

一种多区域多目标 TOA 实时定位系统信道分配协议

何杰 徐诚 刘飞 吕默威 王沁

(北京科技大学计算机与通信工程学院 北京 100083)

摘要 为满足无线实时定位系统实时性和节点动态加入的要求,充分提高信道利用率,提出了一种多区域多目标 TOA 实时定位系统信道分配协议(ZTDMA),将定位系统覆盖区域划分为若干互不干扰的定位子区域并行工作,缩短节点的平均定位周期,可以及时地检测到定位目标的加入和退出,动态地为其分配定位时隙,保证系统实时性。通过 OMNet++ 仿真平台对协议进行仿真,验证了实时性优势。

关键词 多区域,多目标,实时定位系统,信道利用率

中图分类号 TP393

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.07.034

Multi-zones and Multi-objectives Channel Allocation Protocol Based on TOA Real-time Geolocation System

HE Jie XU Cheng LIU Fei LV Mo-wei WANG Qin

(School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract In order to meet the needs of real-time and dynamic joining of nodes in wireless real-time geolocation system, fully improve the channel utilization rate, this paper proposed a specific ZTDMA protocol that divides the geolocation system coverage area into several independent subdomain which can work in parallel. ZTDMA can shorten the average localization period of nodes effectively, and detect the joining and exiting of target nodes in time, dynamically allocate time slot for them, ensure real-time of the system. Then we simulated the ZTDMA protocol using OMNet++ simulation platform, in order to prove the superiority of real-time characteristic.

Keywords Multi-zones, Multi-objective, Real-time geolocation system, Channel utilization

1 引言

无线实时定位系统(Real-Time Location System, RTLS)是一种通过获取监测区域内目标节点的信息、基于定位结果提供相关服务的短距离无线通信系统,是无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)最有前景的应用之一^[1,2]。其能够同时提供定位目标的身份信息和准确位置信息,利用数据挖掘、模式识别等技术实现实时事件发现^[3],在井下作业、监狱管理、火场救灾等诸多由于环境因素限制而不可能采取人工方式实时获取目标位置信息的场景下有着极其重要的应用。它不但具有成本低、精度高、数据详实等优点,而且操作方便、使用简单,已经开始被广泛应用^[4]。

在实际应用中,定位目标往往不只一个,即为多目标。多目标定位过程可分为目标侦测与节点任务分配、网络数据整合、目标状态预测 3 个主要环节,而在目标侦测与节点任务分配过程中,对多基站、多目标的定位网络采用何种组网和划分信道方法,将直接影响定位系统的效率和定位精度。

在现有的实时定位系统中,多采用 TDMA(Time Division

Multiple Access,时分多址)协议,即把时间分割成周期性的帧,帧内再分为若干时隙分配给区域内的定位目标节点,定位目标节点在自己分配到的时隙内分别同各个基站节点测距定位,将测距信息上传到定位服务器完成后续的定位服务。TDMA 协议的特点是实现简单,各目标节点在各自时隙内工作,节点间的工作冲突少,适合应用于目标节点数目较少、定位区域较小的场景。但是,TDMA 协议主要存在下面两个缺点:1)当定位系统中的节点数量不断增大时,定位数据的更新周期会变得很长,使定位系统的实时性变差;2)普通 TDMA 协议固定为每个节点分配时隙,当有的节点出现工作不正常或者由于其他原因退出系统时,不能改变原有的时隙分配,而在这个时隙中没有做任何工作,造成了时隙的浪费。另外,普通 TDMA 协议无法实现新节点动态加入网络,如果有新的节点加入网络,必须要重新设定时隙个数,进行时隙分配,这给网络管理和维护带来不便。

然而,实时性是无线实时定位系统最基本也是最重要的性能指标,在消防员定位、野外作业人员定位^[5]等应急场景下更是显得尤为重要。对于多目标实时定位系统,有效地处理

到稿日期:2013-09-03 返修日期:2013-12-27 本文受国家 863 计划(2011AA040101),国家自然科学基金(61003251,61173150,61172049),教育部博士点基金(20100006110015),北京市科委(Z111100054011078),北京市教委科研基地共建项目资助。

何杰(1983—),男,博士,主要研究方向为无线传感器网络、室内定位系统、体域网,E-mail:hejie1983@gmail.com(通信作者);徐诚(1988—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、室内定位技术;刘飞(1986—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、室内定位技术;吕默威(1986—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、室内定位技术;王沁(1961—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为微体系结构与集成电路、无线传感器网络、嵌入式计算与系统。

节点的动态接入也是需要解决的重要问题之一。如何同时有效地解决实时性和节点的动态接入两个问题,是评价多目标实时定位系统性能的关键。同时,对于较大的定位场景,各基站间通信半径往往不会重叠,可以做到射频半径互不干扰,如果可以并行工作,将极大地缩短定位周期,提高信道的利用率。而以上这些都是普通 TDMA 等协议所不能胜任的,极大地制约了定位系统的整体性能。

针对上述问题,本文提出了一种多区域多目标的 TOA 实时定位系统信道分配协议(ZTDMA),该协议将系统覆盖区域划分为若干可以并行工作的子区域,解决了诸如 TDMA 协议中定位周期随节点数量增长过快使系统实时性变差、节点时隙分配后回收不及时造成信道资源浪费等问题,能够保证目标定位精度,提高多目标定位系统的总体性能。

本文第 2 节概要介绍了 TOA 实时定位系统及其工作流程,是本协议搭建的背景和基础;第 3 节分析了 TDMA 协议的工作流程及其存在的主要缺陷,并在此基础上提出了 ZTDMA 协议,从网络拓扑和时隙分配两个方面给出了具体实现;在第 4 节中对 ZTDMA 协议进行了仿真并讨论分析其优越性;最后为本文的结论。

2 TOA 实时定位系统

TOA(Time of Arrival)是一种通过测量无线信号的传输时间来估计距离长度的方法。其实现原理如下:如图 1 所示,Node A 和 Node B 为进行 TOA 测距的两个节点。 T_1 为 Node A 向 Node B 发送 Ranging Data 的时刻; T_2 为 Node B 收到 Ranging Data 的时刻; T_3 为 Node B 向 Node A 发送 ACK 的时刻; T_4 为 Node A 收到 ACK 的时刻。Node A 和 Node B 通过本地时钟分别测量 t_{round} 和 t_{reply} 的时间长度,计算出信号在两个设备之间的传输时间 t_p 。设备之间的距离计算公式如下:

$$\hat{d} = t_p \times C = \frac{t_{round} - t_{reply}}{2} \times C = \frac{(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)}{2} \times C \quad (1)$$

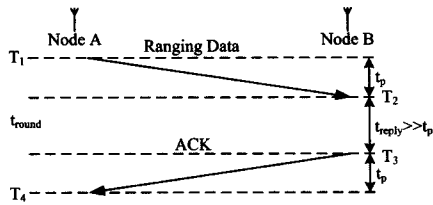


图 1 异步 TOA 原理

TOA 室内定位系统的一般结构如图 2 所示,包括位置固定且位置已知的参考节点、绑定在定位目标上的目标节点、运行定位算法与定位服务软件的服务器。

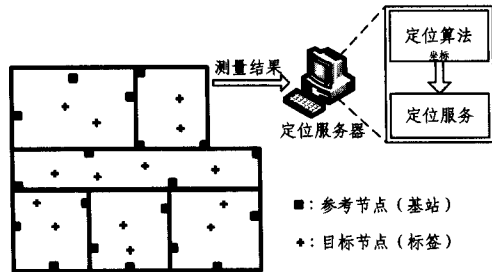


图 2 TOA 室内定位系统架构

无线室内定位系统的工作流程如图 3 所示,目标节点与若干个参考节点进行无线信号传输并测量传输过程中的信号传输时间,将测量结果通过参考节点上传到定位服务器;服务器运行定位算法,根据参考节点的坐标、测得特征参数以及特征参数与距离之间的关系计算目标节点的坐标;定位服务软件根据目标节点的身份信息和定位结果进行位置显示、位置存储和事件挖掘等操作,提供基于位置的服务。

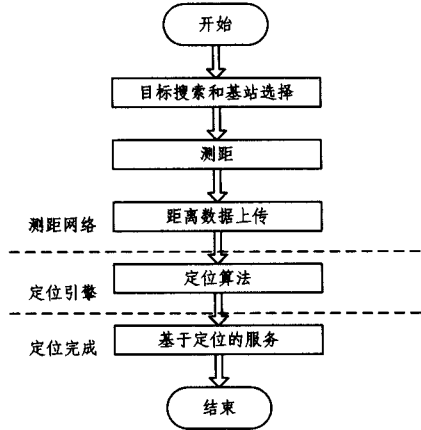


图 3 TOA 室内定位系统工作流程

本文提出的 ZTDMA 协议主要针对图 3 中的测距网络层,在目标搜索和基站选择环节进行了优化,从基础上管理测距网络的组网方式和时隙分配策略,使尽可能多的节点并行工作,缩短定位周期,提高信道的利用率和定位的实时性。

3 ZTDMA 协议设计

本文在普通 TDMA 协议的基础上,改进了空分时分多址协议(Space-time Division Multiple Access, STDMA)^[6]的时隙分配方法,提出了一种适用于无线实时定位系统的新型信道分配协议——ZTDMA(Zones-Time Division Multiple Access,多区域时分多址),有效地解决了 TDMA 协议出现的问题,同时提高了信道利用率。

ZTDMA 协议主体思想就是将一个大的定位区域分割为若干个小的定位子区域,将每个定位子区域划分为若干并行工作组,其中的一些区域之间可以做到射频信号互不干扰,这样就可以并行完成定位工作,缩短定位周期。

3.1 ZTDMA 的网络拓扑构建

(1) 固定节点的位置

在我们的定位系统中,有两大类无线传感器节点:固定的基站节点和可移动的定位目标节点,其中基站节点的摆放位置直接关系到 ZTDMA 协议的性能。这里基站节点包括 Manager 节点、子区域管理节点和定位基站节点。

Manager 节点负责整个大的定位区域的时隙分配工作,它和每个子区域内的管理节点是用有线进行连接的,所以不用考虑它所放置的位置。

子区域管理节点和定位基站节点都是利用无线信号进行通讯的,我们认为无线节点的覆盖范围为一个以节点为中心的圆形,圆的半径为此节点的最大通讯距离。所以对于子区域管理节点来说,要做到能够覆盖整个子定位区域,须将它放在子定位区域的正中,使它的最大通讯距离为子定位区域对角线的二分之一,这样它就能覆盖到整个小定位区域。固定基站位置如图 4 所示,子区域管理节点的位置如图 4(a)所示。

确定定位基站节点的摆放位置是 ZTDMA 协议设计中的一个关键问题,它直接影响到区域之间如何并行工作。这一过程要考虑 3 个问题:1)要能够覆盖到自己所在的整个小定位区域;2)要尽量少干扰其他区域;3)尽可能地远离子定位区域中心点,否则会影响定位精度。鉴于上面的 3 个问题,由计算可知,若小定位区域是边长为 L 的正方形,定位基站节点的覆盖范围的半径大约为 $1.2L$,则其应该放置在距离子定位区域边缘大约 $0.2L$ 的位置。

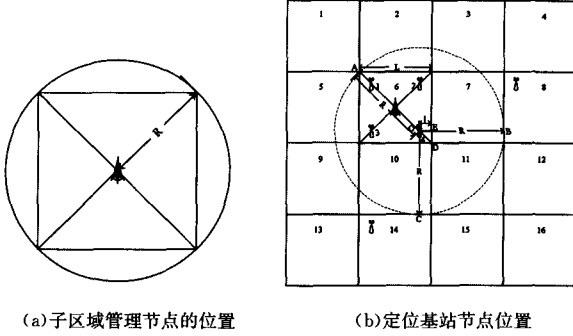


图 4 固定基站位置

(2) 并行区域的划分

通过上一节的分析可知,一个定位子区域中的无线信号会影响到它周围的定位子区域,所以将定位子区域按如下方式划分成 4 个并行工作组。如图 5 所示,我们用 Z_{ij} 表示第 i 个定位子区域内的第 j 个定位小区域,各定位子定位区域内具有相同标号的小区域构成一个并行工作组,它们可以同时进行定位工作(如图 5(a)中网状子区域即为一个并行工作组)。

在每个定位周期中,先由标号为 1 的所有子定位区域 Z_{i1} 开始进行定位工作,等标号为 1 的所有子定位区域中的定位目标节点全部完成定位工作之后,2 号 Z_{i2} 、3 号 Z_{i3} 和 4 号 Z_{i4} 区域中的定位目标节点再依次进行定位。

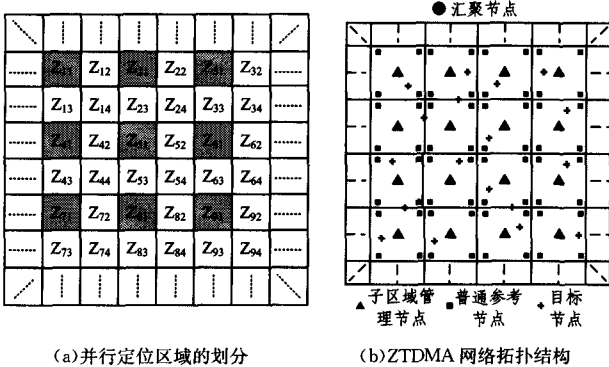


图 5 拓扑结构示意图

综上所述,网络拓扑结构定义如下(如图 5(b)所示):每个子区域至少部署 4 个定位参考节点,其中 1 个参考节点将被确定为该区域的管理节点。在全网络中心有一个汇聚节点,所有管理节点通过 900MHz Mesh 网络和汇聚节点通信。

3.2 ZTDMA 的时隙分配机制

我们用 Z_{ij} 表示第 i 个定位子区域内的第 j 个定位小区域, $G_i = \{Z_{i1}, Z_{i2}, \dots, Z_{ik_i}\}$ 表示各并行定位区域的集合(即一个并行工作组), G_i 内的各个子区域 Z_{ij} 之间互不干扰,可以在同一时刻进行数据传输,因此并行区域中所有子区域共享一个时隙。

ZTDMA 时隙分配方法如图 6 所示, T_{ZTDMA} 为协议的一个刷新周期。其中, t_c 时隙为控制时隙,主要完成以下工作:

- 1)在每个控制时隙的开始,由汇聚节点向每个定位子区域中的管理节点发送全网的同步信息;
- 2)每个定位子区域中的管理参考节点收到由汇聚节点发出的同步信息后,发起广播搜索各自区域内定位目标节点;
- 3)定位目标节点在收到由所在定位子区域的管理节点发出的寻找定位目标节点的广播后,以 CSMA/CA 的方式回复确认信息,在确认信息中包含了自己的 ID 号;
- 4)各个子区域中的管理节点不断接收由子区域中的定位目标节点发送来的确认信息,过 T_{Ack} 时间后,停止接收,并将自己区域中定位目标节点数量信息发送到汇聚节点;
- 5)汇聚节点在收到每个定位子区域中定位目标节点数量信息之后,计算各并行区域集合时隙分配表,将时隙分配表发送给每个定位子区域中的管理节点;
- 6)各个定位子区域内的管理节点在收到由汇聚节点发送的时隙分配表后,根据本区域内的目标节点的节点号,计算本区域目标节点定位时隙表并广播给区域内的所有目标节点。

在控制时隙 t_c 结束后,继续完成步骤 7):

- 7)定位区域内的所有目标节点在被分配的时隙内完成目标节点定位过程。

以上步骤 1)~7)共同构成了整个刷新周期 T_{ZTDMA} ,完成目标节点的定位过程。

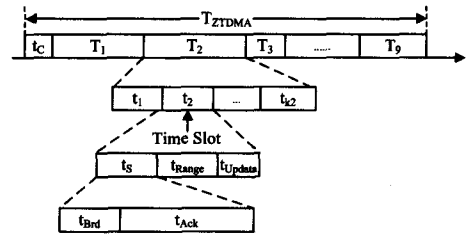


图 6 ZTDMA 信道时隙分配方法

图 6 中, T_i 为分配给 G_i 的定位时间,包括 k_i 个定位时隙, k_i 为 G_i 中子区域节点数的最大值,即

$$k_i = \max\{N_{i1}, N_{i2}, \dots, N_{i9}\} \quad (2)$$

ZTDMA 协议定位周期与目标节点数量之间的关系如下:

$$T_{ZTDMA} = t_c + (k_1 + k_2 + \dots + k_m) \times t_{Location} \quad (4)$$

其中, $k_1 + k_2 + \dots + k_m \leq m \times k$, $k = \max\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, 因此 $T_{ZTDMA} \leq T_{STDMA}$ 。

4 仿真与分析

本文通过 OMNet++ 仿真评估了 ZTDMA 协议在典型应用场景中各种目标节点数量下的平均定位周期。并通过 ZTDMA 协议与传统 TDMA 协议之间的性能对比,验证了 ZTDMA 协议在基于 TOA 的室内定位系统应用中的实时性优势。

4.1 仿真场景

仿真场景空间帧划分如图 7 所示,空间帧长度为 4。ZTDMA 协议的影响因素主要包括目标节点数量和子区域数量,本文通过仿真分别评估了这两个因素对系统平均定位周期的影响。仿真试验中定位系统模型参数来源于 StarLOC 定位系统^[7],单节点定位时长为 40ms,数据率为 1Mbps。

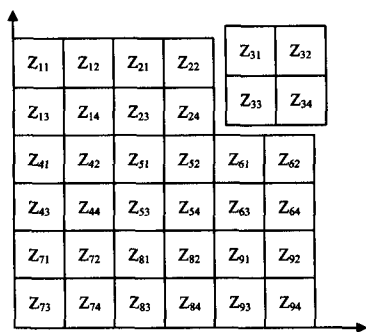


图7 空间帧长度为4的并行区域划分

4.2 结果分析

4.2.1 影响定位周期的因素

验证定位目标节点的分布状况对 ZTDMA 协议的定位周期的影响,假定仿真条件为:16个定位子区域,100个定位目标节点。

本文借鉴文献[8]中非测距定位算法中分散度的概念,在测距定位中,定义分散度 S_D (Scatteredness Degree) 为所有位置未知的目标节点与基站节点质心间的距离均方值的倒数,即:

$$S_D = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|x_i - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m a_k\|^2} \quad (3)$$

由图8可见,定位区域中的定位目标节点分布越分散,完成一轮定位工作所需要的时间就越短;反之,定位目标节点分布越集中,完成一轮定位工作所需要的时间就越长。

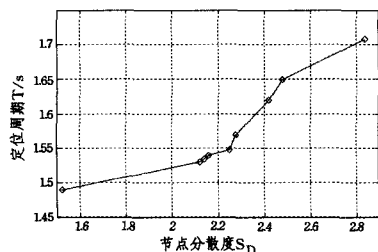


图8 节点分散度 S_D 与定位周期关系图

4.2.2 影响平均定位周期的因素

为了验证定位子区域的划分情况对 ZTDMA 协议的平均定位周期的影响,假定仿真条件为:固定定位区域的大小为长1200、宽1200,定位目标节点个数为100个,分别将其分成4个、9个、16个、25个、36个定位子区域进行4组实验,每组实验仿真10个周期来统计平均定位周期的值。定位子区域个数与平均定位周期关系如图9所示。

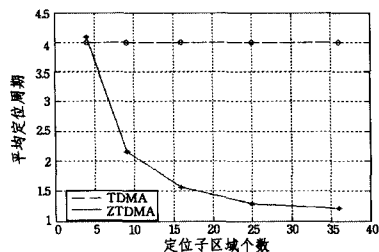


图9 定位子区域个数与平均定位周期关系图

4.2.3 与 TDMA 协议的性能比较

根据第3节对 ZTDMA 协议的性能分析可知,普通 TDMA 协议的定位周期时间与定位目标节点数量呈线性增长关系,而 ZTDMA 协议的定位周期与定位目标节点数量的关系

需要通过仿真实验得出。假设仿真条件为:定位区域长1200、宽1200,16个定位子区域,分别在定位目标节点数量(TagNum)为20个、40个、60个、80个、100个、150个、200个、250个、300个、400个时进行仿真,每组参数运行10个定位周期,然后计算平均定位周期。

修改定位参数,进行仿真实验,根据数据得出曲线,如图10所示。

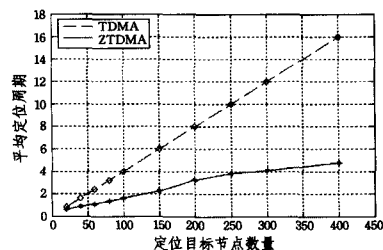


图10 节点数量与平均定位周期关系图

可以看出,ZTDMA 协议的定位周期明显小于普通 TDMA 协议。目标节点数量越大,ZTDMA 协议相对于普通 TDMA 协议的性能提升越明显。

结束语 本文有针对性地设计出适用于无线实时定位系统的 ZTDMA 协议,该协议将定位区域划分为若干个子区域集合,使同一集合内的子区域互不干扰、并行工作,从而实现信道复用,有效缩短了目标节点平均定位周期,提高了系统实时性。它具有以下特点:

- 1) 适用于拓扑结构不断变化的网络;
- 2) 有效地缩短了定位周期,提高了定位目标节点定位信息的更新速度,保证了定位系统的实时性;
- 3) 适用于动态网络,能够识别定位目标节点的加入和退出,动态为其分配时隙。

参考文献

- [1] 王沁,何杰,张前雄,等. 测距误差分级的室内 TOA 定位算法[J]. 仪器仪表学报,2011,32(12):2851-2856
- [2] He Jie, Li Shen, Pahlavan K, et al. A real-time testbed for performance evaluation of indoor TOA location system[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa, Canada, 2012; 10-15
- [3] 于彦伟,王沁,邝俊,等. 一种基于密度的空间数据流在线聚类算法[J]. 自动化学报,2012,38(6):1051-1059
- [4] He Jie, Yu Yan-wei, Wang Qin. RSS Assisted TOA-based Indoor Geolocation[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2013, 20(2): 157-165
- [5] Pahlavan K, Levesque A. Wireless Information Networks (2nd ed)[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005
- [6] Amouris K G. Space-Time Division Multiple Access (STDMA) and coordinated, power-aware MACA for mobile ad hoc networks[C]//IEEE Symposium on ad hoc networks (SAWN 2001). Texas, 2001
- [7] 何杰,王沁,余美强,等. StarLOC:基于 TWR 的众目标实时定位系统[C]//CWSN'2009 第三届中国传感器网络学术会议. 2009; 314-317, 333
- [8] Shi Qing-jiang, He Chen. A SDP Approach for Range-free Localization in Wireless Sensor Networks[A]//IEEE Technology Management Council, IEEE Communications Society. Proceedings of the Symposium on Wireless Communication and Systems of ICC 2008[C]. IEEE Technology Management Council, IEEE Communications Society, 2008; 5