

## 模拟延迟脉冲锁相环的简单非相关 TOA 估计研究\*

刘晓建,郑霖,王智博,廖丁毅

(桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004)

**摘要:** 在基于平方率的能量检测脉冲超宽带通信系统中,采用了较简单的模拟脉冲锁相环实现脉冲信号的同步和到达时间(TOA)的估计。提出了利用模拟延迟锁相环(ADLL)构建一种精确度高、实现简单的 TOA 估计算法;并对该算法性能进行了分析。仿真验证了该方法的有效性,并解决了在非视距(NLOS)环境下的精确测距问题。

**关键词:** 脉冲超宽带;TOA 估计;延迟锁相环

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)10-0091-04

## Research on a simply non-related TOA estimation for ADLL

Liu Xiaojian,Zheng Lin,Wang Zhibo,Liao Dingyi

(Information and Communication Institute,GuiLin University,Guilin 541004,China)

**Abstract:** An IR-UWB(impulse-radio ultra-wideband) communication system of energy detection based on square uses simple analog pulses PLL(Phase Locking Loop) to synchronization and time of arrival(TOA) estimation. In this paper, it presents using the analog delay locked loop (ADLL) to construct the simple and the high precision TOA estimation algorithm; it also analyzed the performance of the algorithm. Simulation results show the effectiveness of the method, also resolves the exact distance estimation in non line of sight(NLOS) environment.

**Key words:** IR-UWB; TOA estimation; delay locked loop(DLL)

由于存在密集多径、高采样率和处理复杂度的困难,基于脉冲能量检测的非相关 TOA 估计算法近年来受到更多的关注<sup>[1-3]</sup>,能量检测不需要 Nyquist 高速率的采样,也不需要相关运算,所以大大降低了算法的运算负荷。基于能量检测的非相关 TOA 估计算法,主要是从能量采样序列中检测到 DP 所在的能量块,常用的算法有基于门限比较(TC)算法、基于能量峰值选择(MES)算法以及回溯门限比较的能量峰值选择(MES-SB)算法。

传统的基于能量检测的非相关 TOA 估计算法都存在不同的缺点。TC 算法和 MES-SB 都要设置合适的阈值门限,而门限因子的估计却很复杂困难;MES 算法选择最强的能量积分块作为 TOA 估计,该算法在 NLOS 环境下存在较大的误差。本文提出了一种基于能量检测利用模拟延迟锁相环的非相关 TOA 估计方法,通过设置延迟支路的衰减因子,使得锁相环稳态锁定点趋于 DP 位

置,该算法简单,不需要高速的采样速率。

## 1 信号模型

设脉冲超宽带信号经过平方器检波接收信号形式为:

$$\hat{u}_i(t) = U_i \sum_{j=1}^{\infty} \Delta(t - jT_f + T_{\theta_j}) + v(t) \quad (1)$$

其中: $\Delta(t)$ 是接收脉冲信号经过平方器的波形,设其波形宽度为 $T_{\Delta}$ ; $T_f$ 为脉冲的帧周期, $T_{\theta_j}$ 是初始脉冲的延迟; $v(t)$ 是加性高斯白噪声 $n(t)$ 经过平方器的加性噪声项,其服从 $\chi^2$ 分布。

当接收到的脉冲信号经过平方器件后,脉冲宽度会展宽,但仍远远小于帧周期 $T_f$ ,以帧周期为参考,将 $\Delta(t)$ 简化为理想脉冲函数 $\delta(t)$ 的形式,得到接收信号的相位表达式:

\* 基金项目:国家自然科学基金(60962001);广西自然科学基金(0731025,0731026,0991018z);广西研究生教育创新计划资助项目(2009105950810M13);广西区重点实验室基金(10910)

应用奇葩

Example of Application

$$u_i(t) = U_i \sum_{n=1}^{\infty} \Delta(t - nT_f + T_{\theta_j}) + v(t) \\ = U_i \sum_{n=1}^{\infty} \delta(t - \frac{2n\pi}{w_1} + \frac{\theta_j}{w_1}) + v(t) \quad (2)$$

其中:  $w_1 = \frac{2\pi}{T_f}$ ,  $\theta_j = \frac{2\pi T_{\theta_j}}{T_f}$ 。

2 TOA 估计算法

基于脉冲锁相环的非相关 TOA 估计算法的原理<sup>[4-5]</sup>是将锁相环稳态锁定点作为信号 TOA 的估计。用于 TOA 估计的模拟一阶锁相环模型如图 1 所示。

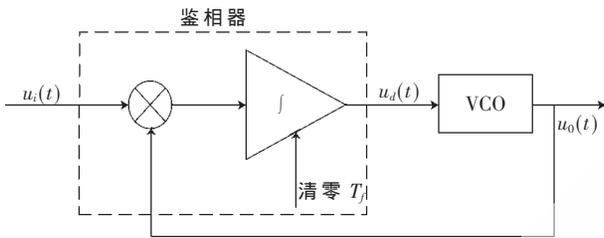


图 1 IR-UWB 模拟一阶锁相环模型

脉冲锁相环中压控振荡器 VCO 的输出  $u_0(t)$  为:

$$u_0(t) = U_0 \sin[w_0 t + \theta_0(t)] = U_0 \sin[w_0 t + (w_0 - w_1)t + \theta_0(t)] \\ = U_0 \sin[w_1 t + \theta_2(t)] \quad (3)$$

其中:  $w_0$  为压控振荡器的自由震荡频率, 接近  $w_1$ ;  $\theta_0(t)$  为受控相位, 其与积分器输出电压  $u_d(t)$  的关系为:  $\theta_0(t) =$

$$K_0 \int_{\tau=0}^t u_d(\tau) d\tau。$$

用于 TOA 估计的锁相环稳态稳定输出的波形如图 2 所示, 模拟脉冲锁相环稳态锁定点作为 TOA 估计。

从图中可以看出, 模拟脉冲锁相环稳态锁定点没有锁定在直达单径的位置, 锁定的位置是在帧周期内积分零点的位置。输入信号  $u_i(t)$  与 VCO 产生的  $u_0(t)$  经过相

乘鉴相器, 得到误差函数  $u_d(t)$ ,  $u_d(t)$  与多径信号时延成比例。当  $u_d(t)$  为零时, 表示输入信号的频率与 VCO 产生的频率相同, 且相位差保持在零点附近, 锁相环稳态锁定点满足:

$$\int_{t=nT_f}^{(n+1)T_f} u_i(t)u_0(t)dt=0 \quad (4)$$

当接收信号是窄脉冲时, 根据上式锁相环稳态锁定点为输入信号的能量平衡位置, 通过检测锁相环 VCO 稳态输出余弦信号的过零点得到直达单径的 TOA 估计。

基于能量检测的延迟锁相环非相关 TOA 估计算法总的脉冲锁相环结构如图 3 所示。

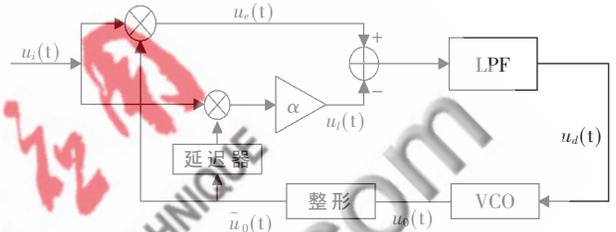


图 3 模拟延迟脉冲锁相环结构

图 3 中, LPF 是传统模拟锁相环中的环路滤波器; VCO 是压控振荡器, 用于产生稳定输出的正弦信号; 两个相乘器分别起到了早支路和迟支路的鉴相作用; 整形模块将 VCO 产生的正弦信号整形为正半周期的信号; 反相、延迟器将 VCO 产生的正半周期正弦信号先反相再延迟半个周期; 在迟支路上加入衰减器, 使得锁相环稳态锁定时能量平衡点趋近于直达单径的位置。

输入信号仍是  $u_i(t)$ , 早、迟支路信号分别为  $u_e(t)$  和  $u_l(t)$ :

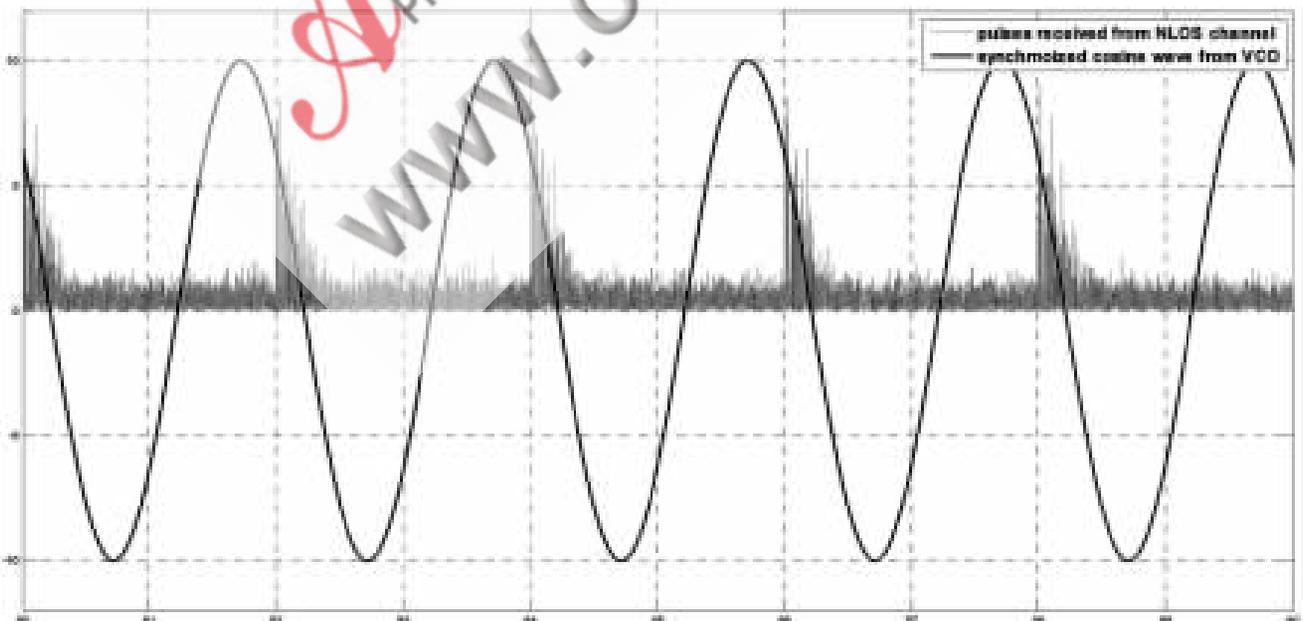


图 2 IR-UWB 脉冲锁相环 TOA 估计稳态

$$\begin{cases} u_e(t) = u_i(t) \tilde{u}_0(t) \\ u_l(t) = \alpha u_i(t) \tilde{u}_0(t - \frac{T_f}{2}) \end{cases} \quad (5)$$

其中  $\tilde{u}_0(t) = u_0(t) \sum_{n=1}^{\infty} g_{rec}(2t - nT_f)$  为压控振荡器 VCO 产生的预先信号  $u_0(t)$  经半波整形得到的仅有正半周期的余弦信号,  $g_{rec}(t)$  是宽度为  $T_f$  的矩形波。

模拟延迟脉冲锁相环跟踪捕获阶段, 误差信号  $u_d(t)$  可以表示为:

$$\begin{aligned} u_d(t) &= \int_{t=nT_f}^{(n+1)T_f} [u_e(t) - u_l(t)] dt \\ &= \int_{t=nT_f}^{(n+1)T_f} u_i(t) [\tilde{u}_0(t) - \alpha \tilde{u}_0(t - \frac{T_f}{2})] dt \end{aligned} \quad (6)$$

### 3 参数设置及性能仿真分析

仿真中, 信道采用了 IEEE 802.15.4a 信道模型中

CM1~CM4 的不同信道。信号的帧周期  $T_f = 200 \text{ ns}$ ; 信噪比  $E_b/N_0 = 5 \text{ dB}$ ; 衰减系数  $0 \leq \alpha \leq 1$ , 衰减系数的确定要根据锁相环跟踪捕获的性能而定, 在仿真中, 衰减系数  $\alpha$  取  $0.6 \sim 1$ 。图 4 是在 CM2 非视距信道下, 衰减系数  $\alpha = 1$  (即没有衰减) 时的锁相环稳态锁定的波形图。从图中可以看出, 锁相环稳态锁定点是能量平衡点的位置, 而能量平衡点位置并不是直达单径 DP 达到的时刻。图 5 是 CM2 信道中, 衰减系数  $\alpha = 0.6$  时锁相环稳态锁定的波形图。从图中可以看出, 由于迟支路加入了衰减器, 能量平衡点的位置趋向于直达单径 DP 达到时刻。

当衰减系数过小时, 锁相环不能进入锁定状态, 由于跳周而发生失锁, 如图 6 所示。这是由于迟支路的负能量衰减过大, 使得正负能量积分不能达到平衡, 从而引起跳周失锁。

对脉冲的延迟进行精确的估计, 要求锁相环输出的

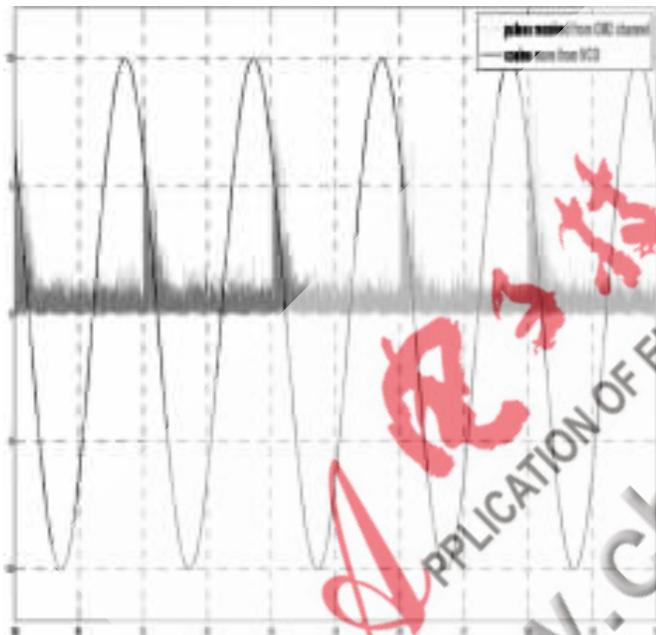


图 4 CM2 中  $\alpha = 1$  锁相环稳态锁定波形

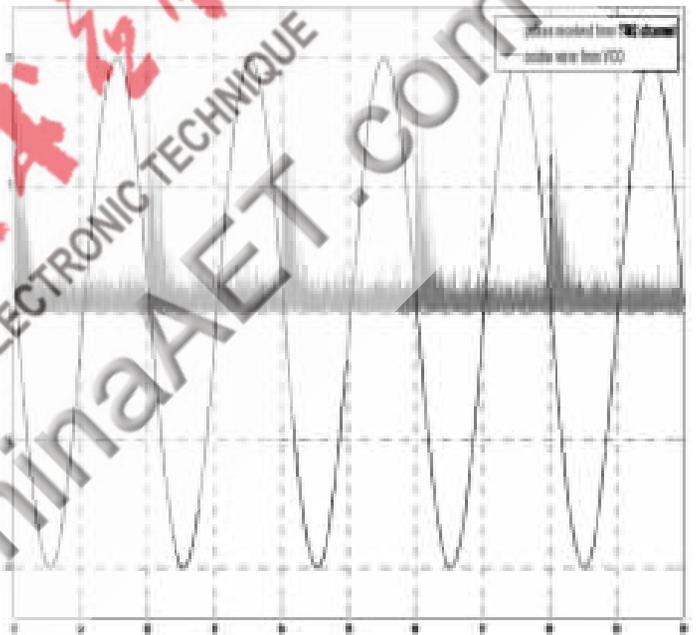


图 5 CM2 中  $\alpha = 0.6$  锁相环稳态锁定波形

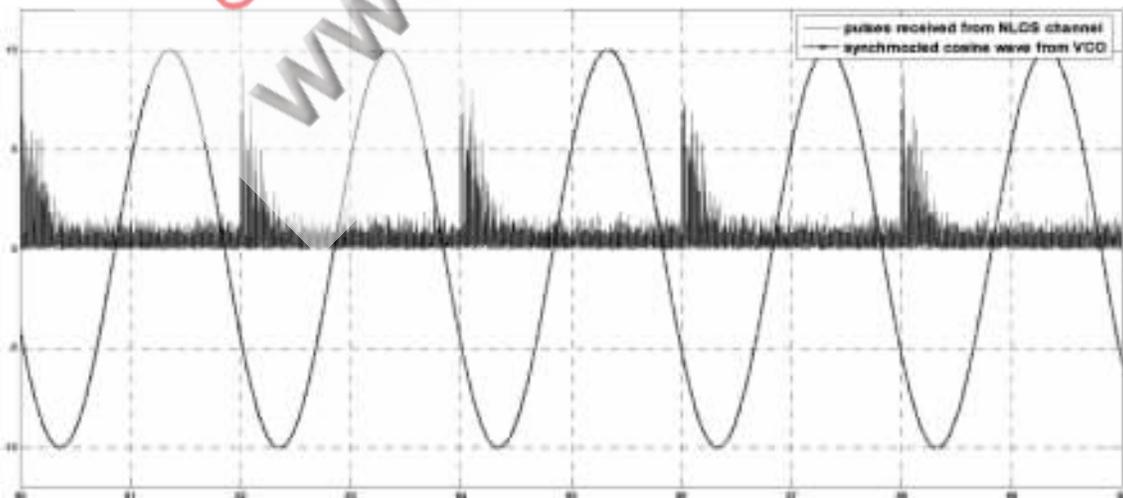


图 6 模拟延迟锁相环跳周而失锁

相位噪声尽可能小。锁相环的环路方程为：

$$s\theta_e(t) = s\theta_1(t) - K \sin\theta_e(t) e^{-j \frac{\dot{\theta}_e(t) T_L}{2}} \quad (7)$$

设  $B_L = \int_0^{B/2} |H(j2\pi f)|^2 df$  为环路的单边噪声带宽, 则有:

$$\sigma_{\theta_2}^2 = \sigma_{\theta_1}^2 \cdot \frac{B_L}{B/2} = \sigma_{\theta_1}^2 \cdot \frac{2B_L}{B} \quad (8)$$

一般条件下,  $B_L \ll B/2$ , 因此  $\sigma_{\theta_2}^2 \ll \sigma_{\theta_1}^2$ , 说明环路对噪声有抑制作用, 有利于提高测距的精度, 且环路带宽越窄, 其对噪声的抑制能力越强, 测距的精度也越高。

在 IR-UWB 测距系统中, 针对接收端要求低复杂度和高精度, 本文提出了基于模拟延迟锁相环的非相关 TOA 估计算法。该算法有很好的噪声抑制能力, 在低信噪比下可以实现高精度的测距应用, 因此具有理论和接近实用的指导价值。通过仿真, 验证了该算法在低信噪比下较好的估计误差性能。

#### 参考文献

[1] 吴绍华, 张钦宇, 张乃通. 新颖的基于门限比较的脉冲超宽带 TOA 估计算法[J]. 通信学报, 2008, 29(7): 7-13.

[2] 张霆延, 张钦宇, 张乃通. 一种基于能量加权检测的 UWB 测距方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1946-1951.

[3] Tian Zhi, GIANNAKIS G.A. GLRT approach to data-aided timing acquisition in UWB radios[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2956-2967.

[4] 郑喆, 郑霖, 郑继禹. 超宽带通信中的 IR-APLL 同步[J]. 桂林电子科技大学学报, 2009, 29(3): 213-216.

[5] DI R M, GRAZIOSI F, SANTUCCI F. A modified delay locked loop synchronizer for ranging-based fine timing acquisition of differential transmitted reference UWB receivers[C]. European Wireless Conference, 2008.

(收稿日期: 2010-11-22)

#### 作者简介:

刘晓建, 男, 1982年生, 硕士生, 主要研究方向: 脉冲超宽带测距。

郑霖, 男, 1976年生, 副教授, 研究生导师, 主要研究方向: 超宽带通信、无线传感器网络、移动通信、自适应信号处理、扩频通信。

王智博, 男, 1986年生, 硕士生, 主要研究方向: 脉冲超宽带测距。

电子技术应用  
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNIQUE  
www.chinaAET.com