

基于载波相位差的室内定位系统研究

奚润开,吴键,陈灵,王鑫

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:为提高室内定位精度,研究并实现了一种基于载波相位差的室内定位系统,利用双天线结构的传感器节点测量信号源载波相位差值,借助无线传感网络实现了分布式传感器节点的相位差值汇总。阐述了载波相位差定位的基本原理,通过基于泰勒级数展开的最小二乘迭代算法完成定位过程中双曲线方程的求解,得到目标位置,并对系统各节点进行了设计。仿真与实验的结果均证明了定位算法的有效性以及定位系统在非视距环境下的定位能力。

关键词:载波相位;室内定位;节点设计;定位算法

中图分类号:TN925 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)01-0195-04

Research on Indoor Positioning System Based on Carrier Phase Difference

XI Runkai, WU Jian, CHEN Ling, WANG Xin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To improve the accuracy of indoor positioning, an indoor positioning system based on carrier phase difference is researched and implemented. The sensor node with dual antenna structure is used to measure the signal source carrier phase difference, and the phase difference of distributed sensor nodes is realized with the help of wireless sensor network. The basic principle of carrier phase difference positioning is explained. The hyperbolic equation in the positioning process is solved by the least squares iterative algorithm based on Taylor expansion to obtain the target position, and the nodes of the system are designed. The results of simulation and experiment both prove the effectiveness of the positioning algorithm and the positioning ability of the positioning system in a non-line-of-sight environment.

Keywords: carrier phase; indoor positioning; node design; positioning algorithm

0 引言

近年来,信息化、智能化的生活方式越来越受到关注,位置信息服务可以给人们生活带来很大的便捷^[1]。

应用广泛的 GNSS 全球导航卫星系统^[2]在遇到障碍物时会衰减或者散射,而且在遮挡较多的室内环境下有很大的局限性,这也使得位置信息服务难以开展。室内定位技术开展过程中会面临许多难题。首先,室内环境比较复杂,传感器通常需要在非视距(NLOS)情况下完成测量任务,且墙壁等密集设施产生严重的多径干扰,这使得测量数据准确性大打折扣。其次,以 TOA、TDOA^[3]为主的基于时间测量定位系统对发射以及接收节点的时间同步要求极高,每 1 ns 的时钟误差会造成 30 cm 定位误差,这使得定位系统的成本大大提高。

为应对室内环境复杂多变、大量障碍物干扰的情况,本文对基于载波相位差^[4-5]的室内定位系统进行了研究与实现,借助 433 MHz 载波信号较强的穿透能力与绕射能力,通过信号到达节点两端接收天线相位差值的测量实现室内多遮挡、非视距的复杂环境下的目标定位功能。与性能优异的 UWB 室内定位技术^[6]相比,该系统不需要高精度的时间同步,且频谱占用少、定位范围广,在非视距环境

下,433 MHz 的载波信号有着较强的绕射以及穿透能力,与传统的 WiFi、Bluetooth 等定位技术^[7-8]相比有着更高的定位精度。

1 定位原理

图 1 给出了载波相位差定位系统在二维平面内某一节点的接收天线与信号源的关系。在 A、B 两个观测点上的接收天线与定位目标 C 的距离分别为 d_1 、 d_2 ,两个观测点的间距为 d_3 。载波信号由位于目标位置的全向天线发出,两个接收天线与信号处理模块组成一个负责检测载波相位差的传感器节点。

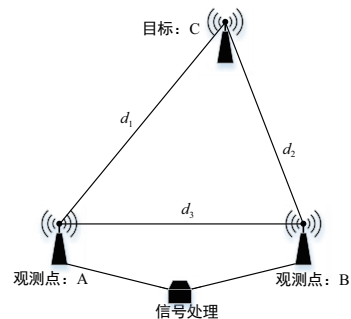


图 1 定位目标与接收机的几何关系

第一作者简介:奚润开(1995—),男,江苏常州人,硕士研究生,研究方向为室内定位。

在室内平面坐标系中,假设目标 C 的天线几何中心的坐标为 (x, y) , x 和 y 都为待测量,观测点 A、B 的天线几何中心的坐标分别为 (x_A, y_A) 和 (x_B, y_B) , 它们都为已知量。目标与观测点间距表达式为

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_A^2 - x)^2 + (y_A^2 - y)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_B^2 - x)^2 + (y_B^2 - y)^2} \end{cases} \quad (1)$$

d_1 和 d_2 的差值可以用未知量 x 和 y 表示。同时,该距离差值可以双天线结构的传感器节点进行测量。

假设节点接收天线 A、B 在某时间点的载波信号的相位为 φ_A 与 φ_B , 它们可以表示为

$$\begin{cases} \varphi_A = 2\pi \left[\frac{R_A}{\lambda} + (\delta_{tr} - \delta_{ts}) \frac{c}{\lambda} + N_A + \varepsilon_{1A} + \varepsilon_{nA} \right] \\ \varphi_B = 2\pi \left[\frac{R_B}{\lambda} + (\delta_{tr} - \delta_{ts}) \frac{c}{\lambda} + N_B + \varepsilon_{1B} + \varepsilon_{nB} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_A 与 R_B 分别表示信号源到接收天线 A、B 的距离; λ 表示载波信号的波长; δ_{tr} 和 δ_{ts} 分别表示传感器节点的时钟误差以及信号源的时钟误差; N_A 和 N_B 表示天线 A、B 接收到的载波信号整周模糊度; ε_{1A} 和 ε_{1B} 分别表示接收天线 A、B 与信号处理模块之间的硬件电路对信号相位产生的偏差; ε_{nA} 和 ε_{nB} 为载波相位测量时由于测量噪声产生的相位偏差。硬件电路对相位的影响可以采用精密匹配的信号接收电路消除,使 ε_{1A} 和 ε_{1B} 的差值可以忽略不计。

在双接收天线信号传输电路精密匹配的情况下,相位差 $\Delta\varphi_{A,B}$ 可以表示为

$$\Delta\varphi_{A,B} = 2\pi \left(\frac{R_A - R_B}{\lambda} + N_A - N_B + \varepsilon_{nA} - \varepsilon_{nB} \right) \quad (3)$$

为了方便分析,将式(3)两端对 2π 取余。由于 N_A 和 N_B 都为整数,取余后可以消除,而测量噪声对相位值的影响 ε_{nA} 和 ε_{nB} 远小于一个周期,取余后可以将其保留。结果可以表示为

$$\text{mod}(\Delta\varphi_{A,B}, 2\pi) = 2\pi \left(\frac{R_A - R_B}{\lambda} + \varepsilon_{nA} - \varepsilon_{nB} \right) \quad (4)$$

本文定位系统中的传感器节点的接收天线间距严格小于 $\frac{1}{2}$ 载波波长,假设接收天线 A、B 的间距为 $R_{A,B}$, 可以得到下式:

$$|R_A - R_B| < R_{A,B} < \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

由式(5)可知,忽略测量噪声的影响,最终相位差检测值位于 $(-\pi, \pi)$ 之间。通常情况下,相位差检测电路难以判断信号到达的先后顺序,所以最终的检测结果一般为正值,其范围为 $(0, \pi)$ 。

综上所述,在理想情况下,该双天线结构传感器节点的相位差测量值可以表征室内坐标系内任意一点的距离差绝对值信息即目标所在的双曲线。

2 定位算法

本文室内定位系统的距离差方程可以表示为以下形式:

$$R_{2i-1,2i} = R_{2i} - R_{2i-1} = \sqrt{(x_{2i} - x)^2 - (y_{2i} - y)^2} - \sqrt{(x_{2i-1} - x)^2 - (y_{2i-1} - y)^2} \quad (6)$$

式中: i 为观测点编号; n 为观测点组数即传感器节点的数量。

现将式(6)在 (x_0, y_0) 处一阶泰勒级数展开,可得

$$R_{2i-1,2i} = R_{2i} - R_{2i-1} + \left(\frac{x_0 - x_{2i}}{R_{2i}} - \frac{x_0 - x_{2i-1}}{R_{2i-1}} \right) \Delta x + \left(\frac{y_0 - y_{2i}}{R_{2i}} - \frac{y_0 - y_{2i-1}}{R_{2i-1}} \right) \Delta y \quad (7)$$

根据式(7)得出其残差 Ψ 的矩阵表示:

$$\psi = H - G\delta \quad (8)$$

式中 δ 、 H 、 G 为:

$$\begin{cases} \delta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \\ H = \begin{bmatrix} R_{1,2} - R_2 + R_1 \\ R_{3,4} - R_3 + R_4 \\ \vdots \\ R_{2i-1,2i} - R_{2i} + R_{2i-1} \end{bmatrix} \\ G = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x_2}{R_2} - \frac{x_0 - x_1}{R_1} & \frac{y_0 - y_2}{R_2} - \frac{y_0 - y_1}{R_1} \\ \frac{x_0 - x_4}{R_4} - \frac{x_0 - x_3}{R_3} & \frac{y_0 - y_4}{R_4} - \frac{y_0 - y_3}{R_3} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x_{2i}}{R_{2i}} - \frac{x_0 - x_{2i-1}}{R_{2i-1}} & \frac{y_0 - y_{2i}}{R_{2i}} - \frac{y_0 - y_{2i-1}}{R_{2i-1}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

采用最小二乘算法计算 δ 的最小二乘估计:

$$\delta = (G^T G)^{-1} G^T H \quad (10)$$

经过上述步骤,待修正坐标的估值为

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \delta = \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x \\ y_0 + \Delta y \end{bmatrix} \quad (11)$$

最后判断 $(|\Delta x| + |\Delta y|)$ 是否达到预期的阈值,若不满足要求,用修正坐标继续进行最小二乘迭代,直到满足阈值要求。

3 系统设计

系统的总体设计方案如图 2 所示。定位系统主要由信号源模块、传感器节点、基站节点等组成。

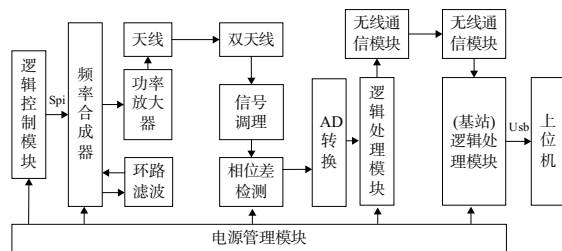


图 2 定位系统总体方案设计

图 2 中信号源模块负责 433 MHz 正弦波信号的产生与发送,主要由 stm32 主控芯片、锁相频率合成芯片、环路滤波器、电源和天线组成。频率合成器选择某公司的 ADF4351 产品。ADF4351 有简易的 SPI 接口,可用于数字信号控制。本文选择使用 stm32F103C8T6 控制芯片^[9]。环路滤波器采用典型的三阶环路滤波。信号源模块结构

如图 3 所示。

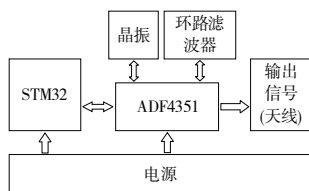


图 3 信号源结构

无线传感网络中的传感器节点在室内定位系统中负责利用双天线采集目标发出的 433 MHz 信号,并利用无线模块将数据上传。传感器节点主要由两根 433 MHz 高增益天线、AC 耦合电路、相位差检测电路、STM32 主控模块以及 CC2630 无线通信模块组成。其结构框图如图 4 所示。

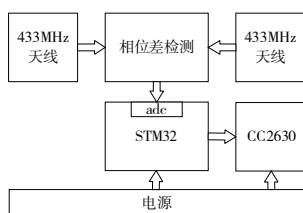


图 4 传感器节点结构

基站节点由路由器 (Router) 和协调器 (Coordinator) 节点组成。基站节点选择采用两片 CC2630 芯片搭建。IEEE802.15.4 标准协议嵌入在片内 ROM 中,在 ARM-Cortex-M0 处理器上单独运行,能够独立进行网络的组织以及数据的收发。CC2630 的 Cortex-M3 内核负责逻辑处理,主要包括与主控芯片的串口通信。STM32F103RCT6 主控芯片主要负责接收处理无线模块的数据,上传至上位机。基站节点的结构框图如图 5 所示。

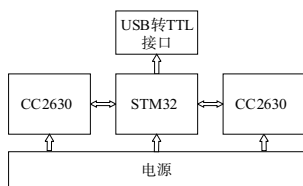


图 5 基站节点结构

4 定位算法仿真结果分析

本章节利用 MATLAB2017b 对基于先验坐标与泰勒级数展开的最小二乘迭代算法进行仿真。

此次仿真的定位范围为 $9\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的矩形空间,设置 6 个传感器节点,节点坐标如表 1 所示。选择 9 个测试点模拟定位目标(信号源)。传感器节点中心在图中用黑色实心正方形表示,测试点用黑色实心三角形表示。

在仿真过程中给载波相位测量值叠加 $0\% \sim 5\%$ 波长的随机测量噪声。对每个点分别进行 20 次定位运算,其中由直线排列的传感器节点组测量的先验坐标使用红色小点表示,定位算法的结果使用绿色小点表示。最终的仿

真结果如图 6 所示。仿真结果的最大误差与算法迭代次数如表 2 所示(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

表 1 传感器节点坐标 单位:m

节点编号	接收天线 1	接收天线 2
1	(1.654, 0)	(2.346, 0)
2	(4.154, 0)	(4.846, 0)
3	(6.654, 0)	(7.346, 0)
4	(0, 4.346)	(0, 3.654)
5	(4.154, 6)	(4.846, 6)
6	(9, 4.346)	(9, 3.654)

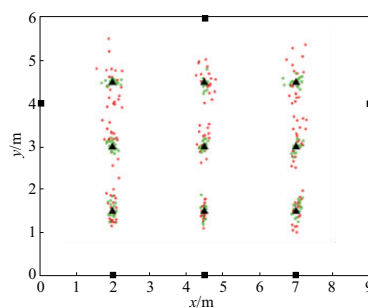


图 6 MATLAB 仿真图像

表 2 MATLAB 仿真结果 单位:m

测试目标 编号	最大误差		算法最大 迭代次数
	先验坐标	定位结果	
1	0.572	0.363	4
2	0.441	0.408	4
3	0.556	0.381	4
4	0.821	0.241	5
5	0.602	0.236	4
6	0.794	0.234	5
7	1.167	0.297	5
8	0.690	0.342	5
9	1.038	0.355	5

根据仿真结果可得:

1) 定位算法的仿真结果最大误差均 $< 0.5\text{ m}$ 。由 3 个传感器节点协作获得先验坐标的最大误差超过 1 m , 最大达到 1.167 m 。因此可证明本算法的参数估计定位结果有着较高的可靠性。

2) 定位算法保证收敛,最多只需要 5 次迭代就可以达到预先设置的 $1 \times 10^{-5}\text{ m}$ 的阈值,有着较低的时间复杂度,可以高效地完成位置解算任务。

5 定位实验结果分析

选择一个 $8.42\text{ m} \times 9.7\text{ m}$ 的矩形区域进行室内定位实验。实验环境如图 7 所示。



图7 定位实验环境

定位实验区域节点以及相关设施摆放如图8所示。

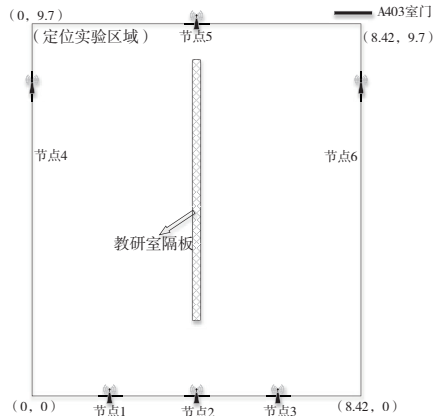


图8 定位实验节点布置

其中各个传感器节点及其两个接收天线在室内平面坐标系中的坐标如表3所示,定位实验结果如表4所示。

表3 定位实验接收天线坐标 单位:m

坐标	天线 A	天线 B
1	(1.754, 0)	(2.446, 0)
2	(3.864, 0)	(4.556, 0)
3	(5.974, 0)	(6.666, 0)
4	(0, 6.604)	(0, 7.296)
5	(3.864, 9.700)	(4.556, 0)
6	(8.420, 6.604)	(8.420, 7.296)

表4 定位实验结果 单位:m

测试点编号	测试点坐标	
	实际值	平均测量值
1	(1.1, 2.4)	(0.89, 2.61)
2	(1.1, 7.3)	(1.16, 7.89)
3	(3.8, 4.85)	(3.98, 5.21)
4	(6, 3)	(6.07, 3.11)
5	(6, 6.7)	(5.7, 6.80)

由定位实验结果可得:

1) 本文定位系统在 80 m^2 的定位区域内,受到室内木制隔板的遮挡,平均定位误差可以控制在 0.6 m 以内,最大定位误差不超过 1.6 m 。定位结果证明了本文定位方法的可行性。传统室内定位方法例如蓝牙、WiFi 定位在非视距环境下的定位误差在 3 m 左右,本文的室内定位系统与之相比在非视距环境下有着更好的定位精度。

2) 对于本文的定位系统,由于室内环境多径干扰严重,当信号源靠近墙壁等障碍物时,载波信号受到较大干扰,影响相位差测量精度,例如测试点3与测试点4有着 0.43 m 的定位精度差距。同样,接收天线附近的墙壁等也会很大程度影响载波相位差测量精度。

3) 本文使用的泰勒级数展开最小二乘迭代算法适用于本文的基于载波相位差的室内定位系统,在保证收敛性的同时可以通过少于6次的最小二乘迭代算法完成参数估计。

参考文献:

- [1] 刘成. LBS 定位技术研究与发展现状[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 78-83.
- [2] 郝志涛. 北斗卫星导航系统发展与应用[J]. 电子技术与软件工程, 2017(7): 34.
- [3] 邓平. 蜂窝网络移动台定位技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [4] SAMAMA N, VERVISCH-PICOIS A, TAILLANDIER-LOIZE T. A GNSS-like indoor positioning system implementing an inverted radar approach simulation results with a 6/7-antenna single transmitter [C]//2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Alcalá de Henares, Spain: IEEE, 2016: 1-8.
- [5] 徐亚明, 孙福余, 张鹏, 等. 一种利用载波相位差值的伪卫星定位方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(10): 1445-1450.
- [6] 邓世燕, 郭承军. 智慧城市建设中的室内定位现状与发展趋势分析[C]//第十一届中国卫星导航年会论文集. 成都: 2020: 131-137.
- [7] KÁRNÍK J, STREIT J. Summary of available indoor location techniques[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(25): 311-317.
- [8] SUDHAKAR K S, DNYANOBA B A, RAMCHANDRAN P. Protocol development for indoor navigation using bluetooth device[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2015, 8(21): 1-6.
- [9] 胡帅, 江亚峰, 杜铭权, 等. 基于 STM32 的智能节能恒温控制装置[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(4): 184-187.

收稿日期: 2020-12-25