

采用能量检测的 UWB 应答式定位系统

仇洪冰, 王 玫, 冒 劼

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 提出一种呼叫应答式的传感器定位系统。利用超宽带(UWB)脉冲串来代替单个极窄脉冲,易于通过能量检测方式接收。采用呼叫应答式的定位算法和最小均方误差估计获取波达时间,提高了定位精度并且对多径干扰和非视距传播具有鲁棒性。同时利用平均时延扩展来修正波达时间,进一步提高系统定位精度。仿真结果表明,在 IEEE802.15.4a 给出的室内多径信道中,系统信噪比为 $-20\text{ dB}\sim 30\text{ dB}$ 时,定位误差小于 60 cm 。

关键词: 超宽带重复脉冲;能量检测接收;传感器网络定位;平均扩展时延

中图分类号: TN953⁺.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2008)02-0362-05

UWB call-response location system employing energy detection

QIU Hong-bing, WANG Mei, MAO Jie

(Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: This paper proposes a Call-Response Location System, where the UWB pulse train is utilized as the substitute for a single impulse. The energy detection can be exploited to reduce the complexity of the system. The call-response location algorithm and minimum mean-square error estimation are applied in the calculation of the time of arrival (TOA). And the mean delay spread is introduced to correct TOA for improved location accuracy in the multi-path and non-line-of-sight (NLOS) propagation environment. Results from the simulations conducted shows that in UWB channel proposed IEEE 802.15.4a the system succeeds in achieving a position location accuracy of $<60\text{ cm}$ when the SNR is set at the range of -20 dB to 30 dB .

Key Words: UWB pulse train; energy detection; location in sensors network; mean delay spread

精确定位是未来无线传感器网络的发展目标之一,也是当前信息技术领域的一大研究热点。特别是 IEEE 802.15 无线个人局域网第 4 工作组已经要求未来的系统要具有精确定位的能力和低速小范围的通信能力并且满足低成本、低功耗的要求^[1,2]。超宽带技术在短距离超高速通信以及精确定位的巨大潜力受到热切关注^[3,4],未来的应用还将延伸到穿墙雷达、掩埋目标探测和紧急救助、医学图像的精确定位以及大型码头、仓库和商场的货物查询和跟踪等。

在超宽带(UWB)定位系统中,传输的信号为极窄脉冲,其特点是信号频谱宽,功率低,对窄带干扰呈鲁棒特性;同时由于脉冲宽度只有纳秒级,通过极窄脉冲波达时间(TOA)的测量可以达到厘米级的定位精度^[3~6]。影响 UWB 定位系统性能的主要原因为非视距传播、多径、多址干扰、系统时钟漂移和同步控制等。无论哪一种干扰,其最终的影响表现在对极窄脉冲的检测和识别上。如何在室内多径多障碍环境下,检测出直达的极窄脉冲是 TOA 定位的重点和难点之一,另一个难点问题是极窄脉冲的时延估计。

笔者针对上述两个 UWB 定位的重点和难点问题,结合传感器网络低成本、低功耗、易实现的要求设计了呼叫应答式的重复脉冲 UWB 定位系统。由于极窄脉冲的能量很低,在复杂多径多障碍的环境中传输,很容易漏检和误检。以往发表的论文大都集中在如何经过门限设置等方法来减小漏检和误检的概率^[7~10]。从增大信号总能

收稿日期:2007-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助(60372037,60432040)

作者简介:仇洪冰(1963-),男,教授,E-mail: qiuhb@guet.edu.cn.

量入手,以连续发射一组脉冲来取代单个脉冲,利用能量检测和相关接收,可以较为容易并能精确地检测到首达脉冲,其波达时间的误差为极窄脉冲持续时间的量级(ns)而非码片周期(200 ns)的倍数.同时,系统采用呼叫应答式的定位算法和最小均方误差估计,利用多径信道的平均扩展时延对波达时间进行修正,使系统定位精度有较大提高.文中讲述了系统构成、工作原理,仿真结果说明了上述技术措施的有效性.

1 系统构成

假设一个无线传感器网络,其构成和定位方法示意图如图 1 所示.系统的多个基站设置在商场、货场、医院或办公楼的屋顶上,与主机有线或无线连接;待定位目标遍布在基站的周围.当主机需对某个目标进行定位时,发出带有目标 ID 的呼叫信号,同时通知各基站.各基站记录呼叫到达时间并等待接收.各个待定位目标接收呼叫信号并审核 ID,如果符合,发出带有 ID 信息的确认信号.各基站收到确认信号后记录波达时间,并将呼叫信号波达时间和确认信号波达时间、待定位目标 ID、基站代码一起发给主机,主机利用定位算法计算出待定位目标的坐标,达到定位的目的.

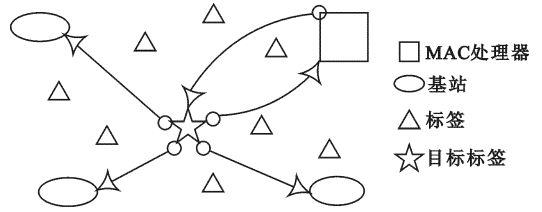


图 1 系统组成结构

系统定位单元构成框图如图 2 所示.系统由接收和发射机两部分组成.在发射部分,根据 ID 码对 UWB 脉冲串进行脉冲位置调制(PPM).待定位目标的 ID 码为一伪随机码,这里采用 48 位 GOLD 码,PPM 调制将在“1”bit 的起始点或“0”bit 的中间点发射一串 UWB 重复脉冲.在接收机中采用能量检测相关接收^[10~13],由于系统发射的是 UWB 脉冲串,因此使得基于能量检测的同步以及 TOA 检测变得容易,同时对多径、非视距传播等干扰具有鲁棒性.

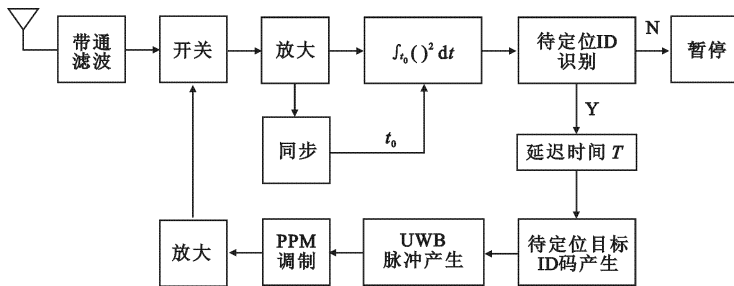


图 2 系统定位单元构成框图

2 信号表示

系统发射 M 个重复极窄脉冲来增加发射信号的功率,采用 2PPM 调制,其发射信号可以表示为

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{M-1} p(t - jT_s + (a_j - 1)T_s/2 - kT_s/(2N - \tau)) \quad (1)$$

其中 $p(t)$ 为所传输的 UWB 脉冲, a_j 为二进制地址码, T_s 为比特周期, τ 为发射机和接收机的时钟偏差, $N = T_s/t_p$, t_p 为极窄脉冲的持续时间.如果 a_j 为 1,式(1)中表示的信号将是 M 个重复脉冲,分布在下列时刻: $jT_s + kT_s/(2N + \tau)$, $k = 0, 1, 2, \dots, M-1, M < N$.可以看出,脉冲串出现在“1”比特的起始时刻并且持续 Mt_p 时间;如果 a_j 为 0,脉冲串将出现在“0”比特的中间位置.在考虑多径和噪声干扰的情况下,接收信号可以表示为

$$r(t) = a_d s(t - \tau_d) + \sum_{n=1}^{L-1} a_n s(t - \tau_n) + n(t) \quad (2)$$

其中 a_d 和 τ_d 表示直达信号的信号幅度和时延时间, a_n 和 τ_n 表示第 n 个反射信号的振幅和时延时间; L 为考虑多

径分量的最大值; $n(t)$ 表示白高斯噪声, 其双边功率谱密度为 $N_0/2$. 利用相关积分, 每比特信号能量表示为

$$y_j = \int_{jT_s+(a_j-1)T_s/2+t_0}^{jT_s+(a_j-1)T_s/2+T_s+t_0} r^2(t) dt, \quad (3)$$

其中, t_0 为积分起始时间, 即系统比特同步的起始时间. 积分相关器的输出与判决电路相连, 判决输出

$$\hat{a}_j = \begin{cases} 0, & y_j^{(0)} > y_j^{(1)}, \\ 1, & \text{其他}, \end{cases} \quad (4)$$

其中 $y_j^{(1)} = \int_{jT_s+t_0}^{jT_s+T_s+t_0} r^2(t) dt$, $y_j^{(0)} = \int_{jT_s+T_s/2+t_0}^{jT_s+T_s+t_0} r^2(t) dt$. \hat{a}_j 为待定位目标地址码 (ID) $\{\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \dots, \hat{a}_N\}$ 中的一位. 如果某待定位目标接收到的 ID 码与它自己的 ID 一致, 说明主机在呼叫它, 需发送确认信息给周围的基站, 系统对其进行定位.

3 同步及 TOA 检测

同步的质量直接影响到系统的定位精度, 是系统的关键部分. 在基于能量检测的 TOA 定位系统中, 同步是通过能量积分相关来实现的, 同步电路主要由平方、积分、比较、识别电路以及定时电路组成. 同步时刻的选择由以下几步完成:

(1) 将 T_s 均分成 N 等分, $N = T_s/(M \cdot t_p)$, M 为重复脉冲数, T_s 为 bit 周期.

(2) 以每一等分间隔的起始点为积分起始点, 在 $T_s/2$ 时间间隔内进行积分, 在整个 T_s 内得到 N 个不同

时间区间的积分值: $Z_i = \int_{t_0+iT_s/N}^{t_0+iT_s/N+T_s/2} r^2(t) dt, i = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

(3) 将上述 N 个积分值比较, 找出最大的积分值: $\hat{Z}_{\max} = \max_i (Z_i)$, 其对应的积分起始点为 t_m .

(4) 在下一个 T_s 内, 选择以 t_m 为中心的区间 $[t_m - T_s/2N, t_m + T_s/2N]$, 将其 M 等分, 得到 M 个积分起始点, 在 $T_s/2$ 时间间隔内再进行 M 次积分, 求得最大的积分值 t_{\max} , 此时对应的积分起点即为 bit 同步点; 极窄脉冲串到达的时间为 $t_{\max} - T_s$, 此值即为 TOA 的时间值.

4 定位算法及修正

三维定位至少需要 4 个基站参与对某待定位目标的定位. 假设第 i 个基站从接收呼叫信号到接收确认信号之间的时间为 ΔT_i , 其中第 1 个基站为发出呼叫的主叫基站, 根据图 1 所示的定位过程描述, 可以列出下列方程组

$$\begin{cases} \Delta T_1 = \Delta t_1 + T + \Delta t_1 + t_{\text{off}}, \\ \Delta T_2 = \Delta t_1 + T + \Delta t_2 + t_{\text{off}}, \\ \Delta T_3 = \Delta t_1 + T + \Delta t_3 + t_{\text{off}}, \\ \Delta T_4 = \Delta t_1 + T + \Delta t_4 + t_{\text{off}}, \end{cases} \quad (5)$$

其中 Δt_i 为待定位目标到第 i 个基站之间的信号传播时间; T 为待定位目标接收和发射之间的等待时间 (已知), t_{off} 为待定位目标传感器系统工作时延 (已知). 利用此方程, 可以得到 $\Delta t_i, i = 1, 2, 3, 4$.

考虑室内多径环境. 室内多径信道造成传输信号的时间弥散和延迟, 常用平均扩展时延来表征其信道特性. 扩展时延可以影响系统的数据传输速率以及多用户系统的系统容量, 在定位系统中主要影响系统的定位精度. 平均扩展时延定义为^[14]: $\tau_m = \sum_k a_k^2 \tau_k / \sum_k a_k^2$, 其中, a_k 和 τ_k 分别为第 k 个多径分量的信道增益系数和时延. 为了减小时延扩展对定位的影响, 利用平均时延扩展对波达时间进行修正. 修正后的信号传播时间为: $\Delta \tau_i = \Delta t_i - \tau_m$.

假设已知基站的位置为 (x_i, y_i, z_i) , 待定位目标的位置为 (x, y, z) ,

$$d_i = ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2)^{1/2} = c \Delta \tau_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (6)$$

其中 $\Delta\tau_i$ 为待定位目标到第 i 个基站之间的信号传播时间(修正后). 利用方程(6),可以得到^[9]

$$A\mathbf{p} = \mathbf{b} \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} & z_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} & z_{3,1} \\ x_{4,1} & y_{4,1} & z_{4,1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} g_{2,1} \\ g_{3,1} \\ g_{4,1} \end{bmatrix}$$

其中 $x_{i,1} = x_i - x_1, \quad y_{i,1} = y_i - y_1, \quad z_{i,1} = z_i - z_1,$
 $g_{i,1} = 0.5[(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) + d_1^2 - d_i^2].$

利用线性相关最小均方误差方法求解上述方程^[10],可以得到

$$\hat{\mathbf{p}} = (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{b} \quad (8)$$

$$\Delta\mathbf{p} = \mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T \quad (9)$$

$$\Delta\delta = (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{1/2} / 3 \quad (10)$$

5 仿真分析

为了验证重复脉冲 UWB 系统的定位和通信性能,对系统进行了下列仿真,4 个基站设置在 64 m^2 的实验室中,分别为:(0,0,3),(8,0,3),(0,8,3),(8,8,2). 待定位目标在此 $8 \times 8 \times 3$ 的空间里任意放置或移动. 仿真参数设置见表 1.

表 1 仿真参数设置

参数设置	取值	参数设置	取值
单个脉冲持续时间 t_p / ns	0.7	信道带宽 / MHz	大于 500
复脉冲数 M	50	调制方式	PPM
取样周期 t_s / ns	0.14	ID 码	GOLD
比特周期 T_b / ns	28~280	同步头	6 位(111111)

采用 IEEE802.15.4a 工作组给出的室内信道模型^[15],即在理想无障碍 LOS(CM1)、部分 NLOS(CM3)和完全 NLOS(CM4) 3 种信道中进行仿真,多径信道数为 100. 系统定位误差随信噪比变化曲线如图 3 所示,其中,虚线表示为在 CM1, CM3 和 CM4 信道中定位误差随信噪比变化的曲线,实线表示修正后的情况. 从图中可以看出:(1)无论是修正前或修正后的曲线,CM1,CM3 和 CM4 信道的定位误差在几十到几厘米之间. 同时在 3 种信道中的定位误差曲线较为密集,相差不是很大,说明利用 UWB 重复脉冲和能量检测进行定位,对信道的多径干扰和噪声干扰具有一定的鲁棒性.(2)利用平均时延扩展修正后,定位误差减小了几到十几厘米. 同一种信道定位误差比较,CM4 信道的改进最明显,说明信道特性越差,修正越明显.

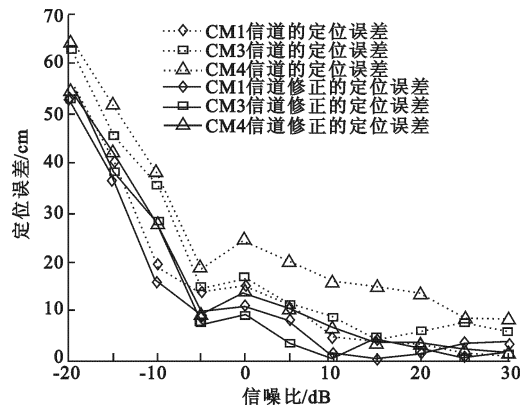


图 3 定位误差随信噪比变化曲线

6 结束语

该系统是基于传感器网络定位要求,即低成本、低功耗、易实现的要求而进行研究的. 重复脉冲的发射使得在不增加 UWB 信号辐射功率的同时使接收信号的能量大为增加,使基于 TOA 的首达波检测变得容易而且较为精确;呼叫应答的定位算法,只需一个信号传输的往返时间(RTT)就可以推算出待定位目标到各基站的信号传输时间,可降低定位测量和计算时间;通过实时测量信道的扩展时延对波达时间进行修正,同

时利用最小均方误差估计,进一步提高了定位估计的精度.仿真结果表明系统对信道的多径干扰具有一定的鲁棒性,在较低信噪比时也能获得较高的定位精度.

参考文献:

- [1] Fontana E J, Eichiey E, Barney J. Communication of UWB Precision Asset Location System[C]//IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies. Reston: IEEE, 2003: 369-373.
- [2] Stoica L, Tiuraniemi S, Rabbachin A, et al. An Ultra Wideband TAG Circuit Transceiver Architecture[C]//IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies. Kyoto: IEEE, 2004: 258-262.
- [3] Rabbachin A, Stoica L, Tiuraniemi S, et al. A Low Cost, Low Power UWB Based Sensor Network[C]//International Workshop on Wireless Ad-Hoc Networks. Oulu: IWWAN, 2004: 64-68.
- [4] Bocquet M, Lovez C, Benlarbi-Delara A. Using Enhanced-TDOA Measurement for Indoor Positioning[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(10): 612-614.
- [5] Shen Xuemin, Guiani M, Le-Ngoc T. Ultra-wideband Wireless Communications and Networks [M]. England: John Weley & Sons Ltd, 2006.
- [6] Choi O D, Stark W E. Performance of Ultra-Wideband Communications with Suboptimal Receivers in Multipath Channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(9): 1754-1766.
- [7] Schroeder J, Galler S, Kyamakya K, et al. NLOS Detection Algorithm for Ultra-wideband Localization[C]//4th Workshop on Position Navigation and Communication, Hannover: WPNC. 2007: 159-166.
- [8] Al-Jazzar S, Jr Caffery J. ML and Bayesian TOA Location Estimators for NLOS Environments[C]//Proceedings of 55th IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1178-1181.
- [9] Wylie M P, Holtzman J. The Non-line of Sight Problem in Mobile Location Estimation [C]//IEEE International Conference on Universal Personal Communications. Piscataway: IEEE Press, 1996: 827-831.
- [10] Crepaldi M, Casu M R, Graziano M. Energy Detection UWB Receiver Design Using a Multi-resolution VHDL-AMS Description[C]//Signal Processing Systems Design and Implementation. Athens: SPIS, 2005: 13-18.
- [11] Huang Y, Benesty J, Elko G W, et al. Real-time Passive Source Localization: a Practical Line-correction Least-squares Approach[J]. IEEE Trans on Speech Audio Process, 2001, 9(8): 943-956.
- [12] Tuffvesson F, Molisch A F. Ultra-wide-band Communication Using Hybrid Matched Filter Correlation Receivers[J]. IEEE Semi-Annual Vehicular Technology Conference (VTC), 2004, 5(1): 17-19.
- [13] Park W Y, Choi S, Lee W C. A Non-coherent UWB Ranging for Precision Asset Location with Considering Simultaneously Operating Piconets[C]//Advanced Communication Technology. The 8th International Conference: 3. Phoenix Park, Korea: ICACT, 2006: 1445-1448.
- [14] Ghavami M, Kohno R. Bearing Estimation with Uniform Resolution in Broadband Environments[C]//Broadband Communications, 2000 International Zurich Seminar. Zurich: IZS, 2000: 93-96.
- [15] IEEE 802.15-TG4a. Miscellaneous Committee, Published 802.15.4 PHY and MAC Specifications[EB/OL]. [2007-01-08]. <http://ieee802.org/15/pub/TG4a.html>.

(编辑: 齐淑娟)