

文章编号:1004-9037(2012)01-0101-04

基于线性回归的 UWB 系统频偏估计算法

方绍峡 金德鹏 苏 厉 曾烈光

(清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室,北京,100084)

摘要:提出了一种利用接收序列与本地 PN 序列的相关值辐角的线性回归来估计 UWB 系统载波频偏的方法,该算法将接收序列与本地 PN 作相关,利用辐角随时间的线性变化特性,将相关值辐角作线性回归估计频偏。仿真结果表明,与传统 PN 相关频偏估计算法相比,该算法性能稳定,在有效估计区间内估计精度不受频偏大小影响,抗多径能力强,在低信噪比仍有较高的估计精度。此外,此算法与系统同步使用相同的 PN 序列与相关计算结果,节约了系统资源,易于实现。

关键词:频偏估计;线性回归;PN 序列;超宽带

中图分类号: TN92

文献标识码: A

Novel Frequency Offset Estimation Algorithm Based on Linear Regression in UWB System

Fang Shaoxia, Jin Depeng, Su Li, Zeng Lieguang

(State Key Laboratory on Microwave and Digital Communication, Electrical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract: A novel frequency offset estimation algorithm based on the linear regression is presented. The frequency offset estimation is converted to the estimation of argument increment which satisfies the linear relationship. The algorithm correlates the signal received with local pseudo noise (PN) sequences, and then calculates the frequency offset based on the linear regression of arguments of correlation results. Simulation results indicate that the algorithm has an advantage of accurate estimation over multi-path channels and excellent performance of channel noise suppression. The accuracy of the algorithm is not sensitive to the frequency offset in the effective range. Moreover, the algorithm reduces system resources by sharing the same PN sequence and correlation results with PN synchronization. Besides, it can be easily implemented.

Key words: frequency offset estimation; linear regression; pseudo noise sequence; ultra-wide-band

引 言

在 UWB 系统通信中,接收机首先需要迫使本地扩频序列与接收到的扩频序列同步,即进行扩频码的捕获。捕获主要是利用 PN 码尖锐的自相关性。由于接收机与发射机晶振存在频差,从而导致接收信号存在频偏^[1-4],在高速系统中该因素影响更为明显。以清华大学单载波超宽带系统为例,载

波 6.6 GHz,频偏 10 ppm(part per million,百万分率),码片速率 300 MHz,PN 序列长度 127,则一个 PN 序列偏移角度为: $6.6 \times 10^9 \times 10 \times 10^{-6} \times \frac{1}{300 \times 10^6} \times 127 \times 360^\circ = 10.05^\circ (0.1754 \text{ rad})$ 。

假设帧头 24 个 PN 序列,则偏移角度约为 240°,因此对于 UWB 高速系统而言,精确的载波估计和补偿尤为重要。

常见的 PN 频偏估计算法是利用接收到

基金项目:国家高新技术研究发展计划(“八六三”计划)(2009AA011205)资助项目;国家科技重大专项基金(2009ZX03006-007-02,2010ZX03004-002-02)资助项目;国家自然科学基金(60928001,60972019)资助项目。

收稿日期:2011-03-04;**修订日期:**2011-05-06

Preamble 序列与本地 PN 作相关,并利用相关结果的辐角估计载波频偏^[1-7]。本文在此基础上提出改进的利用辐角线性递增关系的线性回归估计方法,仿真结果表明在低信噪比及多径情况均有较高估计精度。

1 基于相关值辐角线性回归的频偏估计算法

系统模型为

$$y[n] = \sum_{i=0}^{L-1} (h[i]c[n-i])\exp(j2\pi\Delta f n + \theta) + w[n]$$

式中: $y[n]$ 为接收到序列; $h[n]$ 为信道冲激响应(L 为信道冲激响应长度); $c[n]$ 为 PN 序列为复高斯白噪声; θ 为载波初始相偏; Δf 为要估计的频偏归一化值。假设本地 PN 序列已与接收信号主径对齐。

考虑加性高斯白噪声(Additive white Gaussian noise, AWGN)信道下,系统模型化为

$$y[n] = c[n]\exp(j2\pi\Delta f n + \theta) + w[n] \quad (1)$$

对 $y[n]$ 与本地 PN 序列 $c[n]$ 作相关,则有

$$R[k] = \sum_{n=0}^{M-1} c[n+kM]y^*[n+kM] = \exp(-j2\pi\Delta f kM - \theta) \sum_{n=0}^{M-1} |c[n]|^2 \cdot \exp(-j2\pi\Delta f n) + \sum_{n=0}^{M-1} c[n]w^*[n+kM] \quad (2)$$

式中: M 为 PN 序列长度,故 $c[n+kM]=c[n]$; $R[k]$ 表示本地 PN 序列与第 k 段接收序列的相关。

定义 $R[k]$ 的辐角值为 Φ_k , φ_k 为 $\sum_{n=0}^{M-1} c[n]w^*[n+kM]$ 项产生的相位噪声,则有

$$\Phi_{k+1} - \Phi_k = 2\pi\Delta f M + \varphi_{k+1} - \varphi_k \quad (3)$$

可见, $R[k]$ 相位随时间线性递增,每 PN 序列持续时间相角约增加 $2\pi\Delta f M$,从而可用线性回归估计频偏。由相关值求辐角的计算利用 CORDIC 算法易于在 FPGA 上实现。

Φ_k 理论上应满足线性关系

$$\Phi_k = 2\pi\Delta f M \cdot k + \Phi_0$$

由于辐角范围为 $[-\pi/2, +\pi/2]$,实际实现中需要进行 $\pm\pi/2$ 跳变纠正以使相位在 $(-\infty, +\infty)$ 连续。

定义

$$\lambda_k = \Phi_k - \Phi_0 = \arg\{R[k]R^*[0]\} \quad (4)$$

则 $\lambda_k = 2\pi\Delta f M \cdot k$ 与 k 也满足线性关系。选用 λ_k 而

非 Φ_k 作线性回归,是为了消除出现起始相偏 Φ_0 位于 $\pm\pi/2$ 附近且频偏非常小时出现的相位反复跳变情形。

设共作了 N 段 PN 序列相关,则由线性回归分析,可得 Δf 估计值

$$\Delta\hat{f} = \frac{1}{2\pi M} \cdot \frac{\sum_{i=0}^{N-1} i \cdot \lambda_i - \frac{\sum_{i=0}^{N-1} i \sum_{i=0}^{N-1} \lambda_i}{N}}{\sum_{i=0}^{N-1} i^2 - \frac{(\sum_{i=0}^{N-1} i)^2}{N}} \quad (5)$$

又因为

$$\Phi_{k+1} - \Phi_k = \Delta f_c \cdot T_{\text{chip}} \cdot 2\pi M = \Delta f_c \cdot \frac{1}{R_c} \cdot 2\pi M \quad (6)$$

结合式(3),可得载波频偏估计值

$$\Delta\hat{f}_c = \Delta\hat{f} \cdot R_c \quad (7)$$

式中: Δf_c 为实际载波频偏; $\Delta\hat{f}$ 为式(5)得出的归一化频偏; R_c 为码片速率; M 为 PN 序列长度。此即为基于 PN 序列相关值辐角线性回归的频偏估计算法。对于给定的样本点数,上述算式分子均为常数,方便硬件实现。

考虑到辐角求反正切时在 $\pm\pi/2$ 存在跳变,为使角度变化可分辨, $\Phi_{k+1} - \Phi_k$ 应当满足

$$|\Phi_{k+1} - \Phi_k| \leq \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

式(8)结合式(6),可得本文算法的频偏估计范围理论值

$$|\Delta\hat{f}_c| \leq \frac{R_c}{4M} \quad (9)$$

2 仿真结果

本节分别在 AWGN 信道及多径信道下,对文献[1]中的两种算法(自相关算法、累加算法)和本文算法进行比较分析。

以清华大学单载波超宽带系统(SC-UWB)为例,设定 PN 序列数目 $N=16$,载波频率 $f_c=6.6$ GHz,码片速率 $R_c=300$ Mc/s,PN 序列长度 $M=127$ 。

系统帧结构如图 1 所示。

(1)对于本文算法,频偏估计表达式可化为

$$\Delta\hat{f} = \frac{1}{2\pi \cdot 127} \cdot \frac{\sum_{i=0}^{15} i\lambda_i - 7.5 \sum_{i=0}^{15} \lambda_i}{340} \quad (10)$$

由式(9),可得本文算法载波频偏估计范围

$$|\Delta\hat{f}_c| \leq \frac{R_c}{4M} = 590.6 \text{ kHz} \quad (11)$$

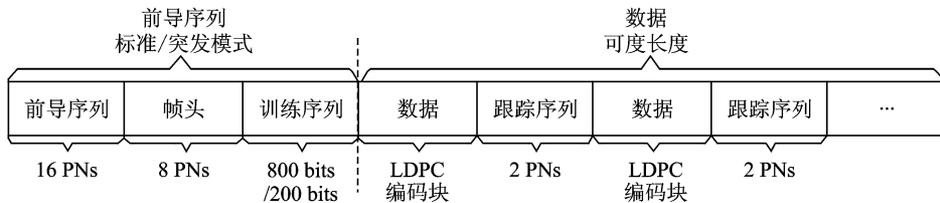


图1 帧结构示意图

(2)文献[1]中自相关算法设定:自相关求和长度 $K=127$,自相关延时 $l=127$,与此对应,累加算法的累加长度 $K=127$,累加时间间隔取 $l=127$;此时累加算法即等价于文献[2]中的 Improved Moose Algorithm 算法。

在此设定下,文献[1]算法理论估计范围与本文线性回归算法一致: $|\Delta\hat{f}_c| \leq 590.6 \text{ kHz}$ 。

2.1 AWGN 信道仿真

图2给出了载波频偏1 ppm(即频偏6.6 kHz)下,上述算法归一化频偏估计值 $\Delta\hat{f}$ 的均方根误差(Root mean square error, RMSE)随 E_b/N_0 变化曲线。由图可知,随信噪比减小,估计方差增大。在该UWB系统设定下,本文算法RMSE比自相关算法、累加算法约小一个数量级。

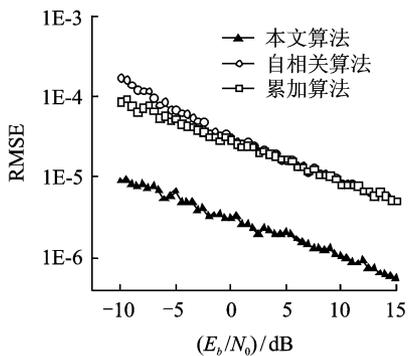


图2 AWGN信道下归一化频偏估计值RMSE曲线

图3给出了AWGN信道中, $E_b/N_0 = -10 \text{ dB}$ 时,载波频偏从 -990 kHz 变化到 990 kHz (即 $-150 \sim 150 \text{ ppm}$,取100个频点,每个频点仿真100次)的实际载波频偏估计值均值曲线。由图可知,本文算法与文献[1]两种算法实际有效估计区间大约为 $(-500, 500) \text{ kHz}$ 。

图4为AWGN信道 $E_b/N_0 = -10 \text{ dB}$ 时,归一化频偏估计值 $\Delta\hat{f}$ 的均方根误差(RMSE)随载波频偏变化曲线。由图可见,在载波频偏较小(约 $\leq 300 \text{ kHz}$)时,估计误差最小,且不随频偏改变,随着载波频偏逐渐接近估计区间边界,估计误差迅速

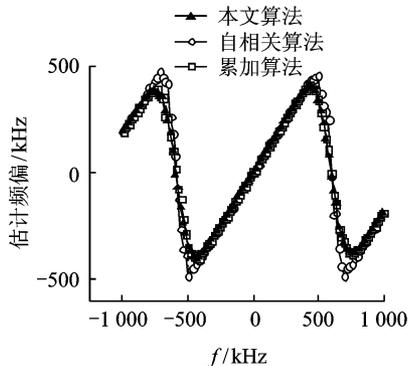


图3 AWGN信道频偏估计值与载波频偏关系曲线

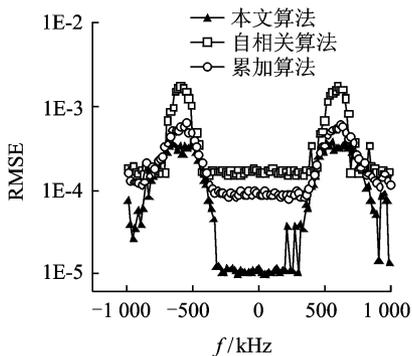


图4 AWGN信道归一化估计频偏RMSE与载波频偏关系曲线

增大,在边界频率附近达到最大。本文算法在估计区间内方均根误差约为 $1\text{E-}5$,比自相关算法、累加算法约小一数量级。

2.2 多径信道仿真

多径信道环境选为与文献[1]相同的多径信道模型

$$h[n] = \delta[n] + 0.1336\delta[n-1] + 0.907\delta[n-17] + 0.0516\delta[n-23] + 0.041\delta[n-43] + 0.1655\delta[n-44] + 0.0973\delta[n-45] \quad (12)$$

仿真结果表明,在多径信道条件下线性回归算法性能与AWGN信道下相似,表明其具有良好的抗多径干扰能力。由图5~7可知,多径信道对估计算法的主要影响有方均根误差(RMSE)增大、有效

估计区间减小、估计区间内估计误差起伏增大等。

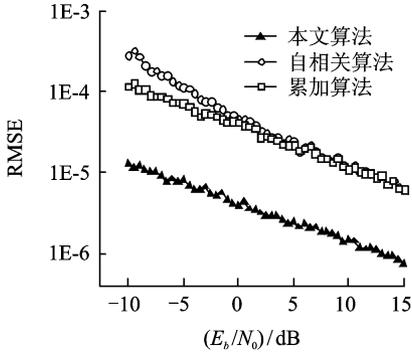


图 5 多径信道下归一化频偏估计值 RMSE 曲线

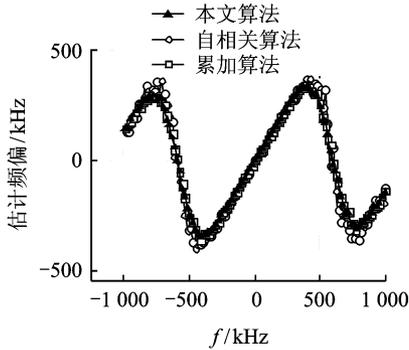


图 6 多径信道频偏估计值与载波频偏关系曲线

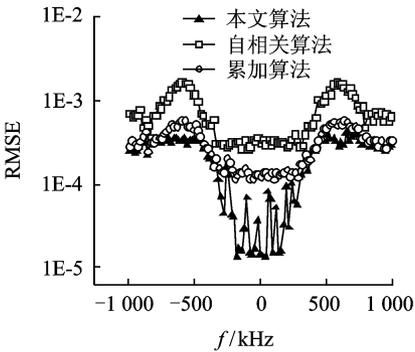


图 7 多径信道下归一化频偏估计值 RMSE 曲线

3 结束语

本文利用存在载波频偏情况下 PN 相关值辐角随时间线性变化特点,提出了一种利用接收序列与本地 PN 的相关值辐角的线性回归来估计频偏的方法。仿真结果表明,该算法估计性能稳定,在有效估计区间内精度稳定,不受频偏大小影响,在低信噪比下仍有较高的估计精度,且具有较好的抗多径能力。由于该算法与系统同步使用相同的 PN 序

列与相关计算结果,节约了系统资源,易于实现。

参考文献:

- [1] 许奥林,王军,彭克武,等. TDS-OFDM 系统两种载波频偏估计算法及对比[J]. 电视技术,2007,31(12):7-10.
Xu Aolin, Wang Jun, Peng Kewu. Evaluation of two carrier frequency offset estimation algorithms in TDS-OFDM systems[J]. TV Technologies, 2007, 31(12):7-10.
- [2] Wang Xuejing, Liu Liang, Ye Fan, et al. A novel synchronizer for OFDM-based UWB system on new preamble design[C]//PIMRC the 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC' 07). Athens: PIMRC, 2007:1-5.
- [3] 江海,周世东. 基于 PN 序列的频偏估计算法[J]. 网络与通信,2006,22(33):129-131.
Jiang Hai, Zhou Shidong. A novel frequency offset estimation algorithm based on PN sequence[J]. Network and Communication, 2006,22(33):129-131.
- [4] 侯永宏,杨刚,王安国,等. 时域同步正交频分复用系统的频偏估计[J]. 西安交通大学学报,2009,43(12):101-103.
Hou Yonghong, Yang Gang, Wang Anguo, et al. Frequency deviation estimation for TDS-OFDM system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(12):101-103.
- [5] Moose P. A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction [J]. IEEE Trans Comm, 1994,42(10):2908-2914.
- [6] Rezeki M. Reduced complexity feedforward frequency offset estimator for AWGN communication channels [J]. IEEE 14th International Conference on DSP, 2002(2):1313-1316.
- [7] Luise M. Carrier frequency recovery in all-digital modems for burstmode transmissions [J]. IEEE Trans Communications, 1995,43(2):1169-1178.

作者简介:方绍峡(1987-),男,硕士研究生,研究方向:超宽带系统同步算法与 ASIC 实现,E-mail:fsx09@mails.tsinghua.edu.cn;金德鹏(1972-),男,教授,博士生导师,研究方向:无线通信及数据传输;苏厉(1976-),男,讲师,硕士生导师,研究方向:通信网络与 SoC;曾烈光(1947-),男,教授,博士生导师,研究方向:通信网络专用芯片设计。