NDN-0001, Xerox Palo Alto Research Center-PARC, 2010
- 6 Egi N, Greenhalgh A, Handley M, *et al.* Towards high performance virtual routers on commodity hardware. *Proceedings of the ACM CoNEXT Conference*, New York, NY, USA, 2008:1~12
- 7 NWGN. <http://akari-project.nict.go.jp>, 2012
- 8 Han S, Jang K, Park K S, *et al.* PacketShader: a GPU-accelerated software router. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2010, 40(4): 195~206
- 9 FIF. <http://www.fif.kr>, 2012
- 10 Cisco logical router. <http://www.cisco.com>, 2012
- 11 Juniper logical router. <http://www.juniper.net>, 2012
- 12 Netlogic. NL 9000 RA knowledge-based processors, 2009
- 13 The BGP instability report. <http://bgpupdates.potaroo.net/instability/bgpupd.html>, 2014
- 14 Huang K, Xie G, Li Y, *et al.* Offset addressing approach to memory-efficient IP address lookup. *Proceedings of IEEE INFOCOM*, Shanghai, China, 2011: 306~310
- 15 Luo L, Xie G, Xie Y, *et al.* A hybrid IP lookup architecture with fast updates. *Proceedings of IEEE INFOCOM*, Orlando, FL, USA, 2012: 2435~2443
- 16 Ganegedara T, Jiang W, Prasanna V. Multirout: towards memory-efficient router virtualization. *Proceedings of IEEE International Conference*, Kyoto, Japan, 2011: 1~5
- 17 Luo L, Xie G, Uhlig S, *et al.* Towards TCAM-based scalable virtual routers. *Proceedings of the 8th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, Nice, France, 2012: 73~84
- 18 Shah D, Gupta P. Fast incremental updates on ternary-CAMs for routing lookups and packet classification. *Proceedings of Hot Interconnects-8*, Stanford, CA, USA, 2000: 145~153
- 19 Fu J, Rexford J. Efficient IP-address lookup with a shared forwarding table for multiple virtual routers. *Proceedings of the ACM CoNEXT Conference*, New York, NY, USA, 2008: 1~12
- 20 Le H, Ganegedara T, Prasanna V K. Memory-efficient and scalable virtual routers using FPGA. *Proceedings of the 19th ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays*, Monterey, California, USA, 2011: 257~266

[作者简介]



胡颖,女,商丘师范学院讲师,主要研究方向为网络虚拟化。

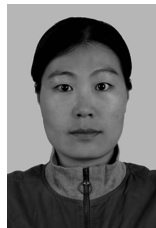
庄雷,女,博士,郑州大学教授,主要研究方向为可重构网络和网络虚拟化。

(收稿日期:2014-08-20)

(上接第 102 页)

- 3 Zhu S, Ding Z. Joint synchronization and localization using TOAs: a linearization based WLS solution. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(7): 1017~1025
- 4 Zheng J, Wu Y C. Joint time synchronization and localization of an unknown node in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(3): 1309~1320
- 5 Moon S B, Skelley P, Towsley D. Estimation and removal of clock skew from network delay measurements. *Proceedings of the 18th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '99)*, New York, USA, 1999:227~234
- 6 Jeske D R. On the maximum likelihood estimation of clock offset. *IEEE Transactions on Communication*, 2005, 53 (1): 53~54
- 7 Johnson N L, Kemp A W, Kotz S. *Univariate Discrete Distributions*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005

[作者简介]



赵响,女,西安电子科技大学博士生,主要研究方向为无线传感器网络中的定位与同步。



林基明,男,桂林电子科技大学教授,主要研究方向为移动通信、无线传感器网络中的定位与同步。

(收稿日期:2014-05-28)