



研究与开发

DS-TWR 算法室内定位批量测距系统的优化研究

孙宏伟, 曹雪虹, 焦良葆, 孟琳, 刘子恒, 袁枫

(南京工程学院人工智能产业技术研究院, 江苏 南京 211167)

摘要: 针对现阶段基于双边双向测距 (double sided two-way ranging, DS-TWR) 算法的超宽带 (ultra wide band, UWB) 室内定位系统存在通信次数较多、多标签环境下冲突率较高的问题, 提出了一种改进的算法。该方法通过 Hash 算法对标签和基站的通信内容进行哈希分布, 使得基站在每次测距流程中, 能够对多个标签进行有规则的统一回复, 大大减少了基站发送 RES (responds) 数据的次数。结果表明, 改进算法后, 单个标签和基站的通信次数较传统 DS-TWR 算法减少了 15%, 增加了基站接收状态在测距中的时间占比, 由此降低了基站在接收 RNG (range) 数据包的冲突率, 测距成功率提高了 43.6%。由于每个定位周期内所需要通信次数的减少且数据包之间冲突率的降低, 将需要更小的信道容量, 由此增加了定位系统的标签容纳量, 具有较强的工程意义。

关键词: 超宽带定位; 室内定位; 哈希算法; 双边双向测距

中图分类号: TN925

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022018

Research on optimization of indoor positioning batch ranging system based on DS-TWR algorithm

SUN Hongwei, CAO Xuehong, JIAO Liangbao, MENG Lin, LIU Ziheng, YUAN Feng

Institute of Artificial Intelligence Industry Technology, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China

Abstract: Aiming at the current problems of the ultra wide band (UWB) indoor positioning system based on the double sided two-way ranging (DS-TWR) algorithm, there are more communication times and a higher conflict rate in a multi-tag environment, an improved algorithm was proposed. The Hash algorithm to hash and distribute the communication content between the tag and the anchor was used, so that the anchor could reply to multiple tags in a regular and unified manner during each ranging process, which greatly reduced the number of times the anchor sends RES (responds) data. Experimental results show that the improved algorithms' communication times between a tag and the anchor were reduced by 15% compared with the traditional DS-TWR algorithm, which increases the time proportion of the anchor receiving state in ranging, thereby reducing the anchor receiving RNG (range) data. The collision rate of packets, the success rate of ranging has increased by 43.6%. Due to the reduction in the number of communications required in each positioning cycle and the reduction in the collision rate between data packets, a smaller channel capacity would be required, thereby increasing the label capacity of the positioning system, which has strong engineering significance.

Key words: UWB, indoor positioning, hash algorithm, DS-TWR

收稿日期: 2021-09-17; 修回日期: 2022-01-10

通信作者: 孙宏伟, sun.h.w@foxmail.com

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No.61903183)

Foundation Item: The National Nature Science Foundation Youth Fund of China (No.61903183)



0 引言

随着 5G 通信技术和新能源汽车的发展,电力需求量日益增加。在电力系统前端,尤其是在具有安全风险的矿井、发电厂和变电站等环境中,电能大量产出的同时也伴随着风险的提高^[1-2]。高速准确的定位系统能够给作业人员提供更大程度的安全保护^[3]。现阶段,国内外的室内定位技术主要有全球定位系统(global positioning system, GPS)、无线局域网(wireless local area network, WLAN)、超宽带(ultra wideband, UWB)等^[4]。GPS 在理想情况下精度能够达到 3 m,单纯的 GPS 无法满足工业生产需要的高精度定位需求^[5]。现阶段 WLAN 定位被广泛应用于商场等公共场合,但常见的 WLAN 定位系统传输距离短,可传输数据量小,不适用于工业生产^[6]。UWB 在复杂的工业环境下有相当显著的优点^[7]:定位精度高、具有较强的穿透性、抗干扰能力强、功耗低^[8]。基于综合考量,本文选用 UWB 进行室内定位。

目前,接收信号强度(received signal strength, RSS)、到达角度测距(angle of arrival, AOA)、信号到达时间(time of arrival, TOA)、信号到达时间差(time difference of arrival, TDOA)、DS-TWR(double sided two-way ranging)等测距算法比较常见^[9],其中 TOA 和 TDOA 算法应用较为广泛^[10]。TDOA 算法能够实现标签与基站仅需一次通信即可完成测距,但需要所有基站的时钟完全同步,工程实现比较困难^[11]。TOA 算法利用测距信号在标签和基站之间的飞行时间计算距离,在 TOA 算法基础上衍生出的 DS-TWR 算法,通过标签和基站的多次通信实现了无须时钟同步的测距算法^[12]。顾慧东等^[13]基于 DS-TWR 算法设计实现了基站对标签的准确定位,定位精度为 15~30 cm。该算法能够消除时钟同步引入的误差,但在每个测距周期中需要基站和标签多次通信,这在一定程度上增加了通信冲突概率并引起

测距失败,降低了整个系统的标签容纳量。袁枫等^[14]提出了一种按时序分配标签等待时间的方法,在通信冲突问题上有较好的效果,在对 60 个标签进行定位的测试中,实现了通信冲突率降低 13%,提高了多标签下的通信成功率。但是此方案维持了传统的 DS-TWR 的通信流程,无法减少测距过程中的通信次数,而冲突的发生是因为多标签情况下通信次数的增加。

本文对通信流程做出如下改进:基站对标签的应答不再是及时回复,而是经过一段时间后对所有标签进行广播回复,各标签根据 Hash 算法从特定位置读取基站的回复信息,最终利用 DS-TWR 算法解析数据包、计算位置信息。改进后的流程大幅减少了信道中的信息量,降低数据冲突概率,提高整个系统在准确定位前提下能够容纳的标签数量(标签容纳量)。

1 传统 DS-TWR 测距原理

DS-TWR 算法是对双向测距(two-way ranging, TWR)优化而来^[15],TWR 不基于双边时间同步,实现简单,但该算法受设备晶振偏移影响^[16],TWR 测距流程如图 1 所示,误差函数如式(1)所示。

$$\text{error} = \frac{1}{2}(\lambda_A - \lambda_B) \times \Delta t_T \quad (1)$$

其中, λ_A 、 λ_B 分别为节点 A 和 B 的晶振偏移(单位:ppm)。从误差函数不难发现,节点 B 在收到消息后至发出消息的时间差会对系统引入误差^[17]。

DS-TWR 由此问题出发,着重于减少设备晶振对测距误差的影响^[18]。DS-TWR 相比 TWR 测距算法,在每个测距周期内增加了一轮标签和基站的通信流程,由此获得了额外两个时间节点,实现了一次测距流程获得两次距离结果^[19]。DS-TWR 测距流程如图 2 所示,信号飞行时间如式(2)所示,误差函数如式(3)所示。

$$T = \frac{1}{4}[(T_{\text{round1}} - T_{\text{reply1}}) - (T_{\text{round2}} - T_{\text{reply2}})] \quad (2)$$

$$\text{error} = \frac{1}{4}(\lambda_A - \lambda_B) \times (T_{\text{reply1}} - T_{\text{reply2}}) \quad (3)$$

对比式 (1) 和式 (3), DS-TWR 算法的误差函数中, 影响因素是节点 A、B 回复时间间隔的差值, 在相同配置环境下, DS-TWR 算法可以更容易控制并减小误差^[20]。

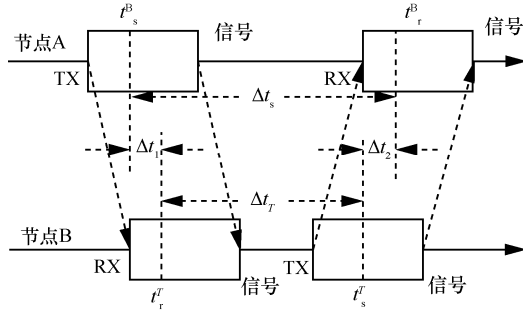


图1 TWR 测距流程

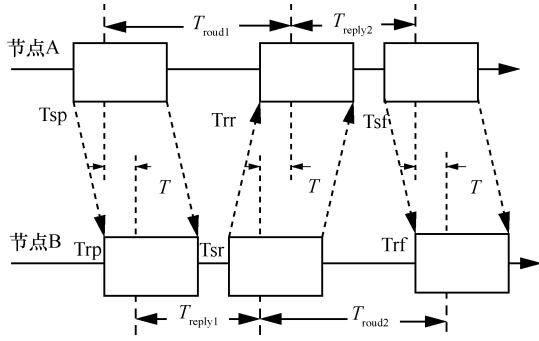


图2 DS-TWR 测距流程

在仿真实验中, TWR 通信中 $\Delta t_T = 0.0001$ s, DS-TWR 通信中 $T_{\text{reply1}} = 0.0001$ s, $T_{\text{reply2}} = 0.000011$ s。对以上两种通信误差建立数学模型, 得出在不同晶振偏移环境下的误差。

误差分析如图 3 所示, 由于晶振偏移引入的测距误差限制了 TWR 测距精度; 而 DS-TWR 测距算法可以人为地减小晶振偏移对最终测距结果的影响, 使测距误差可以满足设计要求。

2 改进方案的实现

2.1 通信方法的改进

在通信过程中, 理想的数字信道的信道容量

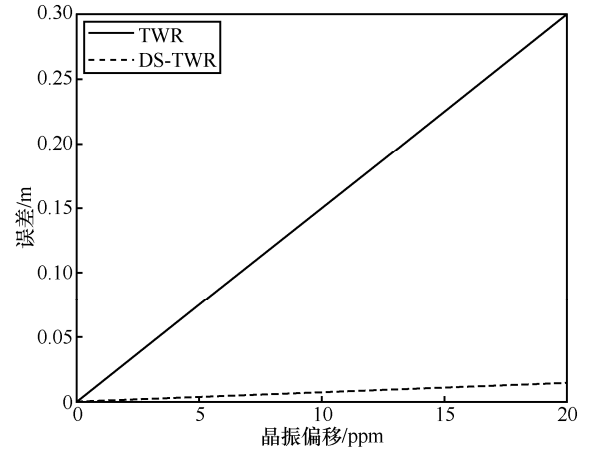


图3 误差分析

满足奈奎斯特准则:

$$C = 2B \log M \quad (4)$$

其中, C 为信道容量, B 为带宽, M 为信号编码级数。

在特定的带宽和信号编码级数下, 信道容量为恒定值。而传统的 DS-TWR 测距算法依靠通信次数的增加减少测距误差, 单次测距通信次数的增加会需要系统提供更多的信道容量, 从而减少了系统的标签容纳量^[21]。对此, 本文提出了一种新的通信流程, 改进后的通信流程如图 4 所示, RNG、RES、FIN 分别为 3 次通信数据包的名称。每次测距通信流程, 标签发起测距, 基站接收消息后不做立即回复, 在一定时间 Δt 后, 对已经接收的标签信息做统一回复。

改进后的测距流程具体有以下 5 个步骤。

步骤 1 标签 1 向基站发送 RNG_1 数据包, 并记录发送数据包的时间戳 $T_{\text{RNG1_tx}}$ 。

步骤 2 基站接收到 RNG_1 时, 记录接收时刻的时间戳 $T_{\text{RNG1_rx}}$, 打开测距周期定时器 Δt , 在此期间基站保持接收状态, 接收其他标签发送的 RNG_n 数据包, 并依次记录 $T_{\text{RNG}_n\text{_rx}}$, 计算标签等待时间 Δt_n 。

步骤 3 Δt 计时结束, 基站转入发送状态, 组装发送 RES 数据包, 包含步骤 (1) 和步骤 (2) 中所有标签的 RES 数据包, 并记录发送时间戳 $T_{\text{RES_tx}}$ 。

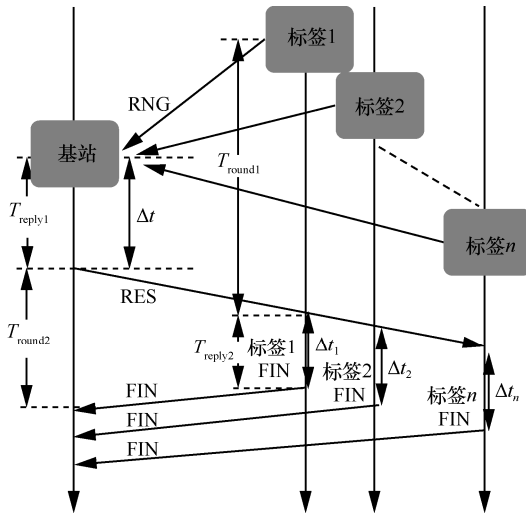


图4 改进后的通信流程

步骤4 标签收到 RES 数据包, 记录接收时间戳 T_{RES_rx} , 按照算法解析特定位置数据信息, 获得等待时间 Δt_n 。将步骤(1)和步骤(2)获得的 $T_{RNG_n_tx}$ 、 T_{RES_rx} 和 $T_{FIN_n_tx}$ (FIN 包发送时间戳) 时间戳组装到 FIN 数据包中, 等待时间结束后发送 FIN_n 数据包。

步骤5 基站接收到 FIN_n 数据包后, 记录接收时间戳 $T_{FIN_n_rx}$, 解析 FIN_n 数据包获取各个时间戳引入 DS-TWR 算法计算距离信息。

对于标签 1, 记消息单次飞行时间为 T_{prop} 。由图 4 可得以下计算式:

$$T_{round1} = T_{reply1} + 2T_{prop} \quad (5)$$

$$T_{round2} = T_{reply2} + 2T_{prop} \quad (6)$$

$$T_{reply1} = T_{reply2} = \Delta t_1 \quad (7)$$

由式(4)~式(6)可得:

$$T_{prop} = \frac{T_{round1} \times T_{round2} - (\Delta t_n)^2}{T_{round1} + T_{round2} - 2\Delta t_1} \quad (8)$$

其他标签的距离计算和标签 1 同理。改进后的通信方案减少了基站发送信息的次数, 在多个测距周期内, 基站处于发送状态的时间大幅减少, 增加了基站处于接收状态的时间占比, 缓解了基站因繁忙而无法收到标签发起测距请求的问题。此外, 改进后的通信流程有效地减少了信道内的

数据量, 增加了整套系统的容纳量。DS-TWR 算法由晶振偏移产生的误差受 T_{reply1} 和 T_{reply2} 影响^[22], 而在改进后的通信流程中, 强迫基站和标签的信息回复时延 T_{reply} 时间都为 Δt_n , 所以此通信方式并不会引入更大误差。

2.2 Hash 分配数据包位置

改进后的测距流程的步骤(3)中, 基站需要在 RES 数据包中加入多个标签的回复信息, 为了使标签能够读取到正确数据, 需要对 RES 数据包引入特定的构建规则。本文采用 Hash 算法对数据包位置进行哈希分布。

哈希流程如下: 基站接收 RNG 数据时, 解析出 RNG 发送方 MAC 编号作为 key 进行 Hash 运算获得 Hash 值, 计算得出的 Hash 值与标签数据位置对应。同时考虑到 Hash 冲突问题, 即不同标签计算后的 Hash 值相同, 则通过再 Hash 算法, 利用 MAC 编号和第一次 Hash 计算后的地址再次进行 Hash 运算, 获得新的 Hash 值。

本文 Hash 计算采用素数求余法, 单次通信最大限制为 1 023 byte, 每个标签需要的 RES 回复数据为 12 byte, 即单次回复标签数量限制为 85 个, 所以本文采用最大素数 $m=83$, RES 数据包数据位置如图 5 所示, 计算式如式(9)所示。

$$HASH^1 = key \% m \quad (9)$$

其中, $HASH^1$ 为第一次计算后的 Hash 值, % 为取余符号。

若出现 Hash 冲突, 则利用式(9)进行再 Hash:

$$HASH^2 = (key + HASH^1) \% m \quad (10)$$

至此可以实现在 0~82 按相同概率分配数据包位置。

利用 Hash 分布数据帧存放位置可以最大化利用数据包。相比较顺序堆放数据帧, 接收方在解析数据时需要遍历数据包, 极其浪费资源, 尤其对标签需要计量功耗的设备。利用 Hash 算法, 可以减少标签解析数据包所消耗的资源, 即使出

现 Hash 冲突, 解析的次数也远小于遍历数据包的次数。该算法的引入可以在提升系统容纳量的同时降低功耗。

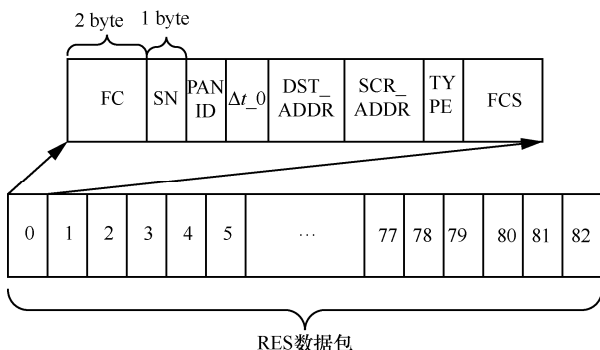


图5 RES数据包数据位置

图5中, FC和SN作为数据包头部, PANID为通信信道, Δt_0 为延迟时间, DST_ADDR为目的设备编号, SCR_ADDR为发送设备编号, TYPE为数据包类型, FCS为效验码。

3 实验结果

3.1 实验环境

在硬件设计上, 使用STM32高性能微处理器作为主控制器件, 配合DecaWave公司设计生产的DWM1000射频收发芯片实现UWB信号的收发。考虑到基站需要进行通信、距离计算以及数据上报, 且基站无须功耗控制, 所以使用性能较强的STM32F407ZET6处理器, 基站实物如图6所示; 标签则采用体积小、功耗低的STM32F105RCT6处理器, 标签实物如图7所示。



图6 基站实物



图7 标签实物

在软件设计上, 此套定位系统分为上位机和下位机两大部分。上位机为Linux系统的台式计算机, 通过用户数据报协议(user datagram protocol, UDP)和基站保持定时通信, 负责接收基站上报的测距信息并计算各标签的三维空间坐标, 实现室内精确定位。下位机由基站和标签构成, 其软件开发通过Keil uVision5实现, 软件设计流程如图8所示。

流程图中IAP (in-application-programming, IAP)为远程升级功能不参与测距。定时器1为测距周期定时器, 基站侧定时器2为接收超时定时器, 定时器3为 Δt 定时器。基站测距前发送的BLK (blink, BLK)数据包是用来提供标签通信注册表信息。为了得出功耗和稳定性数据, 本文采用两个标签和4个基站的最小系统进行测试, 步骤如下。

步骤1 将改进前的代码烧录到两个标签和4个基站中, 让标签电池保持满电状态。将其放在空旷且无遮挡的环境中, 随机选择标签放置点进行测距通信, 直至标签电量耗尽, 测距终止, 导出测距日志数据。

步骤2 将步骤(1)中的标签和基站取下, 分别烧录改进后的通信代码, 给标签电池重新充满电量, 保持基站和标签位置不变进行测距通信直至标签电量再次耗尽, 导出测距日志数据。

在测试中, 保持测试地点、测试设备以及测试位置均未改变, 从而保证了测试环境的一致性, 确保最终数据差异能够显著反映两套系统的性能参数。

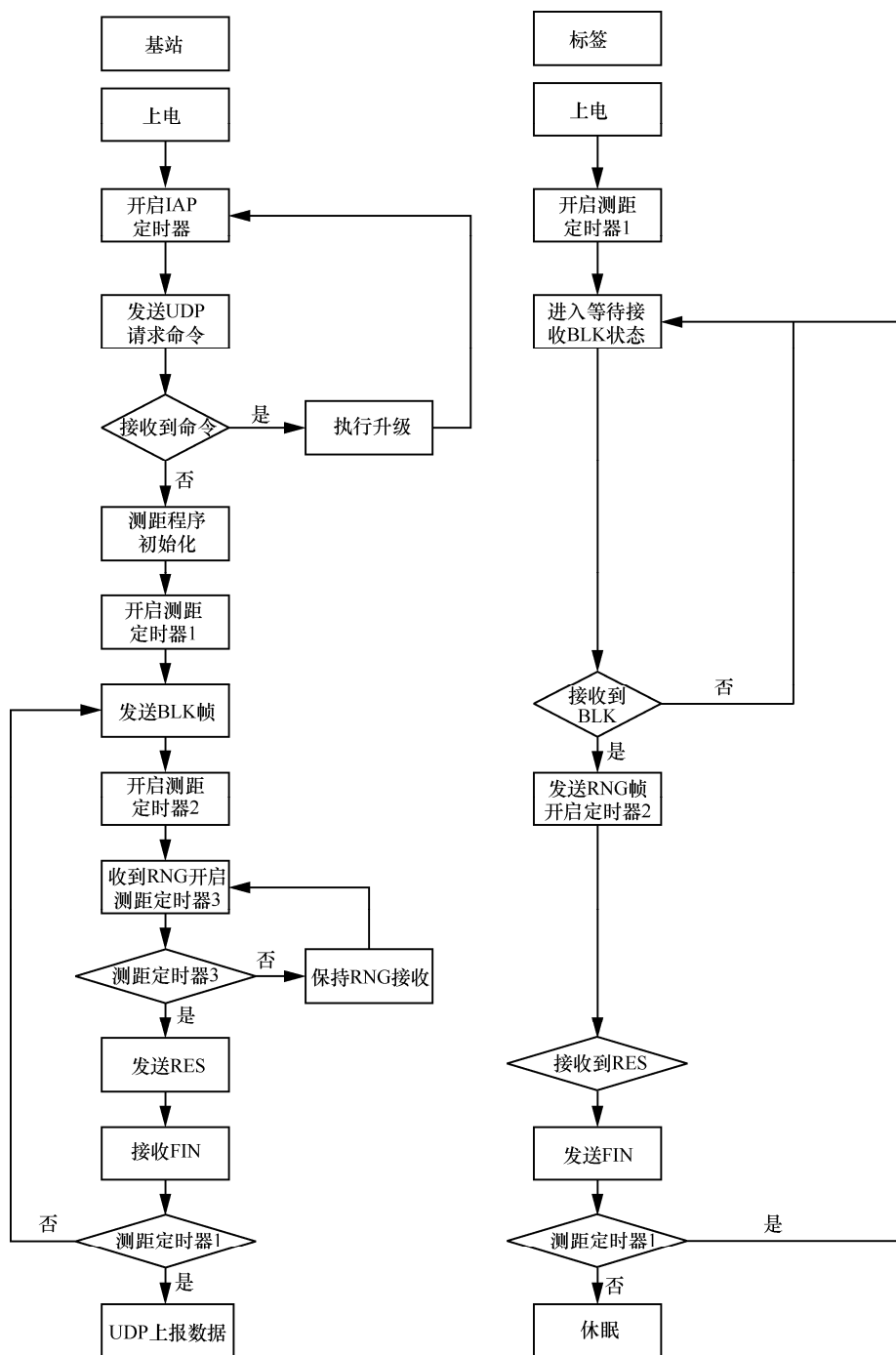


图8 软件设计流程

3.2 测距数据分析

将充满电的标签开启后放置到测试环境中，直至标签电量耗尽。在服务器上读取标签的定位信息日志进行分析，分析结果如图9所示，测距 X 轴数据见表1。

表1 中样本数量为基站和标签之间的通信次

数，通信时长为标签从开始测距到电量耗尽时的运行时长，有效通信时长为标签从开始测距至测距误差出现显著增加时的运行时长。

由图9和表1的数据分析可知，在电池充满的情况下，原方案总通信时长和单位时间的样本量大于改进后的方案，这是由于DWM1000射频

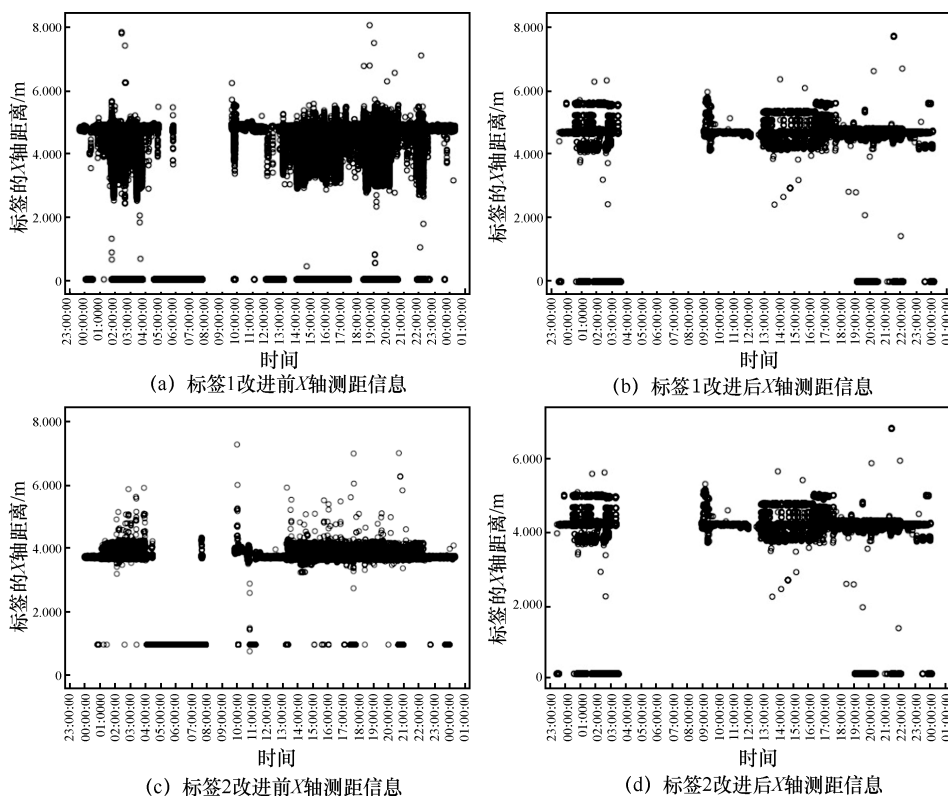


图9 测距数据分析

表1 测距 X 轴数据

标签 ID	系统状态	样本数量/个	通信时长/h	有效通信时长/h	距离均值/m	距离标准差
1	改进前	791 711	20	19	4.476 06	2.282 39
1	改进后	668 276	19	19	4.304 11	2.238 83
2	改进前	785 710	22	18	2.274 93	0.993 38
2	改进后	638 276	18	17	2.209 15	0.960 32

芯片接收功耗相较于发送功耗更大，而改进后的方案标签的接收等待时间会大于原方案。但原始方案中电压下降一定程度后，测距误差明显增大，无法达到定位要求，而改进后的方案在低电压情况下较原方案有很大优势，所以改进后的方案比原方案的有效通信时长并无显著减少。同时在测距误差方面，改进后的方案较原方案也有提升：对标签 1、2，测距标准差由原方案的 2.282 39 和 0.993 38 下降到了 2.238 83 和 0.960 32。样本数量由原方案 791 711 和 785 710 个下降至 668 276 和 638 276 个，分别降低了 15.59% 和 18.76%。从测

试结果分析可知，改进后的系统凭借通信流程的改进，在测距误差未增加的情况下，通信次数显著下降，具备更强的稳定性。

3.3 测距通信冲突分析

在实际测试通信冲突情况时，需要大量标签同时运行，故本文采用 MATLAB 仿真模拟多标签通信。模拟通信规则如下：设定 4 个基站，每个标签和 4 个基站依次通信，如果标签在发起通信的时刻，基站未处于接收状态或基站正在与其他标签通信，则标签等待 1 s 后，继续与下一个基站通信并记录一次通信冲突，以此类推，最终统计



通信成功的标签数量。

改进前通信方法：从 200 个基站中随机选择 4 个基站，从 500 个标签中随机选择 60 个标签进行通信。按照单次通信 2 ms，测距一次 6 ms，定位周期 400 ms 进行仿真。改进前的通信分配情况如图 10 所示，横坐标表示单个标签在定位周期中分配到的时刻，纵坐标表示 60 个标签的通信空隙分配次数。

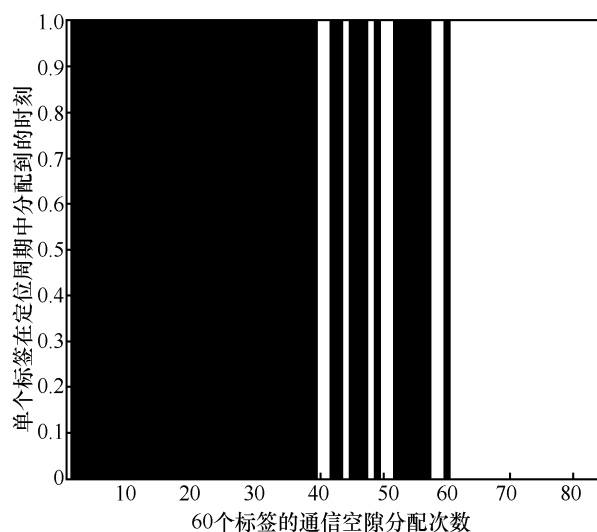


图 10 改进前的通信分配情况

改进后通信方法：从 200 个基站中随机选择 4 个基站，从 500 个标签中随机选择 60 个标签计算次数。按照单次通信 2 ms，测距一次 40 ms，第 2~18 ms 为基站接收时间，定位周期 400 ms。改进后的通信分配情况如图 11 所示，横坐标表示第 2.2 节中计算出的 83 个分配到的时刻，纵坐标表示 60 个标签的 Hash 计算次数。

分析仿真结果，获得改进前系统存在 21 次通信分配冲突，最终实现了 39 个标签的正常通信，冲突率为 35%。袁枫等^[14]论文中的方案实现了通信冲突由 39%下降至 26%。在本文改进后的系统中，最终实现通过 240 次 Hash 计算，56 个标签的正常通信，冲突率下降至 6.7%。结果表明，改进后的通信流程能够缓解通信冲突引发的通信失败问题，测距成功率提高了 43.6%。

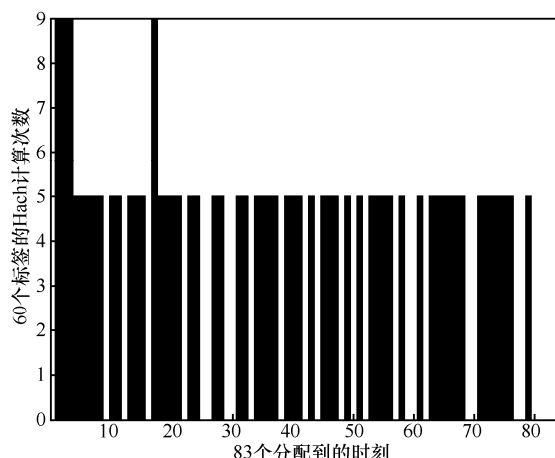


图 11 改进后的通信分配情况

4 结束语

本文提出了一种基于 DS-TWR 算法的改进型通信方案，该方案增加了基站处于接收状态的时长，确保了在标签发送消息时基站能够处于接收模式，有效减少整个系统完成测距所需要的通信次数，而通信次数的降低就可以降低冲突发生。同时引入 Hash 算法，在单次通信流程中对批量测距信息的位置进行离散分配，减少标签解析数据包的时间，降低测距误差的同时提高了测距成功率。该改进方案在人员聚集的环境下，能够实现准确定位，在实际工程应用中有较大意义。

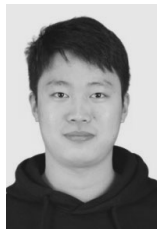
参考文献：

- [1] 万明远. 火力发电厂当前面临的问题及其对策[J]. 电子世界, 2017(11): 61.
WAN M Y. Current problems and countermeasures of thermal power plants[J]. Electronics World, 2017(11): 61.
- [2] 常琳. UWB 技术在精准人员管理系统中的应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(5): 163-165, 169.
CHANG L. Application of UWB technology in accurate personnel positioning system[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(5): 163-165, 169.
- [3] 赵林, 孙增荣, 王纪强, 等. 基于超宽带技术的矿用人员精准定位系统[J]. 山东科学, 2021, 34(2): 48-53.
ZHAO L, SUN Z R, WANG J Q, et al. Precise positioning system for mine personnel based on ultra wide band technology[J]. Shandong Science, 2021, 34(2): 48-53.

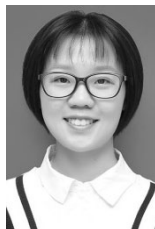
- [4] 陶偲. 基于 UWB 的室内 SDS-TWR 测距算法优化和定位算法融合的研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2016.
TAO (C/S). Research on optimization of SDS-TWR and fusion of location algorithm in indoor position based on UWB[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2016.
- [5] 刘关迪, 赵璐. 基于 UWB 技术的室内智能跟随系统的实现与优化[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(12): 95-100.
LIU G D, ZHAO L. Improvement and implementation of indoor intelligent following system based on UWB technology[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(12): 95-100.
- [6] 叶伟. 煤矿井下目标定位的研究现状与展望[J]. 中国矿业, 2021, 30(1): 82-89, 105.
YE W. Status and prospects of research on positioning of targets in underground coal mines[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(1): 82-89, 105.
- [7] 曾纪钧, 沈桂泉, 张金波. 基于 UWB 定位技术的作业风险管控智能终端设备研究[J]. 电测与仪表, 2021: 1-9.
ZENG J J, SHEN G Q, ZHANG J B. Research on intelligent terminal equipment for operation risk management and control based on UWB positioning technology[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021: 1-9.
- [8] 刘琦, 沈锋, 王锐. 基于 UWB 定位系统硬件平台设计[J]. 电子科技, 2019, 32(10): 22-27.
LIU Q, SHEN F, WANG R. Design of hardware platform for UWB positioning system[J]. Electronic Science and Technology, 2019, 32(10): 22-27.
- [9] 朱冰, 陶晓文, 赵健, 等. 智能汽车两阶段 UWB 定位算法[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 256-266.
ZHU B, TAO X W, ZHAO J, et al. Two-stage UWB positioning algorithm of intelligent vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 256-266.
- [10] ZHANG W, ZHU X Z, ZHAO Z Q, et al. High accuracy positioning system based on multistation UWB time-of-flight measurements[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics. Piscataway: IEEE Press, 2020: 268-270.
- [11] 许佩佩. 基于 TOA 方案的超宽带室内定位技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
XU P P. Research of UWB indoor positioning technology based on TOA scheme[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [12] SANGC L, ADAMSM, HÖRMANN T, et al. Numerical and experimental evaluation of error estimation for two-way ranging methods[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(3): 616.
- [13] 顾慧东, 焦良葆, 周健. 室内 UWB 通信高精度定位系统设计[J]. 软件导刊, 2020, 19(4): 159-163.
GU H D, JIAO L B, ZHOU J. Indoor high-precision positioning system design based on UWB[J]. Software Guide, 2020, 19(4): 159-163.
- [14] 袁枫, 焦良葆, 陈楠, 等. 室内定位中 DS-TWR 测距算法的优化[J]. 计算机与现代化, 2021(10): 100-106.
YUAN F, JIAO L B, CHEN N, et al. Optimization of DS-TWR ranging algorithm in indoor positioning[J]. Computer and Modernization, 2021(10): 100-106.
- [15] 刘永立, 吴闻轩, 单麒麟, 等. 井下人员定位的超宽带 TWR 改进算法[J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(2): 135-139.
LIU Y L, WU W X, SHAN Q Y, et al. Improvement algorithm of ultra wide band TWR for underground personnel positioning[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2021, 31(2): 135-139.
- [16] ZHANGK, SHENC, GAO Q, et al. Research on similarity metric distance algorithm for indoor and outdoor firefighting personnel precision wireless location system based on vague set on UWB[C]//Proceedings of 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1162-1165.
- [17] 严嘉祺. 基于 UWB 的室内定位系统的算法与误差分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
YAN J Q. Algorithm and error analysis of indoor positioning system based on UWB[D]. Harbin Institute of Technology, 2020.
- [18] LIU J H, JING H, XIANG Y X, et al. Simulation Research of UWB location algorithm[C]//Proceedings of 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 4825-4830.
- [19] 朱自强. 超宽带定位的关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
ZHU Z Q. Research on the key technology of ultra-wideband positioning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [20] 范强, 张涵, 隋心. UWB TW-TOA 测距误差分析与削弱[J]. 测绘通报, 2017(9): 19-22, 50.
FAN Q, ZHANG H, SUI X. Error analysis and weakening of UWB TW-TOA ranging[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(9): 19-22, 50.
- [21] 杨庆生, 蔡文郁, 官靖凯, 等. 基于长距离 UWB 的无人水面艇定位技术研究[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2021, 41(3): 30-36.
YANG Q S, CAI W Y, GUAN J K, et al. Long-distance localization system applied to ocean unmanned surface vessel[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2021, 41(3): 30-36.
- [22] ZHANG X J, LIU Y J, LI S D, et al. Simulation and analysis of influence of ranging error on location estimation accuracy[C]//Proceedings of 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-3.



[作者简介]



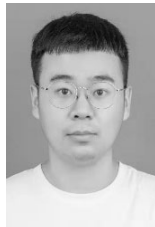
孙宏伟（1997- ），男，南京工程学院人工智能产业技术研究院硕士生，主要研究方向为室内定位。



孟琳（1989- ），女，博士，南京工程学院人工智能产业技术研究院讲师，主要研究方向为控制科学与技术。



曹雪虹（1964- ），女，博士，南京工程学院人工智能产业技术研究院教授，主要研究方向为无线通信系统、信息理论。



刘子恒（1997- ），男，南京工程学院人工智能产业技术研究院硕士生，主要研究方向为室内定位。



焦良葆（1972- ），男，博士，南京工程学院人工智能产业技术研究院教授，主要研究方向为图像信号处理、视觉信息理解。



袁枫（1997- ），男，南京工程学院人工智能产业技术研究院硕士生，主要研究方向为室内定位。