

基于 UWB 的物联网节点定位算法的仿真研究

崔学荣^{1,2} 张浩² 吴春雷^{1,2} 李娟¹

(中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院¹, 青岛 266555; 中国海洋大学信息科学与工程学院², 青岛 266100)

摘要 Ultra-Wideband (UWB) 技术被认为是最适合进行室内无线定位的技术。为了实现对基于 UWB 的物联网中节点的位置进行定位及对算法进行仿真, 采用 Matlab 仿真了 PPM-TH-UWB (Pulse Position Modulation Time Hopping UWB) 信号在 IEEE802.15.4a 信道下的发射、延时、衰减、信道冲击响应、加噪声、相关接收、节点定位。该方法解决了在没有 UWB 信号发送、接收装置时对无线定位算法的仿真、测试和评估。

关键词 物联网 UWB 定位 仿真 测距

中图法分类号 TN915.11; **文献标志码** A

物联网(Internet of things, IoT)就是物物相连的互联网,是在互联网基础上延伸和扩展的网络,其终端可以是任何具有信息交换能力的物品,其主要实现技术是射频识别(RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等,以实现对物品的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理。物联网具有非常广阔的应用前景,而随机部署的传感器节点能够自身定位是物联网开展一系列具体应用的前提,因为只有知道了传感器感知数据的发生位置,所采集到的数据才有应用价值^[1]。目前对终端进行定位的主要技术是 GPS(global position system)定位方法,但是 GPS 具有种种限制,最主要的有三个限制:① GPS 定位精度低,通常只能达到米级的定位精度;② 在室内无法接收到 GPS 信号;③ GPS 功耗大,不适合安装在物联网的终端上。

UWB 技术是一种新颖的无线传输技术,可以很好地解决这三个主要的问题,UWB 是 IEEE 提出的第一个适合用来精确测距定位的无线物理层标准^[2]。UWB 发射的是纳秒时长的脉冲,所以具有极高的时间分辨率,可以达到厘米级的定位精度。

UWB 信号的带宽很宽,某些频率分量可以穿透障碍物,从而可以实现非视距(NLOS)环境下的定位。UWB 信号具有非常低的功率谱密度,从而可以降低功耗,同时也减少对其他无线系统的干扰。所以高分辨率、高带宽以及穿透障碍物能力强的特点使得 UWB 信号非常适合用在无线测距、定位中。文献[3]研究表明目前还没有哪一种无线定位技术能够达到像 UWB 这样的精确度。

文献[4—6]等提出了基于 UWB 的几种定位算法,但是却没有详细说明如何在计算机的环境中进行仿真。本文将重点研究如何使用 Matlab 实现基于 UWB 信号在 IEEE802.15.4a 信道下的发射、延时、衰减、加噪声、信道冲击响应、相关接收、节点定位。

1 无线定位算法

1.1 TOA 算法

基于 UWB 的常见的定位算法有 TOA (Time of Arrival), TDOA (Time Difference of Arrival), RSS (Received Signal Strength) 以及 AOA (Angle of Arrival) 等^[4—6]。其中最常用的是基于到达时间的 TOA 定位算法,因为这样可以充分利用 UWB 的高时间分辨率。

TOA 方法是利用发送机和接收机之间的传播

时延来计算距离。假设电波的传播速度为 c , 发射信号从某参考基站到待定位节点的传播时间为 t , 则两者间的距离为 ct 。一旦测得参考基站与待定位节点之间的距离 D , 则根据几何原理, 待定位节点一定位于以参考基站所在的位置为圆心, 以距离 D 为半径的圆周上。如果已知待定位节点与三个参考基站之间的距离, 以三个参考基站所在位置为圆心, 待定位节点与三个基站的距离为半径画圆, 如图 1 所示, 则三个圆的交点即为待定位节点所在位置。所以 TOA 定位算法也叫圆周定位 (二维定位) 或圆球定位 (三维定位)。

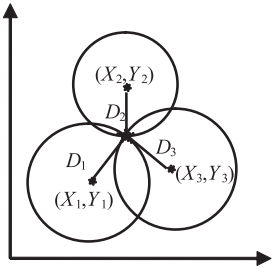


图 1 TOA 定位原理图

在三维定位场景下, 待定位节点的坐标 (x, y, z) 可以通过解方程组(1)计算得出。

$$\begin{cases} \sqrt{(X_1-x)^2+(Y_1-y)^2+(Z_1-z)^2} \\ \sqrt{(X_2-x)^2+(Y_2-y)^2+(Z_2-z)^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(X_k-x)^2+(Y_k-y)^2+(Z_k-z)^2} \end{cases} = \begin{cases} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_k \end{cases} \tag{1}$$

此处, (x, y, z) 是待定位节点的坐标, (X_k, Y_k, Z_k) 是已知的参考基站的坐标 ($k \geq 4$), D_k 为待定位节点到第 k 个参考基站之间的距离。

1.2 LSE 算法

在理想情况下, 通过解方程组(1)即可获得待定位节点的坐标 (x, y, z) , 但是由于存在非视距、多径、反射、衍射、码间串扰等信道干扰所以测距结果 D_k 一定会存在不可避免的误差, 导致无法直接解出方程组的解, 所以必须通过其他方法来求解, 例如最小二乘法、Chan、Taylor、MUSIC 等算法。本文主要研究如何实现仿真, 所以选用最简单的最小二

乘法。为了表示方便将式(1)重写为:

$$AI = b \tag{2}$$

式(2)中,

$$A = -2 \begin{bmatrix} (X_1 - X_k) & (Y_1 - Y_k) & (Z_1 - Z_k) \\ (X_2 - X_k) & (Y_2 - Y_k) & (Z_2 - Z_k) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (X_{k-1} - X_k) & (Y_{k-1} - Y_k) & (Z_{k-1} - Z_k) \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$I = [x, y, z]^T \tag{4}$$

$$b = \begin{bmatrix} D_1^2 - D_k^2 - X_1^2 + X_k^2 - Y_1^2 + Y_k^2 - Z_1^2 + Z_k^2 \\ D_2^2 - D_k^2 - X_2^2 + X_k^2 - Y_2^2 + Y_k^2 - Z_2^2 + Z_k^2 \\ \vdots \\ D_{k-1}^2 - D_k^2 - X_{k-1}^2 + X_k^2 - Y_{k-1}^2 + Y_k^2 - Z_{k-1}^2 + Z_k^2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

这样, 待定位节点的坐标 I 就可以通过矩阵运算直接计算出, 如式(6)所示。

$$I = A^{-1}b \tag{6}$$

2 无线定位算法仿真

由于在实际信道环境下, 受到的主要干扰是多径干扰和热噪声, 所以接收信号可以表示为式(7)。

$$r(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n p(t - \tau_n) + n(t) \tag{7}$$

式(7)中, N 是接收到的多径分量的个数, α_n 和 τ_n 分别代表第 n 条多径分量的幅度增益和传播时延, $n(t)$ 是加性白噪声 (Additive White Gaussian noise, AWGN), 均值为 0, 双边功率谱密度为 $N_0/2$ 。在仿真中实现上述的发送信号、传播时延、幅度增益、加噪声, 信号的相关接收以及节点的定位等过程的步骤如图 2 所示。

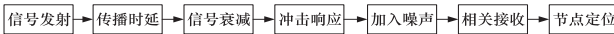


图 2 定位算法仿真的主要步骤

2.1 信号发射

UWB 信道的调制可以采用传统的 PAM、PPM 等, 本文选用 PPM-TH-UWB 调制模式^[7], 信号可以表示为式(8)。

$$s(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} p(t - jT_s - C_jT_c - a_j\varepsilon) \quad (8)$$

式(8)中 T_s 为一个脉冲的时长,即脉冲重复周期; C 为跳时(Time Hopping, TH)码,它是一个整数序列, C_j 为跳时码中的第 j 个整数; T_c 是码片时间长度; a_j 为重复编码后的二进制序列; ε 为 PPM 位移长度。

一般来说,上述参数要满足以下关系:

- (1) $C_jT_c + \varepsilon < T_s$;
- (2) $\varepsilon < T_c$;
- (3) $a_j\varepsilon < C_jT_c (C_j \neq 0)$ 。

如图 3 所示,这是 $T_c = 1 \times 10^{-9}$, $T_s = 3 \times 10^{-9}$, $C = \{1, 2, 0, 1, 0\}$, $\varepsilon = 0.5 \times 10^{-9}$ 时所产生的待发送的 PPM-TH-UWB 脉冲波形。

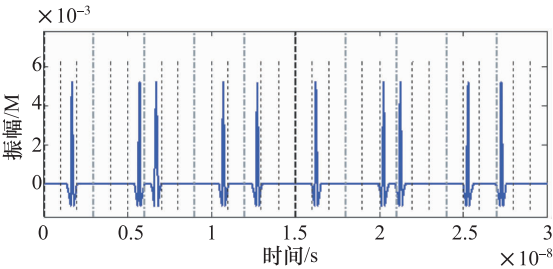


图 3 2PPM-TH-UWB 脉冲波形

PPM-TH-UWB 仿真系统模型如图 4 所示^[7]。



图 4 PPM-TH-UWB 发射器的系统模型

在第一个框图中,是原始的发送的二进制比特流,图 3 中发送的是二进制 10。

在第二个框图中,重复编码器将每一位二进制源重复编码为 N_s 位,例如:当 $N_s = 5$,图 3 中发送的二进制 10,被重复编码为 1111100000。

在第三个框图中,在每个脉冲信号中引入了跳时位移,每个节点都有一个唯一的跳时码,即具有了码分多址访问的能力。例如图 3 中的跳时码为 12010,则重复编码 111 110 000 0 中的每一比特将分别被右移 1、2、0、1、0、1、2、0、1、0 个时间片。

在第四个框图中,使用脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM),该调制方式是根据二进制 a_j 是 1 还是 0 决定是否改变脉冲的位置。例如图 3

左侧的 5 个脉冲,此时 $a_j = 1$ 则脉冲被右移 $\varepsilon = 5 \text{ ns}$;图 3 右侧的 5 个脉冲 $a_j = 0$,则不改变脉冲的位置,即没有 PPM 位移。

在最后一个框图中,根据函数 $p(t)$ 产生不同的信号波形,例如常用的是高斯脉冲(Gaussian pulse)的二阶导数,如式(9)所示。

$$p(t) = \frac{d^2f(t)}{dt^2} = \left(1 - 4\pi \frac{t^2}{\alpha^2}\right) e^{-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}} \quad (9)$$

此处 α 为高斯脉冲的成形因子,如果减少成形因子则将产生更窄的脉冲,此时信号的带宽更大,图 3 中 $\alpha = 0.295 \times 10^{-9}$ 。

2.2 信号的传播时延

为了对信号传播过程的延时进行仿真,采用的方法是将信号进行右移 D/Cf_c ,式中 D 为传播距离, C 为信号的传播速度,在空气中约为 299 792 458 m/s, f_c 为信号的采样频率。例如,图 5 为图 4 右移 10 米(3.3×10^{-8} s)后的信号的波形。

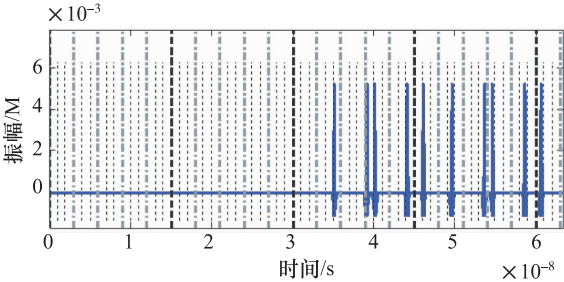


图 5 信号加入传播时延

2.3 信号的衰减

信号的衰减与传播距离和信道环境有关,在 IEEE802.15.4a 信道模型中,路径损耗(Path Loss)表示为式(10),单位为 dB。

$$PL(d) = PL_0 + 10n\lg_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (10)$$

式(10)中,参考距离 d_0 一般设置为 1 m, PL_0 为在参考距离处的路径损耗值, n 是路径损耗因子^[2]。上述参数不仅取决于具体的信道环境,也取决于待定位节点与参考基站直接是否是视距(Line of Sight, LOS)环境。例如,在室内的视距环境下(CM1), $PL_0 = 43.9 \text{ dB}$, $n = 1.79 \text{ dB}$;然而在室内的非视距环境下(CM2), $PL_0 = 48.7 \text{ dB}$, $n = 4.58 \text{ dB}$ 。如图

6 所示的信号为图 5 传播 10 m 后的信号。

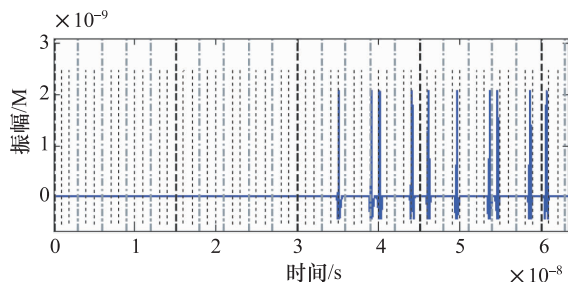


图 6 信号的衰减

2.4 加入信道冲击响应

信号在传输过程中要受到诸如多径、反射、衍射、折射等环境的干扰,造成信号的失真。IEEE 建立了 UWB 的信道模型即 IEEE802.15.4a,该模型是专门用来对 UWB 的低速信号进行仿真的信道模型。

在接收端,公式 (7) 可以重写为公式 (11)

$$r(t) = s(t)h(t) + n(t) \quad (11)$$

式 (11) 中, $s(t)$ 为发送信号, $h(t)$ 为信道冲击响应, 如式 (12) 所示, 图 7 是在 IEEE802.15.4a 信道模型中的 CM1 信道的冲击响应。

$$h(t) = X \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K(n)} \alpha_{nk} \delta(t - T_n - \tau_{nk}) \quad (12)$$

式 (12) 中, X 服从对数-正态分布, 表示的是信道的幅度增益, N 是到达的簇的数量, $K(n)$ 是在第 n 簇中接收到的多径分量的数量, α_{nk} 为第 n 簇中第 k 个多径分量的信道增益, T_n 是第 n 簇的到达时间, τ_{nk} 是第 n 簇中第 k 个多径分量的到达时间。在仿真中信道响应是通过将 $s(t)$ 和 $h(t)$ 做卷积得到的, 在 matlab 中的函数为 conv。图 8 所示的波形是图 6 的信号经过图 7 的信道冲击响应后的信号。

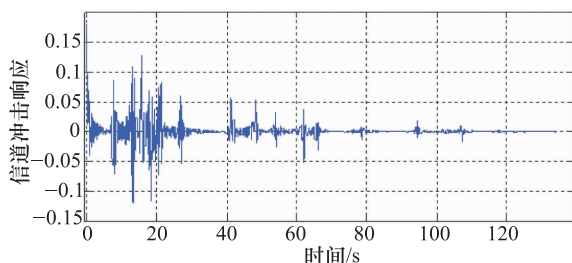


图 7 CM1 信道下的一个信道冲击响应

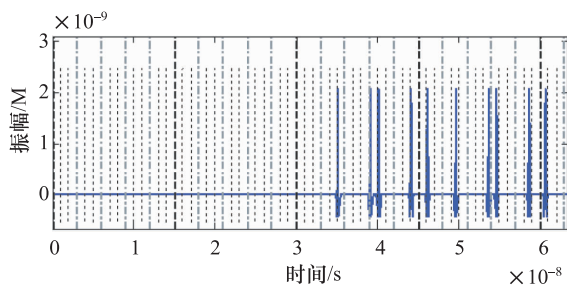


图 8 加入信道冲击响应后的波形

2.5 加入噪声

常见的加入噪声的方法是直接加入均值为 0, 双边功率谱密度为 $N_0/2$ 的高斯白噪声, 加入噪声后的波形如图 9 所示。

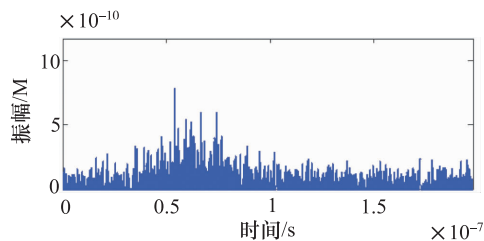


图 9 加入噪声后的波形

2.6 信号相关接收

在无线定位算法中, 常用的信号接收方法有基于能量的接收和相关接收。其中基于能量接收的装置复杂度低, 但是定位精度也低; 相关接收的装置要求采样率高、复杂性高, 但是定位精度也高。本文采用相关接收的方法对仿真进行介绍。

在接收端, 接收信号与其参考模板进行互相关, 即可得到信号的传播时延。互相关函数如式 (13) 所示^[7]。

$$r_{xs}(\tau_d) = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} r(t)s(t - \tau_d) dt \quad (13)$$

式 (13) 中 $T_0 = T_p/2$ 为积分周期, T_p 为脉冲宽度, $r(t)$ 为接收信号, $s(t)$ 为发送信号。

信号接收的目的是为了从接收到的信号 $r(t)$ 中能够计算出信号的传输时延 $\hat{\tau}$ 。接收信号 $r(t)$ 与模板信号 $s(t - \tau)$ 互相关后的峰值对应的时刻即为信号的传播时延 $\hat{\tau}$, 如式 (14) 所示。

$$\hat{\tau} = \operatorname{argmax}_{\tau} \int r(t)s(t - \tau) d(t) \quad (14)$$

根据估计出的传播时延 $\hat{\tau}$ 和信号的传播速度 c ,即可计算出待定位节点与参考基站之间的距离 $\hat{d} = \hat{\tau}c$ 。

图 10 所示的波形为图 9 的接收信号与模板信号互相关后的输出波形,从该波形中可以容易地得到传播时延对应在 3.34×10^{-8} 的时刻,即 10.013 1 m,误差只有 0.01 m。

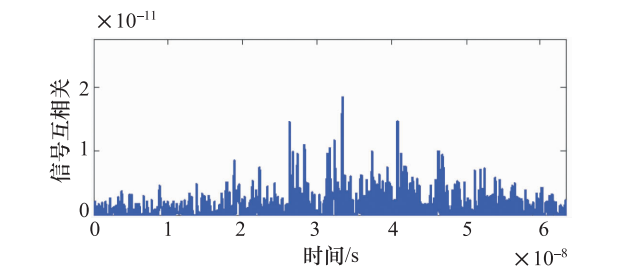


图 10 相关器的输出波形

2.7 节点定位

将待定位终端到每个参考基站的距离 D_k 以及参考基站的坐标代入公式(3)和式(5),即可计算出待定位节点的坐标。如图 11 所示,□处为四个参考基站的位置,坐标分别是(0,0,0)、(10,0,0)、(0,10,0)、(0,0,10);○处为待定位节点的位置,坐标为(10,10,10);★处为 UWB 定位结果,坐标为(9.831 2, 10.001 6,10.001 6)。

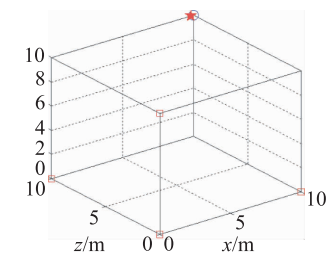


图 11 定位结果

3 结论

本文对基于 UWB 的无线传感网中节点定位算法进行了研究分析,并提出了通过 Matlab 进行仿真的方法,分析了具体的实现步骤,并结合实例给出了仿真过程。虽然本文使用的是最小二乘法进行仿真,但是该仿真方法具有普遍的适用性,可以应用到其他的基于 UWB 的定位方法的仿真,例如:Chan 算法、Tailor 基数展开算法以及其他的基于能量接收的定位算法。

参 考 文 献

1 吴绍华,张乃通. 基于 UWB 的无线传感器网络中的两步 TOA 估计法. 软件学报, 2007;18 (5):1164—1172

2 Molisch A F, Balakrishnan K, Cassioli D, *et al.* IEEE 802. 15. 4a Channel Model—Final Report . 2006, IEEE P802. 15-04-0662-00-004a

3 Gremigni O, Porcino D. UWB ranging performance tests in different radio environments. <http://www.ee.ucl.ac.uk/lcs/previous/LCS2006/53.pdf>,2010

4 Gezici S, Poor H V. Position estimation via Ultra-Wide-Band signals. Proceedings of the IEEE, 2009; 97 (2):386—403

5 Dardari D, Conti A, Fener U, *et al.* Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments. Proceedings of the IEEE, 2009;97 (2):404—426

6 Zhang Y, Brown A K, Malik W Q, *et al.* High resolution 3-D angle of arrival determination for indoor UWB multipath propagation. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008;(8):3047—3055

7 葛利嘉,朱林,袁晓芳,等. 超宽带无线电基础. 北京:电子工业出版社,2005

(下转第 6642 页)

Intelligent Node Design to Measure Angle Displacement Based on Inductosyn

GUO Jia¹, FAN Zhen-nan²

(CSIC 750 Test Range¹, Kunming 650051, P. R. China;

Sichuan Electric Vocational and Technical College², Chengdu 610072, P. R. China)

[Abstract] Inductosyn is often used as the angular displacement measuring sensor to three-degree-freedom simulating turntable in the field of inertial navigation. Based on resolver-digital converter and digital signal processor inductosyn is digitized. Meanwhile the inductosyn is taken as an intelligent node applied to a communication network with motor servo system which belongs to three-degree-freedom simulating turntable. As a result, the transmission distance and quality of the angular displacement signal is greatly improved, the actual angle measurement accuracy achieves 5", and dynamic tracking performance is good.

[Key words] inductosyn RDC DSP intelligent node



(上接第 6625 页)

A Study on the Simulations of Location Algorithm for the Nodes in UWB-based Internet of Things

CUI Xue-rong^{1,2}, ZHANG Hao², WU Chun-lei^{1,2}, LI Juan¹

(Department of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum (Huadong)¹, Qingdao 266555, P. R. China;

Department of Information Science and Engineering, Ocean University of China², Qingdao 266100, P. R. China)

[Abstract] Ultra-Wideband (UWB) technology is considered the most suitable for indoor wireless location technology. In order to achieve the location of the nodes in UWB-based Internet of Things (IoT) and the simulations of the location algorithms, Matlab was used in the article to simulate the PPM-TH-UWB signal in IEEE802.15.4a channel model, which included the emission, delay, attenuation, adding noise, channel impulse response, correlation receiver and location of the nodes. The proposed methods can realize the algorithm simulations for positioning, testing and evaluation of wireless location in the absence of the UWB sending and receiving device.

[Key words] internet of things UWB location simulation ranging