

存在大频偏时的时间频率同步方法

田园, 雷霞, 肖悦, 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 611731)

【摘要】传统基于互相关的时间同步方法中的目标函数峰值尖锐, 便于捕获准确的时间延迟点, 但是其性能易受收发机间频率偏移的影响。将恒模零自相关序列作为训练序列, 以互相关方式为基础, 提出一种适用于存在大频偏情况下的时间、频率同步方法。在相关峰的搜索过程中, 与传统方法相比, 该方法不增加额外的算法复杂度。大范围的频偏估计同样是在时域通过滑动互相关搜索完成, 其具有良好的估计性能, 且性能不受频偏大小的影响。仿真表明, 该方法同时适用于AWGN信道和衰落信道。

关键词 恒模零自相关序列; 互相关; 频率估计; 同步; 时间延迟

中图分类号 TN911

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.02.008

Time and Frequency Synchronization in the Presence of Large Frequency Offset

TIAN Yuan, LEI Xia, XIAO Yue, and LI Shao-qian

(National Key Lab of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Conventional cross-correlation based time synchronization methods have sharp correlation peaks, which make it easy to get the exact time delay point. But their performances are vulnerable to the frequency offset between the transmitter and the receiver. By taking the constant amplitude zero auto correlation (CAZAC) sequences as the training sequences, a cross-correlation based time and frequency synchronization method is proposed, which can work with a large frequency offset. Compared with the conventional methods, no extra computational complexity is introduced in the process of searching the correlation peak. The estimation of the large frequency offset is also performed by sliding cross-correlation and is independent of the frequency offset. Simulations show the method is applicable to both AWGN channel and fading channel.

Key words CAZAC sequence; cross-correlation; frequency estimation; synchronization; time delay

传统利用训练序列进行时间同步的方法中, 大多数是基于相关的, 它们大致可以分为两类: 一类是基于自相关的方法^[1-3], 训练序列为重复序列, 接收机将接收信号序列进行延迟自相关, 通过自相关峰判定时间同步位置。该类算法的优点是算法复杂度低, 缺点是相关峰不尖锐, 在低信噪比和衰落信道中, 很难确定准确的同步位置。另一类是互相关方法^[4-6], 接收机将接收信号序列与本地已知的训练序列进行滑动互相关, 这样在时间同步点能够得到尖锐的相关峰, 易于判定准确的同步位置, 性能明显优于第一类方法。但是该方法也有缺点, 一是计算复杂度相对较高, 二是收发机间较大的频率偏移会使接收信号中的训练序列产生递增的相位旋转, 从而破坏其与接收机本地序列之间的相关性。随着

DSP、FPGA等硬件水平的飞速发展, 越来越多较高复杂度的算法能够用于实践, 大的频率偏移就成为制约互相关方法的主要因素。

针对存在大频偏的情况, 文献[7-8]提出采用自相关的方法进行时间粗同步, 再对频偏进行估计并补偿, 最后采用互相关的方法确定时间精同步点。虽然该类方法可以使互相关运算避免遭受频偏的影响, 但是其用于时间粗同步的自相关方法由于相关峰不尖锐, 存在较大的虚警与漏报概率, 影响整体的同步性能。文献[9-11]直接将自相关与互相关同时引入目标函数, 解决了时间同步相关峰不尖锐及易受频偏影响的问题, 其中文献[11]的方法计算复杂度相对较低, 且能同时完成大范围的频偏估计, 是目前最简单实用的方法。该方法利用了m序列循环移

收稿日期: 2010-08-04; 修回日期: 2011-11-09

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX03005-003); 国家863高技术研究发展计划(2009AA01Z236); 国家自然科学基金(60602009, 60902026)

作者简介: 田园(1977-), 男, 博士生, 主要从事正交频分复用和入多出系统同步方面的研究。

位相加的特殊性质——一个 m 序列循环移位后与原序列做模二加法(即做相关运算), 所得到的序列仍是原序列的循环移位序列。在通过互相关确定了训练序列位置以后, 该方法将接收信号延迟自相关来估计并补偿粗频偏, 而后用传统方法进行准确的时间同步位置估计和精频偏估计。但是文献[11]的方法也存在不足, 其粗频偏估计性能与延迟自相关的延迟距离有关, 延迟越大, 估计越准确, 但是估计范围越小; 延迟越小, 估计误差越大, 估计范围越大。虽然文献[11]提出利用迭代的方式, 先估计大范围的频偏, 而后逐渐加大延迟距离来提高估计精度。但是, 仿真表明, 在较低信噪比(signal to noise ratio, SNR)的衰落信道中, 该迭代方法无法收敛到所需的准确范围, 从而对后续的时间同步位置估计和精频偏估计也会产生影响。

本文提出一种基于互相关、且适用于存在大频偏时的时间、频率同步方法。其中, 训练序列由特殊的恒模零自相关(CAZAC)序列组成, 该序列受到大频偏影响时, 会在时域产生相应的循环移位。接收机首先通过滑动互相关进行时间同步和大范围粗频偏估计, 而后利用训练序列的重复性完成精频偏估计。本文时间同步和粗频偏估计的性能不受大频偏的影响, 在衰落信道中仍能达到良好的性能。

1 频率偏移对基于互相关的时间同步性能的影响

基于互相关的时间同步基本形式, 是将包含训练序列 $c(k)$ 的接收信号序列 $r(m)$ 与接收机本地序列 $c(k)$ 做滑动相关:

$$R(m) = \sum_{k=0}^{K-1} r(m+k)c^*(k) \quad (1)$$

式中, K 为相关器长度。时间同步点的位置由 $|R(m)|$ 或 $|R(m)|^2$ 的峰值位置决定。当存在时间偏移 τ 和频率偏移 w 时, 接收信号为:

$$r(m) = c(m-\tau)e^{j2\pi mw} + n(m) \quad (2)$$

式中, $n(m)$ 为加性噪声。频率偏移 w 将会破坏接收信号中的训练序列与本地序列之间的相关性, 削弱相关峰。

图1所示为频率偏移对式(1)中时间同步互相关峰 $|R(\tau)|$ 的影响, 其中相关器长度为63, 此处未加噪声。频率偏移对相关峰的影响是显而易见的。因此, 在用互相关方法进行时间同步时, 必须采取措施克服频率偏移的影响。

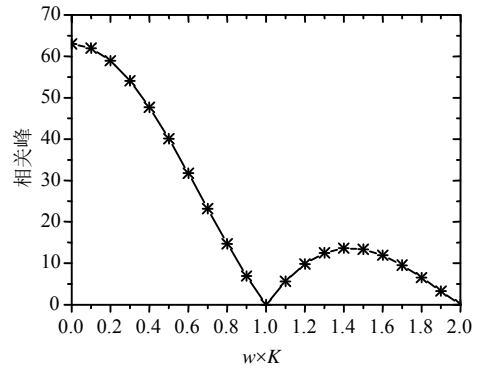


图1 频率偏移对时间同步互相关峰的影响

2 频率偏移对CAZAC序列的影响

首先, 构建一个长度为 L 的CAZAC序列 $c_1=[c_1(0), c_1(1), \dots, c_1(L-1)]^{[12]}$, 其中:

$$c_1(k) = \exp\left(\frac{j\pi(L-1)k^2}{L}\right) \quad (3)$$

令频率偏移为 $w = (\theta + \varepsilon)/L$, 其中, θ 为整数, $\varepsilon \in [-0.5, 0.5]$ 为小数。后文均将 θ 称为整数频偏, 将 ε 称为小数频偏。则带有频偏的CAZAC序列为:

$$c'_1(k) = c_1(k) \exp(j2\pi wk) = c_1(k) \exp\left(j\frac{2\pi\theta k}{L} + j\frac{2\pi\varepsilon k}{L}\right) \quad (4)$$

同时, 由式(1)可以得到:

$$c_1(k-\theta) = \exp\left(j\frac{\pi(L-1)(k-\theta)^2}{L}\right) = A c_1(k) \exp\left(j\frac{2\pi\theta k}{L}\right) \quad (5)$$

其中,

$$A = \exp\left(j\frac{\pi(L-1)\theta^2}{L}\right) \quad (6)$$

A 与 k 无关。比较式(4)和式(5)可以发现, 整数频偏 θ 会使CAZAC序列 c_1 循环移位 θ 个符号。这意味着, 如果将 c_1 重复后作为训练序列发送, 即使收发两端存在较大的频率偏移, 在接收端仍然能接收到完整的序列 c_1 (小数频偏 ε 对序列的相关性影响有限, 由图1可以看到, 当 $\varepsilon = \pm 0.5$ 时, 所导致的相关峰幅度衰减最大, 衰减幅度为36.33%)。

3 基于CAZAC序列的时频同步方法

3.1 同步训练序列

上述CAZAC序列的特性, 以及CAZAC序列良好的自相关特性^[13], 使得即使存在较大的频率偏移时, 仍能通过互相关的检测方式估计时间偏移 τ , 同时可以在时域通过互相关方式估计整数频偏 θ 。

当使用 c_1 作为训练序列时,接收信号与本地序列互相关的峰值位置由时间偏移和整数频偏共同决定,下面考虑如何分离这两个未知量。效仿式(3)再构建一个长度为 L 的CAZAC序列 $c_2=[c_2(0), c_2(1), \dots, c_2(L-1)]$,其中,

$$c_2(k) = \exp\left(-\frac{j\pi(L-1)k^2}{L}\right) \quad (7)$$

与前述过程类似,可以得到受整数频偏 θ 影响的序列与 $c_2(k+\theta)$ 对应。即 θ 会使序列 c_1 和 c_2 向相反方向移位,而时间偏移对两序列的影响是同向的,因此将 c_1 和 c_2 作为同步训练序列时,在接收端是可以分离时间偏移和整数频偏的。将 c_1 和 c_2 各重复一次,构成本文算法采用的同步训练序列 $c=[c_1 c_1 c_2 c_2]$,训练序列总长度为 $4L$ 。整数频偏对训练序列的影响如图2所示。

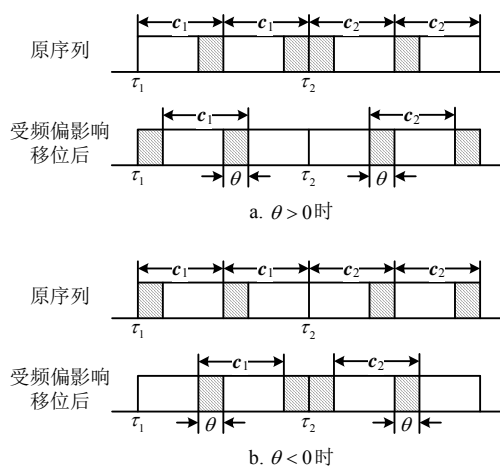


图2 整数频偏对训练序列的影响

3.2 接收机同步过程

接收机的同步过程共分为下述3个步骤。

1) 时间偏移与整数频偏估计。

首先,将接收信号序列与本地序列 c_1 进行滑动互相关:

$$R_1(m) = \frac{|r(m)c_1^H|^2}{|r(m)r^H(m)|} = \frac{\left| \sum_{k=0}^{L-1} r(m+k)c_1^*(k) \right|^2}{\sum_{k=0}^{L-1} |r(m+k)|^2} \quad (8)$$

式中, $r(m)=[r(m), r(m+1), \dots, r(m+L-1)]$ 。式(8)中分母部分的作用是将相关值用接收信号的能量进行归一化,从而一定程度上抵消信道衰落对目标函数的影响^[14]。将目标函数与预先设置的检测门限相比较,超过检测门限的第一个相关峰的位置为:

$$m_1 = \tau_1 + \theta, \text{ 或 } m_1 = \tau_1 + \theta + L \quad (9)$$

将 m_1 之后一定范围($0.5L \sim 3.5L$)的接收信号序列

与本地序列 c_2 进行滑动相关(同式(8)),得到的相关峰位置为:

$$m_2 = \tau_2 - \theta, \text{ 或 } m_2 = \tau_2 - \theta + L \quad (10)$$

而 $\tau_2 = \tau_1 + 2L$,将其与式(10)一起代入式(9),在当 $\theta \in [-L/4 + 1, L/4 - 1]$ 时,可求得 θ 的初步估计值 θ' 。此处需要指出,当 ε 接近 ± 0.5 时,相关峰处会有两个相邻的幅度比较接近的相关值,当存在噪声影响时,容易造成峰值位置的错判(但只会偏差一个采样点的位置),因此此处的估计值 θ' 还存在不确定性。而后根据 θ' 将本地序列循环移位后,通过与接收信号序列的互相关可以确定时间偏移点的初步估计值 τ'_1 、 τ'_2 。

2) 小数频偏的估计。

在 τ'_1 和 τ'_2 确定后,训练序列所在的位置即已确定(一个采样点的偏差对小数频偏的估计性能影响可以忽略)。由于训练序列是由重复序列构成,那么可以采用传统的延迟自相关求辐角的方法估计出小数频偏^[1]为:

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \angle \left(\sum_{k=0}^{L-1} r^*(\tau'_1 + k)r(\tau'_1 + k + L) + \sum_{i=0}^{L-1} r^*(\tau'_2 + i)r(\tau'_2 + i + L) \right) \quad (11)$$

3) 时间偏移点和整数频偏的修正。

由于时间偏移和整数频偏估计的不确定性是由小数频偏带来的。那么在小数频偏 ε 估计出来之后,用 ε 对接收数据进行补偿,而后重复步骤1)得到准确的时间偏移 τ_1 、 τ_2 与整数频偏 θ 。为了降低计算复杂度,还可以采用另一种方法。令:

$$\begin{cases} e = [1, e^{2\pi j\varepsilon/L}, \dots, e^{2\pi j(L-1)\varepsilon/L}] \\ c'_1 = c_1 \odot e \\ c'_2 = c_2 \odot e \end{cases} \quad (12)$$

用 c'_1 和 c'_2 作为本地序列,分别在 m_1 和 m_2 左右重新定位峰值位置 m'_1 和 m'_2 (而不必又一次重新搜索整个接收序列),而后采用步骤1)的方法得到准确的时间偏移与整数频偏。

值得一提的是,由式(8)可知,本文算法在目标函数相关峰的搜索过程中,与传统基本方法相比,并没有增加任何的计算复杂度,仍然是直接将接收信号序列与本地序列做互相关的形式(其中用接收信号的能量进行归一化的操作,对于传统方法,如果工作在衰落信道中,也同样需要)。本文算法整数

频偏的估计范围是 $\theta \in [-L/4+1, L/4-1]$ 。

4 性能仿真

本文通过计算机仿真来验证算法的有效性。后述仿真分别在AWGN信道和平坦瑞利衰落信道中进行, 瑞利信道的 $f_d T_s = 10^{-6}$, 其中, f_d 为最大多普勒频移, T_s 为符号时间。仿真中的频偏均用由 $1/T_s$ 归一化后的频偏 w 为考量标准。

首先考察文献[11]的时频同步性能。同步训练序列由两段重复的长度为127的m序列组成。该方法频偏粗估计的范围由其延迟相关的距离 D 决定, 为 $1/2D$ 。仿真时系统频偏设为 $w=0.1325$, 那么迭代估计的起始延迟距离应该为2, 各次迭代 D 的取值依次为[2,4,8,16,32,64]。

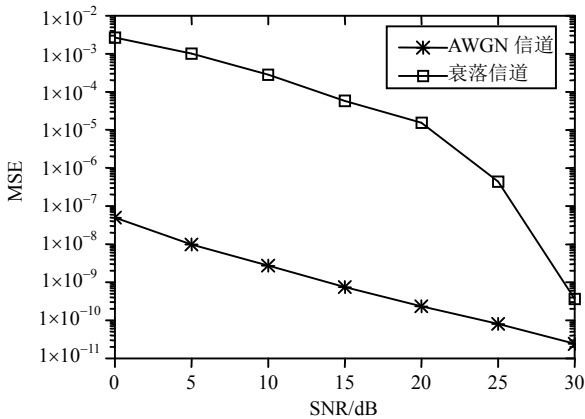


图3 文献[11]方法的频偏粗估计性能

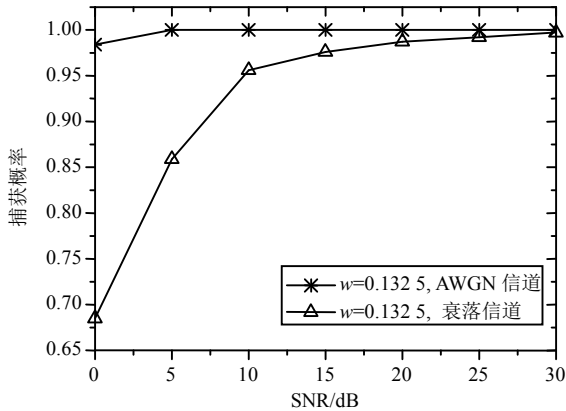


图4 文献[11]方法的时间同步性能

图3为对频偏 w 估计的均方误差性能。该方法在AWGN信道中能够有效收敛, 然而在衰落信道中的频偏粗估计性能达不到要求。如在SNR=15 dB时, 估计的平均偏差约为0.007 6, 然而频偏精估计的范围是 $1/(2 \times 127) = 0.0039$, 频偏粗估计的误差超过了频偏精估计的要求。图4为文献[11]方法的时间同步性能, 捕获概率统计的是同步到准确采样点的概率。仿真中涉及到的目标函数峰值的检测门限, 均为可

使捕获概率最大的最优门限值, 此处不另行列出。同样, 该方法在AWGN信道中具有良好的性能, 而在衰落信道中, 由于受到频偏粗估计的较大误差和信道衰落的影响, 其性能下降明显。仿真表明该方法不适用于衰落信道。

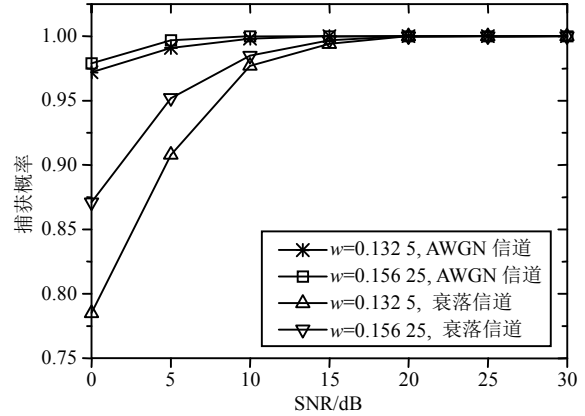


图5 本文方法时间同步捕获概率

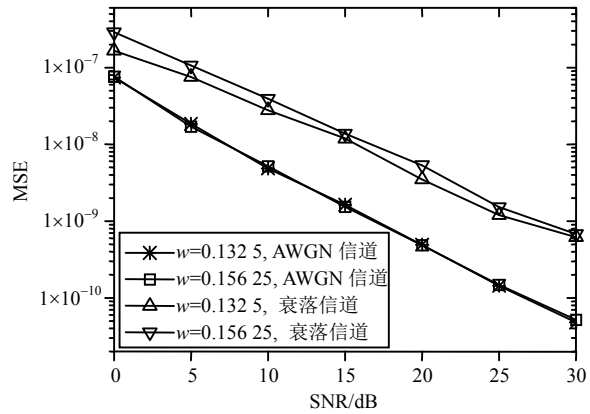


图6 本文方法频偏估计性能

下面对本文算法进行仿真验证。训练序列总长度为 4×64 , 即 $L=64$ 。系统频偏分别设置为 $w = \{0.1325, 0.15625\}$, 即整数频偏 $\theta = \{8, 10\}$, 小数频偏 $\varepsilon = \{0.48, 0\}$ 。图5为本文算法的时间同步性能, 图中可看到, $w=0.15625$ 时的性能优于 $w=0.1325$ 时的性能, 其原因在于二者小数频偏 ε 的不同, 由图1已知, ε 越小, 相关峰的幅度越大, 因此性能越好。而只要是在可估计范围内, 整数频偏 θ 对同步性能没有影响。图6为本文算法中频偏估计的均方误差性能, 由图可知, 在训练序列长度相近的条件下, 本文算法在衰落信道中的性能明显优于文献[11]所提算法的性能。

5 结论

本文提出一种适用于大频偏存在情况下的时间、频率同步方法。利用CAZAC序列在整数频偏影响下会产生循环移位的特性, 该方法将重复的

CAZAC序列作为训练序列, 通过将接收信号序列与接收机本地序列进行滑动互相关检测来估计时间同步点和整数频偏。同时重复结构的训练序列也被方便地用于计算小数频偏。仿真结果表明, 本文算法不仅适用于AWGN信道中, 而且可以工作在衰落信道中, 其性能优于传统方法。

参 考 文 献

- [1] SCHMIDL T M, COX D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Trans on Communications, 1997, 45(12): 1613-1621.
- [2] RUAN M, REED M, SHI Zhen-ning. Training symbol based coarse timing synchronization in OFDM systems[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(5): 2558-2569.
- [3] TIAN Shuang, PANTA K, SURaweera H, et al. A novel timing synchronization method for ACO-OFDM-based optical wireless communications[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(12): 4958-4967.
- [4] WANG Jun, YANG Zhi-xing, PAN Chang-yong, et al. A combined code acquisition and symbol timing recovery method for TDS-OFDM[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2003, 49(3): 304-308.
- [5] TUFVESSON F, EDFORS O, FAULKNER M. Time and frequency synchronization for OFDM using PN-sequence preambles[C]//IEEE 50th Vehicular Technology Conference. Amsterdam: IEEE, 1999, 4: 2203-2207.
- [6] LIU Guang-hui, ZHIDKOV S V. A composite PN-correlation based synchronizer for TDS-OFDM receiver[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2010, 56(1): 77-85.
- [7] YAN Yan-xin, TOMISAWA M, GONG Yi, et al. Joint timing and frequency synchronization for IEEE 802.16 OFDM systems[C]//IEEE Mobile WiMAX Symposium. Orlando: IEEE, 2007: 17-21.
- [8] MODY A N, STUBER G L. Receiver implementation for a MIMO OFDM system[C]//Global Telecommunications Conference. Taipei, China: IEEE, 2002, 1: 716-720.
- [9] PANSOO Kim, CORAZZA G E, PEDONE R, et al. Enhanced frame synchronization for DVB-S2 system under a large of frequency offset[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Kowloon: IEEE, 2007: 1183-1187.
- [10] ZHANG Yu-long, CHEN Xu-bin, FAN Wen-hua, et al. Robust and reliable frame synchronization method for DVB-S2 system[C]//Wireless Telecommunications Symposium. Tampa: IEEE, 2010: 1-5.
- [11] WU Jian-ming, CHEN Yun, ZENG Xiao-yang, et al. Robust timing and frequency synchronization scheme for DTMB system[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2007, 53(4): 1348-1352.
- [12] CHU D. Polyphase codes with good periodic correlation properties[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1972, 18(4): 531-532.
- [13] FAN P Z, DARNELL M. Sequence design for communications applications[M]. London: John Wiley & Sons Ltd, 1996.
- [14] TIAN Yuan, LEI Xia, TANG Wan-bin, et al. Performance analysis of detection threshold on OFDM time synchronization using PN sequences[J]. International Journal of Software Engineering and Its Applications, 2008, 2(3): 1-8.

编辑 漆蓉