

支持异步 TDOA 测量的确定性定位网络

薛 源, 苏 伟, 王洪超, 杨 冬

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘 要: 在工业场景中, 复杂无线环境对定位网络的影响导致定位存在实时可靠性差、精度低的问题. 基于此, 本文设计了在信标节点异步情况下支持 TDOA (Time Difference-Of-Arrival) 测量的确定性定位网络模型 (ASync-DetNET), 同时提出了适用于 ASync-DetNET 的节点感知模型和定位模型. 通过简化了定位节点对数据信息的获取方式, 合理调度通信资源, 使得能够满足不同精度的定位需求, 在保障定位精度的前提下, 提高定位的实时可靠性. 本文在实际搭建的面向复杂工业环境的 UWB (Ultra-WideBand) 室内定位系统中进行测试, 结果表明文中方法能够在一定程度上提高了定位精度, 保证定位的确定性.

关键词: 工业; 室内定位; 确定性网络; 实时性; 可靠性

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)10-2017-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.10.001

A Deterministic Localization Network for TDOA Measurement

XUE Yuan, SU Wei, WANG Hong-chao, YANG Dong

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In the industrial environment, the influence of the complex wireless communication on the localization network leads to poor real-time reliability and low accuracy of localization. This paper proposes the deterministic localization network model for TDOA (time difference-of-arrival) measurement in the case of asynchronous anchor nodes called ASync-DetNET. After that, we propose the sensing model and localization model, which can adapt to ASync-DetNET. These models can simplify the way of obtaining data information, comply with various requirements of localization accuracy and guarantee the real-time reliability with reasonably communication resources scheduling. Subsequently, we implement a localization system with ultra-wideband signals for complicated environment and finally we estimate the influence of the ASync-DetNET on the localization. The experiments show that the proposed models can improve the accuracy of localization and guarantee the deterministic of localization.

Key words: industrial; indoor localization; deterministic network; real-time; reliability

1 引言

工业互联网成为我国推动制造业高质量发展关键支撑, 尤其在智能制造车间中, 工业互联网的应用促进了制造业生产新模式的出现, 构建工业互联网生态体系成为工业数字化网络化智能化转型升级的重要部分^[1]. 而位置服务信息为工业生产过程中的监测消息提供了参考价值. 常用的提供位置信息的主要方式是 GPS, 它利用卫星信号进行定位, 具有定位精度高、实时性好、抗干扰能力强等优点. 但是, 通常 GPS 在无遮挡的室外环境下定位具有良好的效果, 并不适用于大规

模的室内工业环境. 因此, 在技术和市场需求的双重推动下, 构建高可靠、高精度的室内定位系统已成为研究热点^[2], 这对定位技术以及为其提供可靠数据传输的定位网络提出了更高要求.

目前, 常用的室内定位技术包括室内红外线定位技术、超声波技术、RFID 室内定位技术、WLAN 的室内定位技术、Bluetooth 以及 UWB (Ultra-WideBand) 等, 它们都是通过接收到不同的信号参数, 根据特定的模型、算法对目标在某一时刻所处的位置进行测量定位^[2,3]. 其中, 定位模型的选择对定位性能有着重要影响. 由于 TDOA (Time Difference-of-Arrival) 无需定位节点和信标

节点之间的时间同步,系统复杂度降低,使其成为常用的定位模型.^[4-6]提出了多种基于 TDOA 的定位模型,这些模型通过获取定位节点到任意两个信标节点的距离差,计算定位结果;其前提是要保证信标节点之间的时间同步.然而,同步过程会占用一定的带宽资源,增加网络的消耗^[7];同时,在工厂环境下容易出现链路失效、丢包等现象,会直接影响定位的实时可靠性及精度.^[8-12]另辟途径,提出了无需时间同步的方案来进行 TDOA 的测量,以求达到时间同步的效果;但是这些方法都需要满足一些额外的先验条件,或者很高的带宽和高性能计算支持.

就提高定位精度而言,除了优化定位模型、定位算法之外,另一个有效思路是密集部署信标节点^[2].由于工业环境中射频通信条件恶劣,传统的室内定位网络在为制造车间设备提供位置服务信息时,受各种大型器械、金属管道等对信号的反射、散射造成的多径效应,以及马达、器械运转时产生的电磁噪声等影响,干扰定位信号的正确接收,导致了定位的实时可靠性差、精度低^[14,15].传统的定位网络无法满足关键生产环节等领域中定位数据传输的可靠性、实时性和确定性,同时面临着以下挑战^[16-18].(1)定位节点受成本和安装条件限制,通常要靠自身携带的电池供电,对能耗具有较高的要求;定位节点数据的频繁交互导致能耗消耗增加.(2)密集部署信标节点使得网络负担过重,而不同的定位需求对网络性能的要求不一样,缺少根据需求而个性化定制的网络^[13].(3)目前的定位网络是一种尽力而为的模式,随着网络规模的扩大,定位数据无法实时可靠的传输,而失去时效的位置信息不利于智能制造生产的开展.因此,如何利用较少的资源满足智能制造生产过程中的定位需求、减小网络负荷、实现网络的个性化定制,如何优化某一网络规模与拓扑保证定位性能的实时性、可靠性,构建一个确定性定位网络是室内定位亟需解决的问题.

本文设计了在信标节点异步情况下支持 TDOA 测量的确定性定位网络模型 (ASync-DetNET),通过优化通信资源分配,保证了定位的可靠性和实时性;同时设计了基于 TDOA 的异步节点感知模型和定位模型,能满足不同精度的定位需求,简化了设备节点对数据信息的获取方式,相同时间内获取更多定位信息,提高了目标节点的定位精度.

2 支持异步 TDOA 测量的确定性定位网络

2.1 工作原理

在无线定位中,密集部署信标节点能够有效提高定位精度.对此,一方面要合理设计传输协作策略,确保网络的通信质量;另一方面,尽量简化网络节点间的数

据信息量,减小节点的计算和存储,降低网络通信负荷,提高网络纠错能力^[2].针对智能制造生产过程中定位对网络的需求,本文设计了在信标节点异步情况下支持 TDOA 测量的确定性定位网络模型.在模型中,传输层可支持数据报文的分片、压缩和重组,能够更好地与现有网络互联互通;网络层支持源路由和图路由两种路由技术;数据链路层采用 TDMA (Time Division Multiple Access) 技术,并增加了信道跳频技术,对网络通信过程中时隙信道的使用进行预调度;物理层则使用 IEEE 802.15.4 标准定义的协议体系,遵守物理层规范的无线信号调制方式、信号强度等.

ASync-DetNET 模型通过简化定位节点通信方式,减少了数据信息的交换次数,从而减小网络通信负荷.同时,通过合理调度,对信标节点 MAC (Media Access Control) 层的时隙和信道资源、网络层路由协议的路径进行精细划分,可以高效地利用有限的无线信道资源,将定位的时间控制在精确的范围之内,提高了数据传输的可靠性和实时性,保证了定位网络的确定性.

2.2 ASync-DetNET 定位网络结构

ASync-DetNET 定位网络结构如图 1 所示,整个网络包括传感器节点①、接入网关②、服务器③、用户④.传感器网络节点①一般嵌入在工业设备上,用于发送信号、数据等,实现工业设备数据的采集以及定位信息的采集;同时信标节点网络层 (ANNL)⑤具有无线中继作用,可组成多跳 Mesh 网络.接入网关②负责网络的连接,实现不同协议网络之间的互连;其中,无线接入点 AP⑧实现信标网络节点数据的汇聚. ASync-DetNET 服务器③是整个网络的逻辑实体,主要负责网络资源的调度和定位数据包的解析、存储、计算等处理.

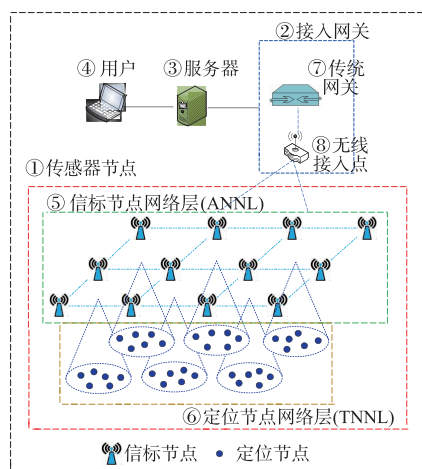


图1 ASync-DetNET定位网络结构

2.3 ASync-DetNET 核心架构功能

ASync-DetNET 定位网络核心功能模块如图 2 所示,与图 1 中的网络结构具有以下对应关系.

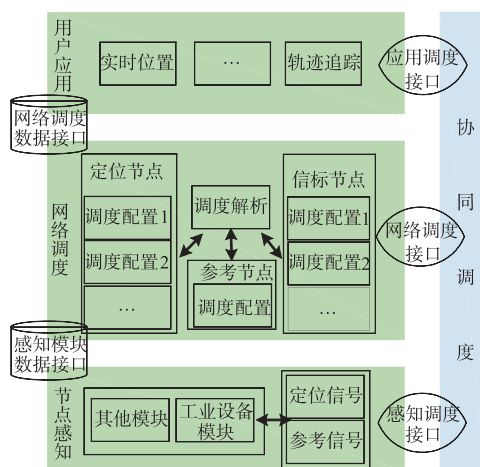


图2 ASync-DetNET定位网络核心功能模块

用户模块同图 1 中的用户④相对应,主要包含实时定位、轨迹追踪等应用平台以及系统中管理功能,能够根据实际应用的需求,利用 PC 端对服务的优先级进行划分,最终体现在数据传输的可靠性、实时性和确定性上面.网络调度模块主要负责⑤和定位节点网络层(TNNL)⑥中的网络资源调度、配置等,其过程在 ASync-DetNET 服务器③中进行,减少了节点的运算负担和能量消耗.节点感知主要是信标节点自主感知⑥中的定位信号和参考信号,由 UWB 定位模块完成.协同调度模块主要用于定位网络中所有资源的统一调度,以便满足定位需求的个性化定制网络性能.本文重点介绍网络资源调度和节点感知模型的架构.

2.4 ASync-DetNET 资源调度

为提高定位精度、减小误差范围,可以在工业无线定位中密集部署图 1 中⑤.然而,网络规模的扩大使得网络部署成为一项繁重而复杂的工作.通信资源的合理配置能够保证通信的可靠性、实时性,其图 1 中⑤的调度方案影响了定位网络的性能.目前大多数调度算法是针对静态网络中具有周期性、实时性要求较低等特点的工业应用,对于具有随机性、实时性、可靠性要求高等特点的定位应用及其数据传输来说,并不完全适用.

本文利用独占时隙中不存在竞争、通信效率高、可靠性高等特点,将⑤中 MAC 层大多数时隙分配成独占时隙,通过合理调度分配,高效地利用有限的无线信道资源,控制⑤的数据传输时间的范围.同时,为了降低节点的能耗,ASync-DetNET 对网络进行了跨层集中调度,这样不仅减少了各层的包头数据和计算量,还保证了数据传输的可靠性和确定性.

但是,在工业场景下通常会出现链路失效等情况,导致资源重调度问题.本文使用专用时隙(DTS)进行数据传输,利用共享时隙(STS)解决重调度,如图 3 所示.每个超帧增加两个 STS,由于 STS 不会提前分配给任何

链路,因此可以用于当前超帧中错误数据包的重传.

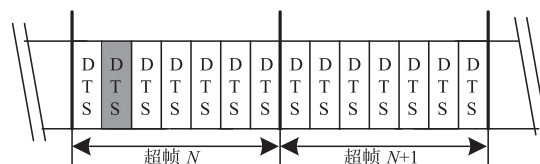


图3 通过共享时隙解决超帧重调度

本方案能有效避免信道的冲突,以及冲突引起的丢包和能量损耗;同时将缩短时延和降低能耗纳入到调度机制中,提高了数据传输的可靠性和实时性.

2.5 ASync-DetNET 节点感知

无线网络定位问题可以看作是采用各种无线测量与估算技术进行相关信息采集,对获得的信息进行处理,以得到待求点位置坐标的求解过程^[2].对于 TDOA 定位而言,其关键是对时间差的感知测量.标准 TDOA 模型通过获取定位点到任意两个信标节点的距离差等信息计算出定位结果,其前提是要实现信标节点之间完全同步.在大规模、高密度的定位应用中,同步过程会产生大量的数据交互,导致网络能耗的增加,影响网络的寿命.为减少数据的交互、确保定位的确定性,本文设计了适用于 ASync-DetNET 定位网络的异步节点感知模型,如图 4 所示.

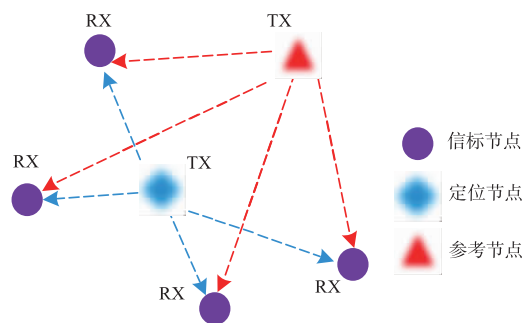


图4 异步时钟节点感知模型

该感知模型中引入参考节点,其通信方式如下.

- 1、参考节点利用无线数据链路层的广播信道特性发送参考消息,广播域内的信标节点都能接收到该消息;广播域内的各信标节点参照自己的本地时钟,分别记录接收到该参考节点信号的时刻.
- 2、定位节点发送定位信号,各信标节点参照自己的本地时钟记录接收到该定位信号的时刻.
- 3、各信标节点将接收到定位节点、参考节点的相关信息通过网关发送至服务器,作进一步处理.

根据图 4 的感知模型,设计了无需信标节点同步的 ASync-TDOA 定位模型^[20].该模型将信标节点接收到的各种定位信息映射至参考节点,从而获取定位节点到任意一组信标节点间的距离差.

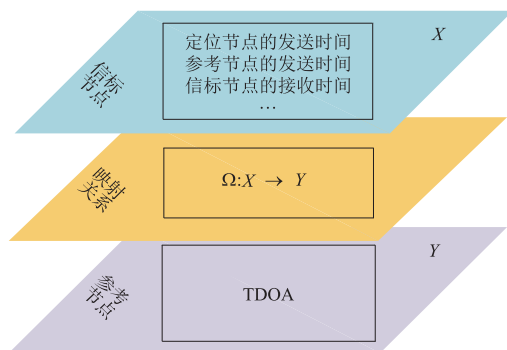


图5 ASync-TDOA模型的映射关系

如图5所示,集合 X 中的每个元素包括信标节点、参考节点的位置信息,定位节点和参考节点发送数据包的发送时间戳,信标节点接收到数据的时间戳,所有网络节点历史时间戳,以及信息采集设备可提供的各种信息. ASync-TDOA 利用参考节点和定位节点发送信号的时间,以及信标接收时间的关系,将 X 中的信息映射到 Y 上,用 $\Omega(X - Y)$ 来表示,从而获取定位节点到信标节点的距离差,具体测距方案如图6所示.

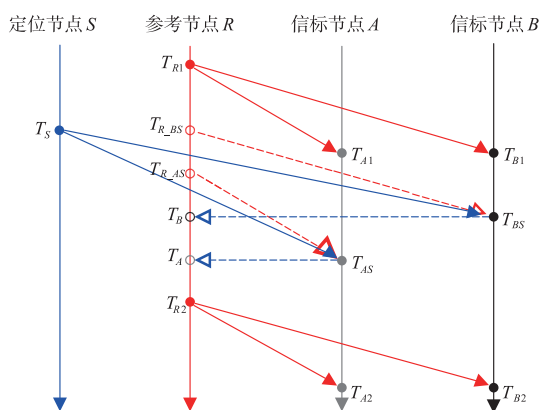


图6 ASync-TDOA测距方案

定位节点 S 在 T_s 时刻发送定位信号,信标节点 A, B 接收此信号的时间分别为 T_{AS} 和 T_{BS} .当信标节点之间保持时钟同步时,距离差 TDOA. 由于信标节点不经过时钟同步,根据本测距方案引入参考节点,如图6所示.参考节点 R 在 T_{R1}, T_{R2} 时刻发送参考信号,到达 A 和 B 的时间分别是 T_{A1}, T_{A2} 和 T_{B1}, T_{B2} .根据映射模型, T_{AS} 相当于信标节点 A 接收到参考节点 R 在 $T_{R,BS}$ 时刻发送参考信号的时间;同理, T_{BS} 相当于信标节点 B 接收到参考节点 R 在 $T_{R,BS}$ 时刻发送参考信号的时间. T_A 和 T_B 分别是 T_{AS} 和 T_{BS} 在参考节点 R 上的映射值.利用文献[20],可以求得 $T_{R,AS}$ 和 $T_{R,BS}$;再根据参考节点 R 时间轴上的信息关系,从而求得 T_A 和 T_B ,获得距离差 $TDOA = T_A - T_B$.

ASync-DetNET 节点感知模型无需信标节点间的本地时钟同步,减少了节点之间的通信次数,为支持智能

制造生产过程中大规模定位奠定基础.

3 面向复杂环境的室内定位系统

定位系统的实现需要考虑多种因素,例如系统的实时性、可靠性,在干扰情况下系统的健壮性等.基于ASync-DetNET,本文设计了面向复杂环境的UWB室内定位系统,如图7所示.

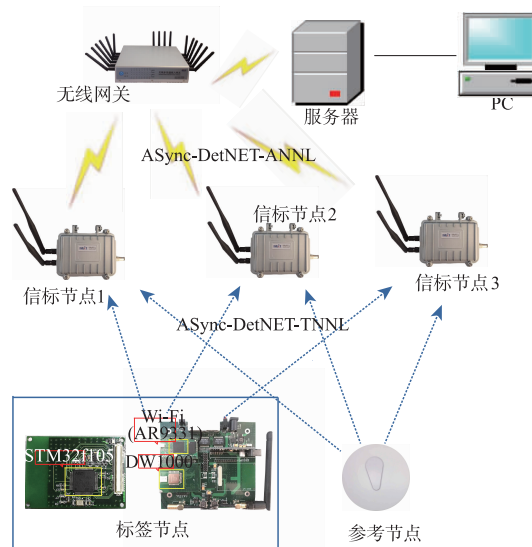


图7 支持ASync-DetNET的UWB室内定位系统

整个系统由定位节点、信标节点、网关、服务器和用户组成.定位节点发送定位信号;参考节点为固定节点,发送定位参考信号;信标节点接收参考信号和定位信号.定位节点-信标节点之间利用UWB通信,信标节点-网关之间通过无线进行通信.无线网关将网络中信标节点传输的数据汇聚;ASync-DetNET服务器负责网络资源的调度和定位数据包进行解析、存储、计算处理等;PC主要用于平台的显示以及相关管理的操作.系统核心是将信息的处理等实现交给上层的服务器,使网络中的节点设备均作为执行设备,受上层调度控制.定位过程中信息的传输如下:

- (1) 定位节点和参考节点发送定位或参考信息,包含上次发送的时间戳;
- (2) 信标节点接收来自参考节点和定位节点发送的信息,然后将该信息和本地时钟的接收时间戳发送至网关;
- (3) 网关将接收到的所有信息传输至服务器;
- (4) 服务器将根据本文设计的定位模型进行坐标解算.

系统通过简化设备节点对数据信息的获取方式和对通信资源的合理分配,从而保障所需定位数据传输的实时性、可靠性和确定性;同时在满足工业服务需求和现场网络设备运行的情况,实现个性化定制网络.目

前,该系统已完成在上海高铁检修车间的测试.

4 测试及性能分析

为测试在信标节点异步情况下支持 TDOA 测量的确定性网络模型对定位的影响,本节利用搭建的面向复杂工业环境的 UWB 室内定位系统对定位的实时性、可靠性、精确度,以及 ASync-TDOA 定位模型的测距精度进行验证.

4.1 测试环境

测试在机房 9.6×4.8 区域内进行二维定位,其场景如图 8 所示.测试系统由 4 个信标节点、1 个参考节点、若干个定位节点、无线网关和定位服务器组成.其中信标节点坐标为 A(9.6,0)、B(0,0)、C(0,4.8)、D(9.6,4.8),参考节点坐标为(9.6,2.4).

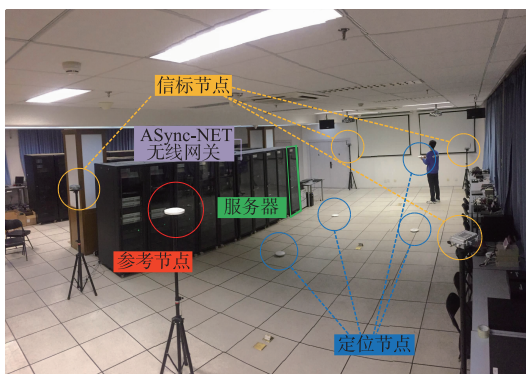


图8 测试场景

4.2 ASync-DetNET 对定位的影响

定位网络是保证数据传输的基础.在定位过程中,节点的感知数据必须尽快提供给服务器,从而实现快速响应.数据包传输的冲突碰撞影响到最终定位结果的实时性.在复杂场景下,数据在定位节点-信标节点之间和信标节点-网关之间传输时容易出现数据包丢失现象.本次测试在不同网络模型下,比较不同规模信标节点数完成一次定位的时间,如图 9-13 所示.

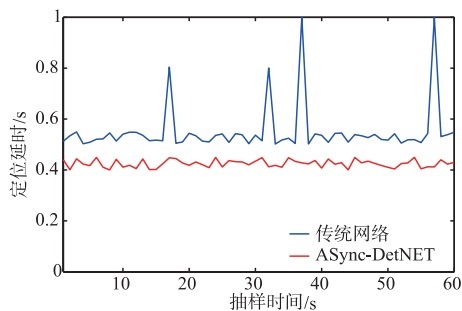


图9 5个信标节点的定位时间

从图 9-11 中可以看出,基于 ASync-DetNET 网络模型完成一次定位的时间要比传统“尽力而为”网络使用时间短;随着信标节点规模的增加,基于传统网络的

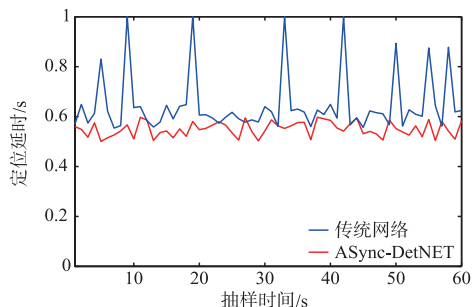


图10 10个信标节点的定位时间

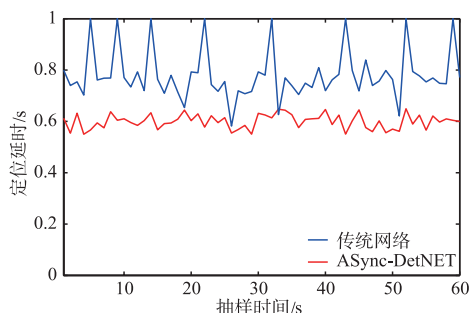


图11 20个信标节点的定位时间

TDOA 定位的时间增加、波动变大,稳定性变差;而基于 ASync-DetNET 的 TDOA 定位性能比较稳定.这是因传统定位使用的是“尽力而为”的网络,而 ASync-DetNET 能对现有的网络资源进行统一调度、定制网络,减少了数据传输之间的冲突,保证信标节点-网关之间传输的确定性,降低了定位时延.

精确的定位结果同样依赖于网络系统的高可靠性,数据的可靠传输是保证定位结果能够准确计算的前提.

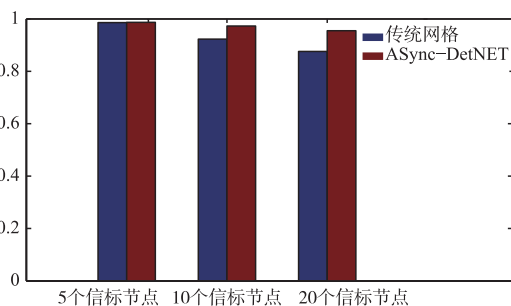


图12 定位可靠性对比图

图 12 表示在不同规模信标节点下,对不同网络模型的节点定位进行可靠性测试.从图 12 中可以看出,基于 ASync-DetNET 定位的可靠性超过 95%,基于传统“尽力而为”网络的定位可靠性要低.这是因为在 ASync-DetNET 网络模型中,将大多数时隙被分配成独占的时隙用于信标节点-网关之间互相通信,减少了数据包的碰撞丢失,提高了通信效率和可靠性.随着信标节点的增加,两种网络模型下的定位可靠性随之下降,ASync-DetNET 下的定位可靠性优于传统网络.这是因

为,在定位过程中由于信标节点-网关之间丢包增加,导致数据无法可靠的发送至服务器进行解析;同时,ASync-DetNET 网络模型引入重传机制,降低了数据因碰撞或其他原因导致丢失,保证了定位的可靠性.

测试结果表明,ASync-DetNET 通过对时隙的灵活分配,能够有效保证定位的可靠性.在不改变现有定位技术的基础上,可以通过提高网络性能,保证定位效果.

4.3 ASync-TDOA 对定位的影响

在 TDOA 定位中,距离差的测量精度直接影响了定位结果.本次实验测试了基于 ASync-DetNET 节点感知的 ASync-TDOA 定位模型,对比了两种定位模型定位节点到任意两个信标节点距离差的平均误差.其中,定位节点坐标为(2.2 2.1),参考节点发送周期为 5Hz,传统 TDOA 模型的同步周期为 5Hz.

表 1 距离差测量结果

距离差	ASync-TDOA 平均误差(m)	传统 TDOA 平均误差(m)
AB	0.0678692	0.088372
AC	0.071886	0.089146
AD	0.069859	0.093435

从表 1 可以看出,ASync-TDOA 定位模型测得距离差的平均误差在 0.08m 范围内,且小于传统 TDOA 模型的平均误差.这是因为在利用 ASync-TDOA 定位模型测距过程中无需信标节点间的同步,减小了时间同步带来的误差,从而提高了测距精度.同时,数据包交互的减少,减少了数据传输之间的冲撞,进一步保证了定位模型能充分利用相关的测量数据完成定位.

不同网络规模导致所采集有用信息量的不同,从而影响了定位结果. ASync-TDOA 定位模型可以根据不同场景对定位精度需求的不同,通过调整网络调度模式,以保证在不同网络资源下满足不同的定位精度.

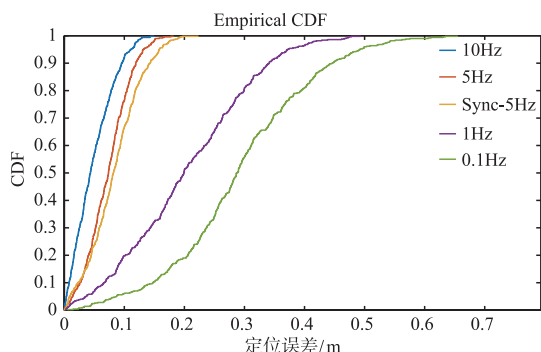


图 13 不同参考节点发送周期的定位误差

图 13 表示保持定位节点发送速率、不同参考节点信号发送周期的定位误差结果.可以看出,ASync-TDOA 在参考节点发送周期 5Hz 时的定位误差,略低于传统 TDOA 定位在同步周期为 5Hz 时的定位误差;随着参考

节点的发送速率提高,ASync-TDOA 的定位误差逐渐减小.这是因为 ASync-TDOA 无需时间同步,减小了时间同步带来的误差;同时,在相同时间内,ASync-TDOA 能从信标节点中获取更多的定位信息,并利用先前时刻的映射数据进行辅助定位.测试表明,在 ASync-TDOA 模型中,参考节点信息发送周期的变化影响了定位精度;通过改变参考节点发包周期,可以改变定位精度.

表 2 不同定位模型性能

模型	系统	精度(m)	测试区域(m ²)	能耗
A-TDOA	[19]	0.21	5 * 5	高
TD2S	[12]	0.29	9 * 9	中
ASync-TDOA	本文	0.21	9.6 * 4.8	低

表 2 比较了 ASync-TDOA 定位模型与现有的定位模型性能.通过对比可以看出,ASync-TDOA 能够提供更好的定位性能.

定位网络、定位模型最终服务于定位结果.图 14 表示的是同一个定位节点在两种网络模型、两种定位模型下的定位路径示意图,其中黑色为规定路径,红色为基于 ASync-DetNET 网络模型的定位路径,蓝色为基于传统网络的定位路径.可以看出,红色路径在真实轨迹附近,比较平滑,没有出现较大的波动;而蓝色路径出现部分定位结果丢失,波动比较大的现象.

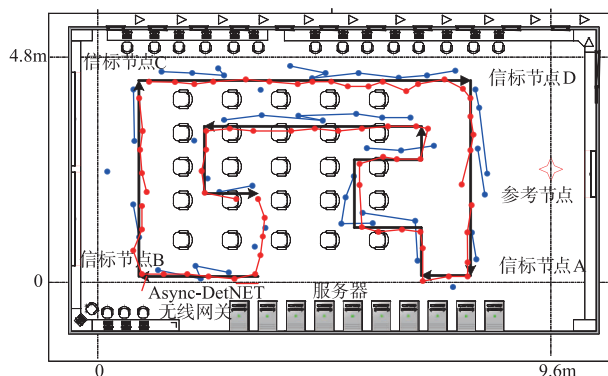


图 14 定位节点运动路径图

通过以上测试表明,ASync-DetNET 网络模型和 ASync-TDOA 定位模型能够通过映射减少数据包交互,保证数据的获取,并得到较为精确的测量精度.

5 结束语

在智能制造车间等复杂的工业环境下,通用无线网络技术无法满足位置服务信息对实时、可靠的需求.基于此,本文设计了在信标节点异步情况下支持 TDOA 测量的确定性定位网络模型.本文主要贡献在于:(1)设计了支持 TDOA 测量的确定性定位网络模型,通过优化通信资源分配,并对 MAC 层的时隙和信道资源、网络

层路由协议的路径精细划分,解决资源重调度问题,在保障定位精度的前提下,保证了定位网络的确定性;(2)设计基于 TDOA 的异步节点感知模型和定位模型,减少了节点之间的通信交互,在相同时间内获取更多的测距信息,并利用先前时刻的映射数据进行辅助定位.测试表明,相对于传统的 TDOA 定位网络,本文设计的 ASync-DetNET 定位网络和 ASync-TDOA 定位模型能够保证定位的确定性,并在一定程度上提高定位精度.

参考文献

- [1] Li X, Li D, Wan J, et al. A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0[J]. *Wireless Networks*, 2017, 23(1): 23–41.
- [2] 钱志鸿,孙大洋,LEUNG Victor. 无线网络定位综述[J]. *计算机学报*, 2016, 39(6): 1237–1256.
QIAN Zhi-Hong, SUN Da-Yang, LEUNG Victor. A survey on localization model in wireless networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(6): 1237–1256. (in Chinese)
- [3] Dwiya F, Lim M H. A survey of problems and approaches in wireless-based indoor positioning[A]. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation* [C]. IEEE, 2016. 1–7.
- [4] Tiemann J, Eckermann F, Wietfeld C. Multi-user interference and wireless clock synchronization in TDOA-based UWB localization[A]. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation* [C]. IEEE, 2016. 1–6.
- [5] Bogdani E, Vouyioukas D, Nomikos N, et al. Single-point model of MIMO-UWB indoor systems using time-reversal transmission[A]. *IEEE International Conference on Communications* [C]. IEEE, 2017. 1–6.
- [6] Exel R, Gaderer G, Loschmidt P. Localisation of wireless LAN nodes using accurate TDoA measurements[A]. *Wireless Communications and NETWORKING Conference* [C]. IEEE, 2010. 1–6.
- [7] Wang Z, Zeng P, Zhou M, et al. Cluster-based maximum consensus time synchronization for industrial wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 141.
- [8] Canclini A, Antonacci F, Sarti A, et al. Acoustic source localization with distributed asynchronous microphone networks[J]. *IEEE Transactions on Audio Speech & Language Processing*, 2013, 21(2): 439–443.
- [9] Spano D, Ricciato F. Opportunistic Time-of-Arrival localization in fully asynchronous wireless networks[J]. *Pervasive & Mobile Computing*, 2016.
- [10] Kim S, Chong J W. An Efficient TDOA-Based Localization Algorithm Without Synchronization Between Base Stations[M]. Taylor & Francis, Inc. 2015.
- [11] Pelka M, Hellbrück H. S-TDoA — Sequential time difference of arrival — A scalable and synchronization free approach for Positioning[A]. *Wireless Communications and NETWORKING Conference* [C]. IEEE, 2016.
- [12] Xu B, Sun G, Yu R, et al. High-accuracy TDOA-based localization without time synchronization[J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2013, 24(8): 1567–1576.
- [13] Jin M, Xia S, Wu H, et al. Scalable and fully distributed localization in large-scale sensor networks[J]. 2017, 6(2): 15.
- [14] Tsang K F, Gidlund M, Åkerberg J. Guest editorial industrial wireless networks: applications, challenges, and future directions[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(2): 755–757.
- [15] Han G, Liu L, Jiang J, et al. Analysis of energy-efficient connected target coverage algorithms for industrial wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(1): 135–143.
- [16] Yang D, Xu Y, Wang H, et al. Assignment of segmented slots enabling reliable real-time transmission in industrial wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(6): 3966–3977.
- [17] Dobsław F, Zhang T, Gidlund M. End-to-end reliability-aware scheduling for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(2): 758–767.
- [18] Wang W, Mosse D, Pickel J G, et al. Work-in-progress: cross-layer real-time scheduling for wireless control system[A]. *Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium* [C]. IEEE, 2017. 149–152.
- [19] He S, Dong X. High-accuracy localization platform using asynchronous time difference of arrival technology[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2017, PP (99): 1–15.
- [20] Xue Y, Su W, Wang H C, et al. A model on indoor localization system based on the time difference without synchronization[J]. *IEEE ACCESS*, 2018, 6: 34179–34189.

作者简介



薛 源 男,1990 年 8 月出生于山东临沂,北京交通大学博士研究生. 目前主要研究方向为室内定位和工业传感器网络.
E-mail: 15111042@bjtu.edu.cn



苏伟男, 1978年出生于河北景县, 北京交通大学教授, 博士生导师. 目前主要研究方向为新一代信息网络关键理论与技术, 主持或参与多项国家自然科学基金、863、973项目.

E-mail: wsu@bjtu.edu.cn



王洪超 男, 1982年12月出生于河北衡水, 北京交通大学副教授, 硕士生导师. 目前主要从事新一代信息网络理论与关键技术、工业互联网以及物联网的研究工作.

E-mail: hewang@bjtu.edu.cn



杨冬 男, 1980年12月出生于山西大同, 北京交通大学教授, 博士生导师. 目前主要从事未来网络体系及关键技术、工业互联网和无线传感器网络的研究工作.

E-mail: dyang@bjtu.edu.cn