



超宽带测距模块的快速迭代校准方法

田哥宇, 刘 瑜, 邹振超, 黄 鑫
(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 为了高效地校准超宽带收发模块中的天线延时,提升超宽带定位系统的定位精度,提出了一种迭代寻优的校准方法。以三个模块两两之间测距误差平方和作为评价一组天线延时的标准,每次迭代测试少量候选天线延时,筛选出其中较优的部分,产生新的待测天线延时组合,并在多次迭代过程中使较优部分不断向最优天线延时组合逼近。在 15~30 m 的范围内进行对比试验,测试了校准结果测距精度,结果表明:经过 2 h 的迭代校准后,天线延时的误差小于超宽带收发模块厂商所提供计算方法得到的校准结果。该方法实用性强,实施简单,适用于没有标准模块的情况下对多个超宽带收发模块进行校准。

关键词: 超宽带;定位;校准;天线;测距
中图分类号: TN839 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851 (2021) 05-0373-06

Fast iterative calibration method for UWB ranging module

TIAN Geyu, LIU Yu, ZOU Zhenchao, HUANG Xin
(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To calibrate the antenna delay in the UWB-based transceiver module efficiently, and enhance the positioning accuracy of the UWB positioning system, we proposed a calibration method of iterative optimization. The quadratic sum of ranging errors between every two of three modules was used to evaluate a combination of antenna delays. A few candidate antenna delays were tested in each iteration test, and the better ones were selected to generate a new candidate combination of antenna delays. The better ones kept approaching the optimal combination of antenna delays during multiple iterations. The calibrated combination of antenna delay was tested within the range of 15 m to 30 m. The results indicated that after 2 h of iterative calibration, the antenna delay error was less than the calibration result obtained by the calculation method offered by the UWB transceiver module manufacturer. This method is practical and easy to implement, which can be used to calibrate multiple UWB transceiver modules without standard modules.

Key words: UWB; positioning; calibration; antenna; ranging

0 引 言

近年来,基于超宽带测距的定位系统被广泛应用于室内定位^[1-3]。超宽带定位系统由多个收发模块组成,其中位置已知且固定不动的三个收发模块

设置为基站(Anchor),其余收发模块则被设置为待定位的标签(Tag)。

根据不同的工作原理,超宽带定位系统主要有以下几种定位方式:飞行时间法(ToF)、到达角度法(AoA)和到达时间差法(TDoA)^[4-5]。由于飞行时

收稿日期:2021-01-11 网络出版日期:2021-03-30
基金项目:浙江省公益技术研究项目(LGG20F030007)
作者简介:田哥宇(1996—),男,浙江丽水人,硕士研究生,主要从事智能检测与控制方面的研究。
通信作者:刘 瑜,E-mail:liuyu8099@163.com

间法实施简单且计算方便,超宽带定位系统大多采用这种方法进行定位。飞行时间法根据电磁波信号在基站和标签之间飞行的时间计算两个收发模块之间的距离。在测出各个收发模块之间的距离后,通过各个基站的实际坐标可计算出标签的坐标信息,典型的方法有:线性最小均方误差估计(LLSE)算法、加权质心估计(WCE)算法和指纹估计(FPE)算法^[6]。

由于电磁波到达或离开天线的时刻和收发模块处理器接收到信息的时刻存在偏差(这个偏差就是天线接收延时或天线发送延时),为了得到更加精确的电磁波到达或离开天线的时刻,在收发模块内部都要设定天线延时,用于在计算测距值时进行补偿。在已经拥有标准收发模块(内部天线延时已校准完成的收发模块)的条件下,只需要使用待校准收发模块和标准收发模块进行测距,根据实际距离和测量距离的偏差便可计算出待校准模块的天线延时。但在缺少标准模块的情况下,需要使用多个待校准收发模块同时进行校准。典型的校准方法主要有两类。

第一类校准方法,主要通过数学模型直接计算出各个收发模块的天线延时。超宽带模块供应商Decawave^[7]提出了一组测距误差计算天线延时的方法:将各个待校准模块中的天线延时设定为0,在已知距离下使用三个待校准模块进行两两测距,对得到的测距值进行逆向补偿(在测距模块中程序能够根据天线的增益和收发功率进行补偿,得到更精确的测距值)后得到实际测距值,从大量天线延时组合中挑选最接近实际测距值和真实距离之间的误差值的天线延时组合。Gui等^[8]在此基础上提出了一种新的计算方法:通过数据包中的六个时间戳计算两个模块之间天线延时之和,使用最小二乘法计算出能够使三个待校准模块测距精度最高的天线延时。通过数学模型计算天线延时的方法工作量小,能够快速校准多个收发模块,但由于收发模块所搭载天线的增益和收发功率^[9]会影响飞行时间的测量,这部分影响往往难以测量。这使得测距和校准的过程中,对飞行时间的补偿和逆向补偿的校准作用可能被减弱甚至使误差进一步增大,因此此类方法在实际应用中的适用性有限。

另一类校准方法,主要通过实际测试,在多组天线延时中筛选出测距精度最高的天线延时组合。颜国正等^[10]使用“蒙特卡洛”方法,在大量可能的天线延时组合中选出测距精度较优的若干组合,并在多次迭代中使测距精度较优的部分向最优天线延时组合聚拢,迭代结束后取较优部分的均值作为各个待

校准模块的校准结果。这种方法以各组天线延时在实际测试中的精度为优劣标准,保障校准结果的精度。然而这种方法需要测试大量的候选天线延时组合,需要消耗大量时间。

鉴于以上两类典型方法的不足,为了尽可能高地提升校准后测距模块之间的测距精度同时节省校准过程所消耗的时间,本文提出了超宽带测距模块的快速迭代校准方法,以各组天线延时在实际测试中的精度为优劣标准,从给定的起点出发,在少量候选的天线延时中筛选较优的若干组天线延时,以此生成新的起点进行下一次迭代,多次迭代中较优的天线延时不断向最优天线延时组合逼近,最后得到校准结果。

1 飞行时间法

使用飞行时间法测量两个收发模块之间距离,其计算公式可用式(1)表示:

$$S_d = cT_f \tag{1}$$

其中: S_d 为测量得到的距离值,m; T_f 为电磁波在空中飞行时间,s; c 为电磁波的飞行速度,取299792458 m/s。在测量两个收发模块之间距离时,两个收发模块通过电磁波来回发送数据包,并在每次接收和发送数据包时在数据包中记录接收和发送数据包的时间戳来计算电磁波在空中的飞行时间。

为降低两个收发模块之间时钟不同步对测距精度的影响,采用双向双边(DS-TWR)法测量电磁波信号在两个收发模块之间的距离^[11-13]。使用双向双边法测量两个收发模块之间距离时数据包的传递方式如图1所示^[13]。记录在数据包中的时间戳包括标签发送 POLL 数据包的时间戳 T_1 、基站接收 POLL 数据包的时间戳 T_2 、基站发送 RESP 数据包的时间戳 T_3 、标签接收 RESP 数据包的时间戳 T_4 、标签发送 FINAL 数据包的时间戳 T_5 和基站接收 FINAL 数据包的时间戳 T_6 。

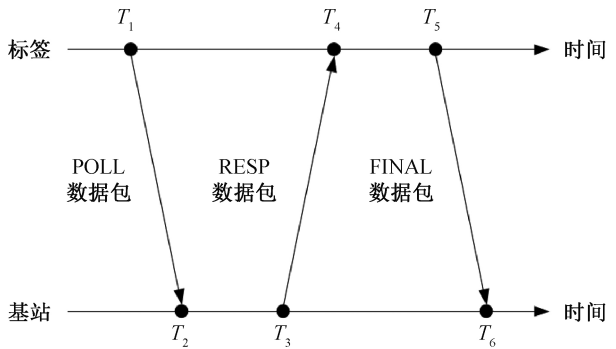


图 1 DS-TWR 法的时间戳

在得到 6 个时间戳之后,根据式(2)计算出数据包在标签和基站之间的飞行时间:

$$T_f = \frac{(T_4 - T_1)(T_6 - T_3) - (T_5 - T_4)(T_3 - T_2)}{T_6 + T_5 - T_2 - T_1} \quad (2)$$

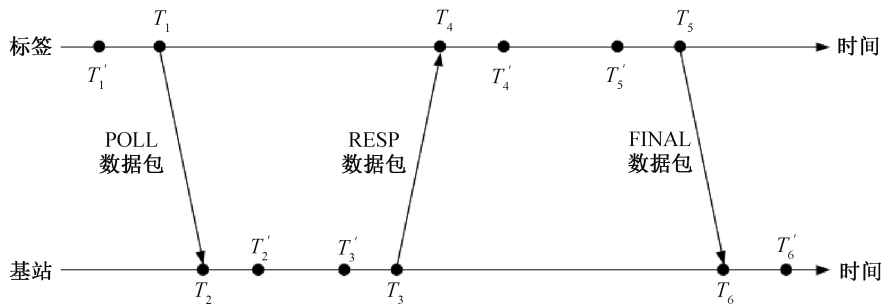


图 2 天线延时作用下 DS-TWR 法的时间戳

图 2 中, $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ 为天线实际发送或接收数据包的时刻, $T'_1, T'_2, T'_3, T'_4, T'_5, T'_6$ 为收发模块执行发送数据包命令或接收到数据包的时刻。两个收发模块的天线接收延时和天线发送延时可用式(3)计算:

$$\begin{cases} D_{tt} = T_1 - T'_1, \\ D_{tt} = T_5 - T'_5, \\ D_{tr} = T'_4 - T_4, \\ D_{at} = T_3 - T'_3, \\ D_{ar} = T'_2 - T_2, \\ D_{ar} = T'_6 - T_6 \end{cases} \quad (3)$$

其中: D_{tt} 和 D_{tr} 分别为标签的天线发送延时和天线接收延时, D_{at} 和 D_{ar} 分别为基站的天线发送延时和天线接收延时。

将式(3)代入式(2),可以得到收发模块的处理器执行发送和接收数据包的时刻和实际发送和接收数据包的时刻之间的关系:

$$\begin{cases} T_4 - T_1 = T'_4 - T'_1 + D_{tt} + D_{tr}, \\ T_6 - T_3 = T'_6 - T'_3 + D_{at} + D_{ar}, \\ T_5 - T_4 = T'_5 - T'_4 + D_{tt} + D_{tr}, \\ T_3 - T_2 = T'_3 - T'_2 + D_{at} + D_{ar}, \\ T_6 - T_2 = T'_6 - T'_2, \\ T_5 - T_1 = T'_5 - T'_1 \end{cases} \quad (4)$$

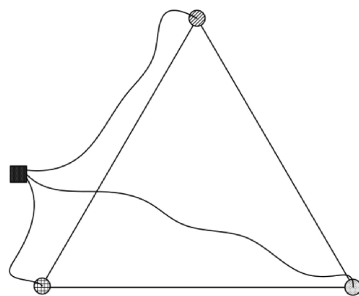
由式(4)可知,在使用双向双边法测量两个收发模块之间距离时,只需要在各个收发模块中预设天线接收延时与天线发送延时之和,便可根据式(2)计算电磁波信号的飞行时间。需注意的是,对于不同的定位方法,收发模块中设定的天线延时不尽相同^[7,14]:在使用通过线缆实现时钟同步的到达时间差(TDoA)法进行定位时,只需要设定作为基站的收发模块的接收延时;在使用通过无线实现时钟同步的

由于天线延时的存在,收发模块的处理器执行发送和接收数据包的时刻和天线实际发送和接收数据包的时刻并不相同,天线延时作用下 DS-TWR 法的时间戳如图 2 所示。

到达时间差(TDoA)法进行定位时,需要分别设定每个超宽带收发模块的发送延时和接收延时;在使用双向双边(DS-TWR)法进行测距时需要设定接收延时间和发送延时时间的总时间,记作天线延时。

2 超宽带收发模块的校准

本文使用三维空间中的点表示天线延时,每个点的三个坐标值分别表示一组天线延时中分配给三个待校准模块的天线延时。由于天线延时一般在 515 ns 左右且为浮点数类型,收发模块内部会内置一个整数类型的天线延时参数来代表天线延时方便开发人员调节天线延时,例如 515 ns 对应的天线延时参数为 32907,后文中天线延时皆指天线延时参数。为了计算的方便,将三个待校准模块设置在正三角形的三个顶点上,并通过串口线与上位机连接,连接方式如图 3 所示。图 3 中,三个圆形分别表示三个待校准模块,正方形表示上位机。



● 第一个收发模块 ● 第二个收发模块 ● 第三个收发模块 ■ 上位机

图 3 三个收发模块和上位机的连接方式

上位机迭代校准方法的流程为:

a) 给定一个起点和一个初始随机范围,在起点的周围随机范围内产生若干随机点,和起点构成一个待测点集;

b) 对一个待测点集进行测试筛选出较优点集, 由较优点集取平均得到较优中心;

c) 由 b) 得到的较优中心和起点计算得到新的起点;

d) 返回 a) 重复多次迭代, 在迭代的过程中随即半径不断缩小, 随机半径足够小后结束迭代取最后一次迭代的较优中心作为校准结果。

2.1 随机点集生成

在起点附近, 随机产生 $m-1$ 个矢量 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_{m-1}$, 随机矢量 $\mathbf{R}_i(r_{1i}, r_{2i}, r_{3i})$ 均满足式(5):

$$-r < r_{1i}, r_{2i}, r_{3i} < r, i=1, 2, \dots, m-1 \quad (5)$$

其中: r_{1i}, r_{2i}, r_{3i} 为第 i 个随机矢量的三个分量, r 为随机范围, 以此可控制随机点集中点的分散程度。得到各个随机矢量后, 将这些随机矢量叠加到给定的起点上, 从而产生若干个随机点, 如式(6)所示:

$$(D_{1i}, D_{2i}, D_{3i}) = (D_1 + r_{1i}, D_2 + r_{2i}, D_3 + r_{3i}), \\ i=1, 2, \dots, m-1 \quad (6)$$

其中: D_{1i}, D_{2i}, D_{3i} 分别表示第 i 个随机点中三个模块的天线延时, D_1, D_2, D_3 分别表示起点中三个模块的天线延时。根据式(6), 得到若干个随机点, 这些随机点和起点一起构成一个待测点集, 大小为 m 。

2.2 待测点集测试

对于待测点集中的每一个点, 将该点中的三个天线延时分别写入三个模块中, 之后通过上位机软件轮流控制每个模块对另外两个模块发起测距, 每次测距时测量多次取平均作为测距值。

得到一个待测点对应的 6 个测距值后, 以式(7)计算当前待测点的误差平方和:

$$E = \sum (d_{ij} - d_{\text{real}})^2 \quad (7)$$

其中: E 为当前待测点对应的误差平方和, cm^2 ; d_{ij} 表示第 i 个模块对第 j 个模块发起测距时得到的测距值, cm ; d_{real} 为三个待校准模块之间的实际距离, cm 。

为降低测试过程中出现的偶然误差的干扰, 将一组待测点全部测试完毕之后选出误差平方和最小的 m 个点作为较优点集, 将较优点集中各个点取平均值得到较优中心 P_b , 而不是简单地取待测点集中误差平方和最小的点作为最优点。得到较优中心 P_b 后, 和之前的若干个较优中心进行比较, 若这些较优中心足够接近, 则将随机范围缩小一半, 使新的待测点集分布在更加靠近新的起点的范围内。

2.3 新的待测点集生成

为使较优中心在迭代过程中能够更快地达到最优点, 根据式(8)产生新的起点, 而非在较优中心周

围产生新的随机点。

$$P'_s = P_b + \alpha(P_b - P_s) \quad (8)$$

其中: P'_s 为新的起点, P_s 为原有的起点, α 为步长系数。将 α 设定在 0 到 1 之间, 可使较优中心出现新的起点附近随机范围内, 保证了每次迭代测试的待测点集均分布在起点的随机范围内。

得到新的起点后, 在其随机范围内产生新的待测点, 和新的起点以及较优点集一起构成新的待测点集。在新一轮迭代中, 将较优点集将和新的随机点以及新的起点一起测试、筛选, 使较优点集中各个点的误差平方和在迭代过程中不断减小, 即不断向最优点逼近。

2.4 迭代结束条件

多次“产生待测点集-测试筛选-产生新起点”的迭代过程中, 较优中心将会不断地向最优点逼近, 随机范围也在不断缩小。当随机范围足够小后再进行若干次迭代后终止迭代, 将最后一个较优中心作为校准结果。

3 实验及结果分析

为验证本文方法在实际运行中的校准效果, 本文在某教学楼五楼天台进行校准实验。实验过程中使用的收发模块为广州联网科技公司生产的 D-DWM-PG2.5 模块, 实物照片如图 4 所示。实验开始时, 将三个收发模块中的初始天线延时参数设定为出厂参数: 32975, 工作模式设定为双向双边测距。实验开始时, 将三个收发模块之间的距离设定为 8.14 m, 按照图 3 方式和上位机连接, 现场照片如图 5 所示。上位机校准程序中将初始随机范围设定为 10。每次迭代从数量为 20 的待测点集中产生 5 个误差平方和最小的点作为较优点集。由于模块测距时使用了中值滤波算法, 3 个模块之间的 6 个测距值各测距 20 次, 对最后平稳的 10 个测距值取平均值用于计算误差平方和。在产生新的起点时所使用的步长系数设定为 0.5。上位机程序在 2 h 的运行过程中, 随机范围从 10 缩小到 2, 在随机范围为 2 的条件下继续执行 5 次迭代后, 结束运行, 一共测试了 17 个待测点集, 得到校准结果。

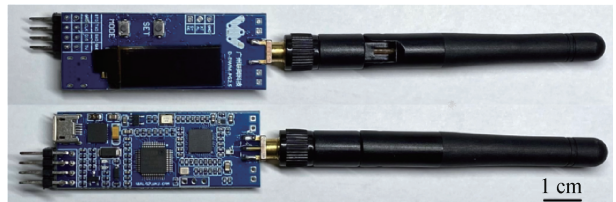


图 4 D-DWM-PG2.5 模块实物照片



图5 实地校准的现场照片

得到校准结果之后进行精度测试。由于本研究是为基于超宽带的定位系统提供测距校准方法,该定位系统主要用于较大的厂房、车间以及空旷的室外,系统中作为基站的收发模块安装在室内的天花板或室外的高处,待定位标签和基站距离大多大于15 m,故而没有考虑15 m以下的精度测试。综合考虑试验场地的大小,在精度测试实验中,从15 m开始,到30 m结束,每隔1 m取一个距离值,一共得到16个实际距离值用于误差测试。控制三个模块在每个实际距离值下进行50次两两测距,取平均后得到6个测量距离值。由6个测量距离值和实际距离值根据式(4)计算各距离下的误差平方和。使用Decawave方法^[7]计算出天线延时组合后,将该方法的校准结果写入三个收发模块之后在16个实际距离下进行两两测距,由6个测量距离值和实际距离值根据式(7)计算各距离下的误差平方和。在16个不同的距离下使用两种方法得到的误差数据如图6所示,图中通过6个测量距离值的误差平方和比较两种方法的测距精度,单位为 cm^2 。

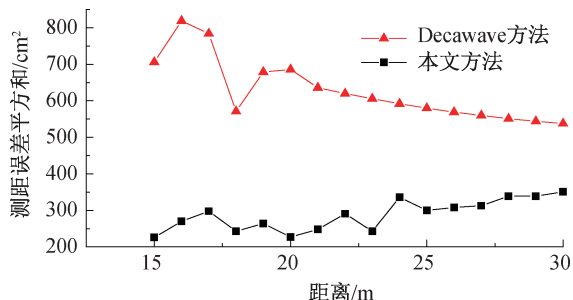


图6 两种校准方法所得到校准结果的误差平方和曲线

由图6可以看出,实际距离从15 m向30 m增加的过程中,本文方法的测距误差平方和呈现总体上升趋势,而Decawave方法^[7]的测距误差平方和呈现总体下降趋势,且总体上本文方法测距精度优于Decawave方法的测距精度。由总体趋势可得:在15 m内的距离下,两种方法之间的精度差距会

进一步增大;超出30 m范围后,本文方法和Decawave公司提出的方法在测距精度将会进一步缩小。总体上,本文方法在15~30 m范围内的测距精度在10 cm以内,满足定位所需的精度要求。

在耗时方面,和本文方法一样使用实际测距误差来评价天线延时组合优劣的“蒙特卡洛”法^[10,15],在0~65495(0~1025 ns)之间为各个待校准模块搜索天线延时。该方法在每次迭代时存在大量不必要的待测点,导致校准过程中时间浪费。由于文献并未指明每次迭代中待测天线延时参数组合数量,无法复现文献中的校准实验进行对比。本文提出的方法在给定起点附近小范围内产生每次迭代的待测点集,减少了每次迭代中待测点的数量,节约了大量的时间,校准过程更加高效。

4 结 论

本文提出了一种超宽带测距模块的快速迭代校准方法。该方法以各天线延时组合实际测距精度为标准,首先从少量候选的天线延时组合中选出较优的若干组,以这部分测距精度较优的天线延时组合产生新的候选天线延时组合,然后经过多次迭代,较优的天线延时组合逐渐向最优的组合逼近,最后得到校准结果。在户外对校准结果进行了精度实验,结果表明:经过2 h的迭代校准后,本文方法得到的校准结果在15 m到30 m范围内的测距精度优于Decawave公司的校准方法,提高了后续实施超宽带定位系统时的定位精度;在17次迭代中对340个候选天线延时组合进行了测试,校准过程相较于“蒙特卡洛”法持续时间更短,校准效率更高。

参考文献:

- [1] 许万,涂拓,胡天宇,等.基于超宽带技术的室内无线定位系统设计[J].湖北工业大学学报,2020,35(5):1-7.
- [2] 闫佳晖,张晓明,刘俊,等.基于UWB的运动场定位系统设计[J].导航定位与授时,2020,7(1):98-103.
- [3] Ling J, Wang L, Ji H, et al. UWB-Based Real-Time Continuous Positioning System in NLOS Tunnel Environment[C]//2018 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC). Hangzhou: IEEE, 2018: 142-146.
- [4] 肖竹,王勇超,田斌,等.超宽带定位研究与应用:回顾和展望[J].电子学报,2011,39(1):133-141.
- [5] 杨洲,汪云甲,陈国良,等.超宽带室内高精度定位技术研究[J].导航定位学报,2014,2(4):31-35.
- [6] 张媛,缪相林,王梅,等.UWB测距室内定位算法误

差分析[J]. 导航定位学报, 2020, 8(6): 132-136.

[7] DecaWave Ltd. Antenna delay calibration of dw1000-based products and systems [EB/OL]. (2018-09-25) [2021-01-11]. https://www.decawave.com/wp-content/uploads/2018/10/APS014_Antennna-Delay-Calibration_V1.2.pdf.

[8] Gui X, Guo S, Chen Q, et al. A new calibration method of UWB antenna delay based on the ADS-TWR[C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC). Wuhan: IEEE, 2018: 7364-7369.

[9] DecaWave Ltd. Sources of Error in DW1000 based two-way ranging (TWR) Schemes[EB/OL]. (2018-09-25) [2021-01-11]. https://www.decawave.com/wp-content/uploads/2018/10/APS011_Sources-of-Error-in-Two-Way-Ranging-Schemes_v1.1.pdf.

[10] 颜国正, 孙铭阳, 王志武, 等. 基于 UWB 高精度测距定位系统的天线延迟校准方法: 201810572084.4[P]. 2018-11-06.

[11] Wang Y, Leus G, Deliç H. TOA estimation using UWB with low sampling rate and clock drift calibration [C]//2009 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Vancouver: IEEE, 2009: 612-617.

[12] Sang C L, Adams M, Hörmann T, et al. An analytical study of time of flight error estimation in two-way ranging methods[C]//2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Piscataway. Nantes: IEEE, 2018: 1-8.

[13] 王春琦, 冯大权, 何春龙, 等. 基于 UWB 的增强非对称双边双向测距算法研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2019, 33(1): 66-73.

[14] Navrátil V, Krška J, Vejražka F, et al. Chained wireless synchronization algorithm for UWB-TDOA positioning[C]//2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Monterey: IEEE, 2018: 149-157.

[15] 孙铭阳, 颜国正, 刘大生, 等. 基于超宽带技术的强制戒毒人员实时定位系统[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(1): 76-84.

(责任编辑:康 锋)