

PAM-UWB 信号 LS 同步捕获技术研究

汪颖¹ 徐会彬²

(九江学院电子工程学院 九江 332005)¹ (上海师范大学天华学院电子与信息工程系 上海 201815)²

摘要 针对超宽带(ultra-wideband, UWB)信号的具体特征,利用近完美序列的相关特性,构造了一种训练序列;同时,在此基础上建立了最小二乘估计的 UWB 同步捕获算法。该算法只需要对按比特速率(几 MHz 到几百 MHz)进行采样的结果做简单相关运算就能实现同步参数估计,与传统需要数 GHz 的采样率的同步算法相比,其大大降低了系统复杂度,运算量仅是传统算法的数千分之一,能够快速实现同步。仿真结果表明,该算法在密集多径信道模型下能精确快速地实现同步捕获,使用 12 位训练序列就可实现优良的捕获性能和系统误符号率;当使用 24 位的训练序列时可以很好地逼近理想捕获情况下的系统误码率。

关键词 PPM, 同步捕获, 最小二乘, 近完美序列

中图分类号 TN915 **文献标识码** A

Least Square Timing Acquisition Algorithm for Pulse Amplitude Modulation-ultrawide Band Signals

WANG Ying¹ XU Hui-bin²

(School of Mechatronics Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)¹

(Shanghai Normal University TianHua College, Shanghai 201815, China)²

Abstract A rapid timing acquisition algorithm was proposed in the paper, which is based on least square estimation (LSE), which is developed for UWB (ultra-wideband) communication based designed training symbols. Using almost perfect sequence, a novel training sequence was judiciously designed. Compared to the conventional algorithm with GHz sample rate, the algorithm can realize timing acquisition at receiver using simple correlation operations over the samples at the symbol rate (several MHz to several hundreds MHz), which reduces considerably implementation complexity. The computational efforts of the algorithm is only a third of conventional algorithm. The acquisition performance in the multipath channel was also provided in terms of simulation, which indicates that with a 12-bit training sequences, the scheme achieves a high synchronization performance, when there are 24-bit training sequences, the bit-error-rate (BER) is close to that of the case with perfect.

Keywords PPM, Timing acquisition, Least square, Almost perfect sequence

1 引言

超宽带冲激无线电是近几年才新兴的通信技术,其将成为民用短距离无线通信的一个新的发展方向。这种通信方式以纳秒级的冲激脉冲作为信息载体,摆脱了以正弦载波携带信息的传统的通信方法。它具有带宽宽、平均功率低、处理增益高等特点^[1],在移动无线综合业务以及复杂电磁环境下的数字化战场等军事和商业中得到了广泛的应用^[2]。

然而,与传统窄带通信系统相比,超宽带系统的同步实现难度要大得多^[3],一方面因为 UWB 信号极窄的脉冲导致其时间分辨率很高,而在室内密集多径信道的影响下,这些原本就很低的信号能量被分布到了几十甚至上百条密集路径上^[4,5],这使得 UWB 信号的能量捕获很困难;另一方面,由于 UWB 信号高速传输的特点,使得实现快速可靠的信号同步是保障系统正常通信的关键。

目前已有一些文献对 TH-UWB(time hopping-UWB)信号的同步捕获和搜索算法进行了分析和研究。文献[6]设计

了训练序列,并在此基础上提出了各自的同步捕获算法。虽然用设计的此训练序列可简化算法,但是相关峰值不显著,捕获效果差。文献[7]研究了基于遗传算法的 UWB 信号非相干捕获方法,其需估计信噪比,运算量大。文献[8]中针对 DS-UWB(direct sequence UWB)系统的脉冲同步捕获给出了基于随机序列结合自适应均衡的快速同步算法,该算法以训练序列与判决输出之间的误差最小值为准则,通过可变步长来搜索能量最大区间实现同步。

据 UWB 信号的特性,利用近完美序列设计一种适合 UWB 通信系统的训练序列。在此基础上,采用最小二乘估计对接收信号进行同步捕获。该算法仅按比特速率采样,便可完成同步捕获,大大降低了系统复杂度和运算量。仿真结果表明,该算法可以用短的训练序列获得较高的同步性能。

2 信号模型

在超宽带通信中,每个比特的波形可表示为:

$$g_s(t) = \sum_{j=0}^{N_f-1} g(t-jT_f - y(j)T_c) \quad (1)$$

徐会彬(1982-),男,硕士,讲师,主要研究方向为移动通信,E-mail:xuhuibin188@163.com.

式中, $g(t)$ 为持续时间为 T_m 的脉冲波形, T_f 为帧周期, $T_f = N_f T_c$; 每个比特由 N_f 重复脉冲表示, 则一个比特的持续时间为 $T_s = N_f T_f$, $y(j)$ 为用户的跳时序列, T_c 为码片时间, $T_f = N T_c$, N 为一个帧周期内码片的数目。设单脉冲能量为 $\int g^2(t) dt = 1/N_f$, 则一个比特的能量被归一化了。本文研究数据辅助方式下 PAM-TH-UWB (pulse amplitude modulation-time hopping-UWB) 信号的同步捕获问题, 系统首先发射长度为 K 的训练序列。设 $\{b[n]\}$ 为符号序列, 且 $b[n] \in \{\pm 1\}$, 则发射信号的波形为:

$$s(t) = \sqrt{E_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} b[n] g_s(t - nT_s) \quad (2)$$

式中, E_s 为发射信号功率。

设密集多径信道的多径数目为 L , $\{a_l\}$ 和 $\{\tau_l\}$ 分别为第 l 条路径的增益与延迟, 且 $\tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_{L-1}$, 其中 τ_0 为最早到达路径的延迟。引入路径的相对延迟 $\tau_{l,0} = \tau_l - \tau_0$ 。发射单脉冲波形通过多径信道后的响应为 $h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l g(t - \tau_{l,0})$, 则一个比特波形的响应为:

$$h_s(t) = \sum_{j=0}^{N_f-1} h(t - jT_f - y(j)T_c), t \in [0, T_s) \quad (3)$$

通常情况下, 在观察时间 T_s 内, 信道是稳定的。则发射信号 $s(t)$ 经多径信道后在接收的端所接收信号为 $r(t)$:

$$r(t) = \sqrt{E_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} b[n] h_s(t - nT_s - \tau_0) + \omega(t) \quad (4)$$

式中, $\omega(t)$ 为加性噪声。不失一般性, 首路径时延 τ_0 可表示为 $\tau_0 = n_s T_s + n_f T_f + \beta$, 显然, $n_s = \lfloor \tau_0 / T_s \rfloor \geq 0$ 是符号级时延偏差; $n_f = \lfloor (\tau_0 - n_s T_s) / T_f \rfloor \in [0, N_f - 1]$ 是帧级的时延偏差; 而 $\beta = (\tau_0 \bmod T_f) \in [0, T_f)$ 是脉冲级的时延偏差, 也称为跟踪误差 ($\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算, \bmod 是取模运算)。假设已获得符号级同步, 即 $\tau_0 < T_s$, $n_f = \lfloor \tau_0 / T_f \rfloor$, 因此, UWB 信号的同步捕获问题就是估计参数 n_f 的过程。

接收机为相关接收机, 相关模板信号为 $g_s(t)$ 。对相关结果按比特速率 T_s 采样得到的采样信号 $x[n]$ 为:

$$x[n] = \int_0^{T_s} r(t + nT_s) g_s(t) dt \quad (5)$$

当接收机已实现同步时, 采样信号 $x[n]$ 就是比特符号 $b[n]$ 的判决统计量; 但当接收机还没有完成同步捕获时, 采样值 $x[n]$ 是由相邻两个符号与本地模板的相关值决定的, 因此 $x[n]$ 可表示为^[8]:

$$x[n] = A_\beta \{b[n](N_f - n_f - \lambda_\beta) + b[n-1](n_f + \lambda_\beta)\} + \omega[n], n=0, 1, \dots, K-1 \quad (6)$$

式中, $A_\beta = \sqrt{E_s} \int_0^{T_f} h_s(t + T_f - \beta) g_s(t) dt$, $\lambda_\beta = (1/A_\beta) \int_0^\beta h_s(t + T_f - \beta) g_s(t) dt$, $\lambda_\beta \in [0, 1]$, $\omega[n]$ 是噪声 $\omega(t)$ 与模板信号相关后的采样值, K 为训练序列长度。记 $\psi_{f,\beta} = n_f + \lambda_\beta$, 则 $x[n]$ 可表示为:

$$x[n] = A_\beta \{b[n](N_f - \psi_{f,\beta}) + b[n-1]\psi_{f,\beta}\} + \omega[n] \quad (7)$$

由于 $n_f = \lfloor \psi_{f,\beta} \rfloor$, 同步捕获问题就转化为参数 $\psi_{f,\beta}$ 的估计问题, 即通过估计 $\psi_{f,\beta}$ 的值得到同步捕获参数 n_f 的估计值 \hat{n}_f 。

3 LS 估计算法

本节将分析最小二乘同步捕获算法。先建立关于参数

$\psi_{f,\beta}$ 的线性模型, 然后用最小二乘估计方法估计参数 $\psi_{f,\beta}$ 的值。式(7)可转化为:

$$x[n] = A_\beta b[n] N_f + A_\beta \psi_{f,\beta} (-b[n] + b[n-1]) + \omega[n] \quad (8)$$

式中, 令 $\theta_1 = A_\beta N_f$, $\theta_2 = A_\beta \psi_{f,\beta}$, 则待估计参数 $\theta = (\theta_1 \ \theta_2)$ 。 θ_1 的估计能确定 A_β , 从而 θ_2 的估计就能确定 $\psi_{f,\beta}$ 的值。因此, 参数 $\psi_{f,\beta}$ 的估计就转变为对参数 θ 的估计。令 $x = [x[0] \ x[1] \ \dots \ x[K-1]]^T$, $\omega = [\omega[0] \ \omega[1] \ \dots \ \omega[K-1]]^T$, 则采样信号模型用矢量表示为:

$$x = Y\theta^T + \omega$$

$$= \begin{bmatrix} b[0] & -b[0] + b[-1] \\ b[1] & -b[1] + b[0] \\ \dots & \dots \\ b[K-1] & -b[K-1] + b[K-2] \end{bmatrix} \cdot (\theta_1 \ \theta_2)^T + \omega \quad (9)$$

假设 $y_1 = [b[0] \ b[1] \ \dots \ b[K-1]]^T$, $y_2 = [b[-1] \ b[0] \ \dots \ b[K-2]]^T$, $Q = [y_1 \ y_2]$, $P = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 则 $Y = QP$ 。

设参数 θ 的 LS 估计为 $\hat{\theta}$, 由线性最小二乘估计的几何意义^[9] 可知:

参数 θ 的 LS 估计为:

$$\hat{\theta} = (Q^T Y)^{-1} Q^T x \quad (10)$$

式中, $Q^T Y = Q^T Q P = [y_1 \ y_2]^T [y_1 \ y_2] P = \begin{bmatrix} y_1^T y_1 & y_1^T y_2 \\ y_2^T y_1 & y_2^T y_2 \end{bmatrix} P$ 。

在式(10)中需求 $(Q^T Y)^{-1}$, 为了简化运算, 令 $y_1^T y_2 = y_2^T y_1 = 0$, 为了保证这一点, 需设置合理的训练序列。由于 $y_1^T y_1 = \sum_{n=0}^{K-1} b^2[n] = K$, $y_2^T y_2 = \sum_{n=0}^{K-2} b^2[n] = K-1$, 因此可得:

$$Q^T Y = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K-1 \end{bmatrix} P \quad (11)$$

将其代入式(10)并简化计算可得:

$$\hat{\theta}_1 = \hat{A}_\beta N_f = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} b[n] x[n] + \frac{1}{K-1} \sum_{n=0}^{K-1} b[n-1] x[n] \quad (12)$$

$$\hat{\theta}_2 = \hat{A}_\beta \psi_{f,\beta} = \frac{1}{K-1} \sum_{n=0}^{K-1} b[n-1] x[n] \quad (13)$$

通过式(12)和式(13)可得到参数 $\psi_{f,\beta}$ 的估计 $\hat{\psi}_{f,\beta} = N_f \hat{\theta}_2 / \hat{\theta}_1$, 最后通过 $\hat{n}_f = \lfloor \hat{\psi}_{f,\beta} \rfloor$ 得到同步参数 n_f 的估计。

从上述分析可知, 该算法成立的前提条件为 $y_1^T y_2 = y_2^T y_1 = 0$, 训练序列必须满足此条件。同时从式(12)和式(13)可以得到, 捕获性能的好坏取决于训练序列的特性。为此选择良好的自相关特性的近完序列作为捕获的训练序列。

近完美序列是一种优良的二元伪随机序列, 其异相自相关只有一个非零值, 其他值均为零^[10-13]。若周期为 n 的近完美序列 $C = (c_i)_{i \in \mathbb{Z}_n}$, 对于每一个 $i \in (0, n-1)$ 都有 $c_{i+n} = c_i$, 序列 C 的向量表达式为 $(c_0, c_1, \dots, c_{n-1})$, 其自相关函数表达式为:

$$R(\tau) = \sum_{i=0}^{n-1} c_i c_{i+\tau} = \begin{cases} n, & \tau = 0 \pmod{n} \\ 4-n, & \tau = n/2 \pmod{n} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

可以看出,近完美序列的异相自相关唯在 $\tau=n/2$ 处有一个非零值,其他位置的旁瓣都为零。如码长为 36 的近完美序列 $C_{36}=[000100001101000100111011110010111010]$,其自相关函数值如图 1 所示。其自相关值具有 3 值特性,3 值分别为 36、0、-32,与式(3)的结果一样。

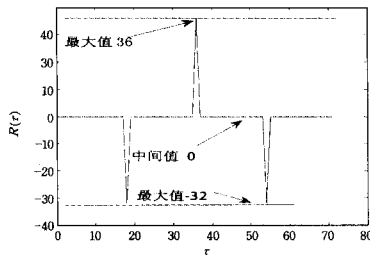


图 1 36 位的近完美序列的自相关值

4 仿真

将以上所述的同步算法在 PPM-TH-UWB 系统中进行性能仿真分析。以高斯脉冲的二阶导为信号脉冲,脉冲持续时间 $T_m=1\text{ns}$ 。帧周期 $T_f=20\text{ns}$,每个比特映射 10 个波形,即 $N_f=10$ 。码片时间 $T_c=1\text{ns}$ 。在仿真实验中,采用 IEEE 802.15.3a 工作组推荐的 UWB 室内信道模型 CM1。

首先,以长度为 8、24、36 的近完美序列作为训练序列,对同步估计结果的均方差(MSE)进行仿真。仿真结果如图 2 所示。仿真结果表明,SNR 越大,估计性能越好。训练序列长度越长,估计均方差也越小。从理论的角度来说,可通过增加训练序列的长度来保证系统在恶劣信道环境下的同步性能,但是,不能无限制地增大训练序列长度,同步的估计性能与训练序列的长度并不成正比关系,且训练序列长度越长,系统的传输效率就越低。因此需要在估计性能和训练序列长度 K 之间进行折衷考量。同时,仿真了不同训练序列长度下采用本算法实现同步对系统误码率的影响,并与理想同步捕获的系统误码率进行了比较。仿真结果如图 3 所示。结果表明,SNR 越大,训练序列越大,系统误码率越小。当 $K=36$ 时,系统性能接近理想同步的性能。

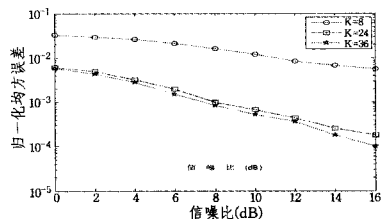


图 2 同步捕获 MSE 与信噪比关系示意图

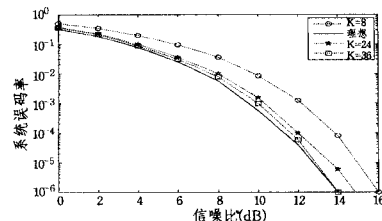


图 3 系统误码率与信噪比关系示意图

结束语 本文针对 UWB 同步捕获问题进行了深入的分析研究。根据 UWB 信号的具体特征,充分利用近完美序列的相关特性,构建训练序列。在此基础上建立了一种基于 LS 准则的 UWB 同步捕获算法,并对其性能进行了仿真和分析。该算法的采样率为符号速率,避免了高达数 GHz 的采样速率,从而大大降低了同步实现的复杂性,能够实现快速同步。仿真结果表明,在较短训练序列的情况下,利用该算法就可以达到较高的同步性能;当训练序列较长时,采用本算法的系统误码率与理想捕获情况下的系统误码率相差无几,因此该算法具有优良的性能。

参考文献

- [1] Witrisal K. Noncoherent ultra-wideband systems[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(4): 48-66
- [2] Yang L, Giannakis G B. Ultra-wideband communications; an idea whose time has come[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(6): 26-54
- [3] Win M Z, Scholtz R A. Ultra-wide bandwidth timehopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple access communications EJ[J]. IEEE Trans Commun, 2000, 48(4): 679- 691
- [4] Zhuang W, Shen X, Bi Q. Ultra-wideband wireless communications [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2003, 3(6): 663-685
- [5] Li Yu-hong, Ge Ning, Lu Jian-hua. Performance Evaluation of a single Carrier UWB System with MSE Channel Estimation[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 19(1): 150-154
- [6] Renzo D, Aannoni M. A novel class of algorithms for timing acquisition of differential transmitted reference UWB receivers; Architecture, performance analysis and system design [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 6(7): 2368-2387
- [7] 杨志华,张钦宇,张乃通. 基于遗传算法的 UWB 信号非相干捕获方法[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1568-1573
- [8] 汪一鸣,朱洪波. 一种基于自适应的 DS-UWB 同步捕获方法 [J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1148-1152
- [9] Steven M, Kay. Fundamentals of Statistical Signal Processing Volume I: Estimation Theory. Volume II: Detection Theory [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 182-225
- [10] Wolfman J. Almost perfect autocorrelation sequences[J]. IEEE Trans. on Inf. Theory, 1992, 38(4): 1412-1418
- [11] Wah P K S. Construction of binary almost perfect sequences based on extend cyclic difference sets[A]//International Zurich Seminar on Broadband Communication[C]. 1998: 243-248
- [12] Weng G, Cheng X. Binary almost-perfect sequence sets [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(7): 3594-3604
- [13] Chang Z, Sun L. The structure of ZCZ sequences based on the almost perfect sequence[C]// 2010 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, CiSE 2010. Wuhan, China, July 2010: 237-244