

基于 PN 序列的 OFDM 帧同步算法

程 韧, 冷娟华, 杨争斌

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘 要:讨论了 OFDM 系统的帧同步算法, 针对基于循环前缀的同步算法在强干扰信道中以及在极低信噪比条件下, 无法实现精确同步的缺点, 提出了一种基于 PN 序列的帧同步算法。仿真结果表明, 基于 PN 序列的帧同步算法在极低信噪比条件下能够实现精确同步, 同时也具有抗多径效应和抗强窄带干扰的能力。

关键词:OFDM 系统; 循环前缀; PN 序列; 帧同步

中图分类号: TN914.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2003)05-0039-04

正交频分复用技术(orthogonal frequency division multiplexing, 简称 OFDM)是一种多载波调制方式, 它的基本思想是通过允许子信道频谱重叠, 但又相互不影响的频分复用(FDM)的方法来并行传送数据, 有很高的频谱利用率, 具备较强的抗脉冲噪声及抗多径衰落的能力。正是因为 OFDM 有着如此优良的性能, 迄今为止, 这项技术已被应用于欧洲的数字音频广播(DAB), 数字视频广播(DVB)等^[1]。在已标准化的 HIPER-LAN/2 也应用了 OFDM 技术为用户提供便利的无线网络。可以说, 它是未来无线宽带通信最有效的技术之一。但是, 实现 OFDM 系统存在技术上的难点, 其中很重要的一条是系统对同步的要求很高, 因为它对定时误差和频率误差要比单载波技术敏感得多。可以说, 准确的定时和频率偏差的估计是实现 OFDM 系统的关键。

本文在分析了无线信道的基础上, 给出了基于 PN 序列的帧同步算法, 并且与基于循环前缀的同步估计算法进行比较。计算机仿真表明, 在各种信道中, 特别是在强窄带干扰和极低信噪比的信道中, 基于 PN 序列的帧同步算法是非常有效的。

1 无线信道分析

通常来说, 接收机所接收的信号都是通过不同的直射、反射、折射等路径到达接收机的, 这就是无线信道的一大特征—多径效应。由于多径效应的存在, 一方面限制了数据传输速率的提高, 另一方面也会带来符号间的干扰(ISI)。同时, 无线信道中还存在着多普勒效应, 它会引起信道的频率色散, 即信号的频谱被展宽, 造成了时间选择性衰落, 使子信道间产生干扰。另外, 在无线信道中还存在着窄带干扰, 这些干扰可能是由同址电台或附近的寻呼台和移动通信台所发出的, 这些窄带干扰的频率和某些子载波频率间的间隔很小。正是由于无线信道的特征及信道中所存在的各种干扰, 给 OFDM 系统的帧同步带来了一定的困难。

2 OFDM 的帧同步实现

通信双方的同步对于数字通信来说是至关重要的问题, 它直接关系到双方是否能够正常通信。总的来说, 同步方法大体可分为两类: 一类是利用接收信号中冗余信息(通常指保护间隔中的数据)的统计特性进行估计; 另一类是假定接收方已知所发送的数据, 也就是说按照某种协议发送已知的引导符号(如 PN 序

收稿日期: 2003-05-02

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 程 韧(1961-), 女, 陕西西安人, 副教授, 主要从事通信抗干扰技术研究。

列),再利用已知的引导符号对符号定时和频率偏移进行估计。

2.1 基于循环前缀的帧同步算法

在每帧 OFDM 传输信号前插入的循环前缀,并不是置之为空的保护时间,而是利用 OFDM 码元的循环扩展作为循环前缀。根据循环前缀的特点,一般采用下面的方法来进行 OFDM 信号的同步估计^[2-3]。具体做法如下:

假设接收信号模型为 $r(k) = s(k - \theta) e^{j2\pi\epsilon k/n} + n(k)$

利用所观测的 $2N + 1$ 个数据建立对数似然函数 $\Lambda(\theta, \epsilon)$

$$\Lambda(\theta, \hat{\epsilon}(\theta)) = |\gamma(\theta)| - \rho\Phi(\theta)$$

其中: $\gamma(m) = \sum_{k=M}^{m+L-1} r(k) \bar{r}(k+N)$ 为观测数据的相关部分;

$\Phi(m) = \frac{1}{2} \sum_{k=M}^{m+L-1} (|r(k)|^2 + |r(k+N)|^2)$ 为观测数据的能量部分;

$$\rho = \left| \frac{E\{r(k) \bar{r}(k+N)\}}{\sqrt{E\{|r(k)|^2\} E\{|r(k+N)|^2\}}} \right| = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2 + \sigma_n^2}$$
 为与信噪比有关的一个相关加权因子。

参数 θ, ϵ 的似然估计为

$$\hat{\theta}_{ML} = \operatorname{argmax} \{ |\gamma(\theta)| - \rho\Phi(\theta) \}$$

$$\hat{\epsilon}_{ML} = -\frac{1}{2\pi} \angle \gamma(\hat{\theta}_{ML})$$

利用基于循环前缀的算法,在信道条件较好的情况下,能够准确的估计帧同步位置。但在低信噪比条件下或信道中存在窄带干扰时,会出现帧同步位置波动较大的现象。这主要是因为算法中相关峰值不尖锐,而造成误判引起的。由于帧同步头位置的较大波动,FFT 后各帧因这种同步估计误差带来的载波相位偏转角度不同,使定时同步估计校正不稳定,估计误差增大,在更为恶劣的信道条件下,甚至难以同步,影响系统性能。

2.2 基于 PN 码的帧同步算法

因为伪随机序列具有非常好的自相关特性^[4-5],即

$$R_x(j) = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P x_i x_{i+j} = \begin{cases} 1 & j=0(\text{模 } P) \\ \frac{1}{P} & j \neq 0(\text{模 } P) \end{cases}$$

由 PN 序列性质可知,当 j 刚好处于同步捕获帧的边界位置时, $R_x(j)$ 会出现尖锐的峰值,利用 PN 序列尖锐的相关峰就可指示出捕获到的同步位置信息。虽然加入伪随机码之后,增加了发送的冗余信息,使数据传输速率有所下降,但对于经过在恶劣信道中传输的信号,也能够准确确定其帧同步位置,从而解决在强窄带干扰信道或低信噪比条件下的帧同步问题。但是在数据帧的前端插入伪随机序列,使信号的带宽较大。对于这个问题,可以在做 IFFT 之前,即频域时,就插入几个引导数据帧,而在收端,可以用本地的已知的序列与接收的信号进行相关运算,从而找到同步位置,而不会使信号的带宽较大。

3 计算机仿真结果

本节对基于循环前缀的帧同步算法和基于 PN 序列的帧同步算法的性能进行仿真比较。仿真中,假定 OFDM 系统中的子载波数目为 1 024,循环前缀 $L = 76$,子信道分别采用 BPSK、4PSK、8PSK、16QAM 等调制。对 10 个 OFDM 帧进行仿真,用其中的前 5 个数据帧来做同步,然后取后 5 个数据帧进行误码率判断。在基于 PN 序列的同步估计算法的仿真中,序列长 $G = 255$ 。

首先考虑 AWGN 信道。仿真中 $S/N = 10$ dB,子载波采用 16QAM 调制。基于循环前缀的帧同步算法和基于 PN 序列的帧同步算法的性能分别如图 1 所示。

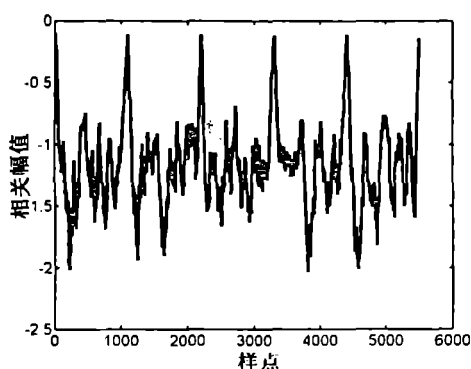


图 1(a) 基于循环前缀的帧同步仿真波形

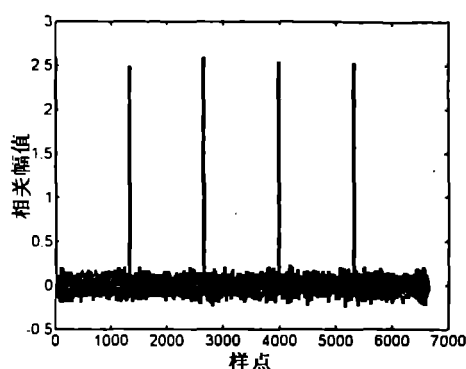


图 1(b) 基于 PN 序列的帧同步仿真波形

通过仿真可以发现,基于循环前缀的同步估计算法在 S/N 下降到 8 dB 时,找到的同步位置会发生偏差。 S/N 下降到 -5 dB 时,从基于 PN 序列的帧同步仿真波形中仍可以看到尖锐的相关峰,而基于循环前缀的帧同步仿真波形中已无相关峰。图 2 分别是两种算法在 $S/N = -5$ dB 时的同步仿真波形。

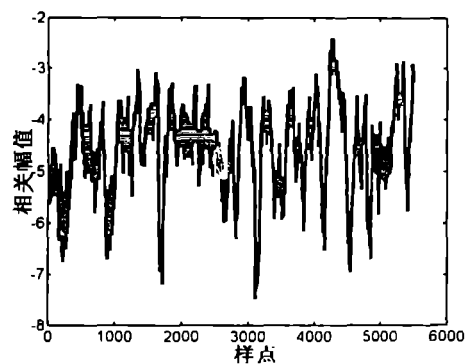


图 2(a) 基于循环前缀的帧同步仿真波形

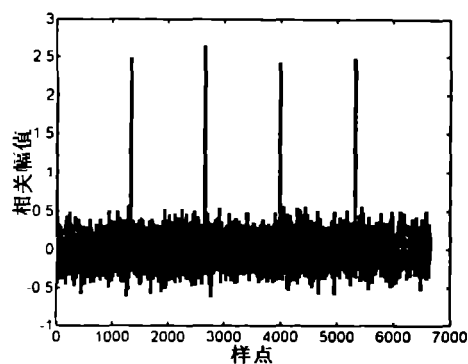


图 2(b) 基于 PN 序列的帧同步仿真波形

接下来要对两种算法在多径信道中的性能进行仿真。仿真结果如图 3 所示。取 $S/N = 10$ dB,仿真线性信道时延扩散为 70 点,信道仿真模型为 $H(n) = A \exp(-n/3)$ 。这里 A 为系数,仿真中取 $A = 1$ 或 $A = -1$ 。

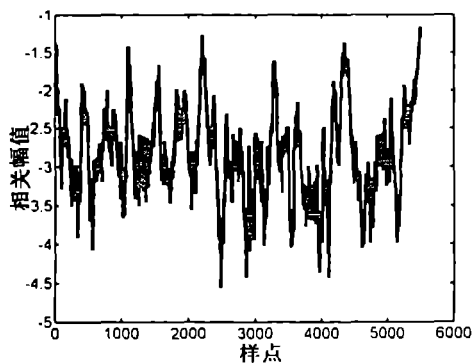


图 3(a) 基于循环前缀的帧同步仿真波形

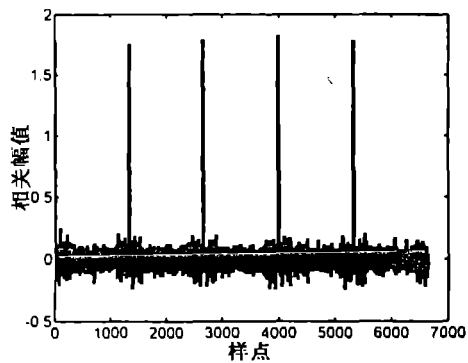


图 3(b) 基于 PN 序列的帧同步仿真波形

从结果看,在多径信道下,信道最大时延扩散点数与循环前缀的长度比较相近时,基于循环前缀的同步估计算法就很不适用了。由于伪随机码尖锐的相关特性,一般在扩频通信中就通过伪随机码来抗多径效应。通过仿真发现,在基于 PN 序列的帧同步算法中,只需要较短的伪随机序列就可以取的较好的抗多径效应的能力。

最后对两种算法在窄带干扰条件下的情况进行仿真。取 $S/N = 10$ dB,信干比为 -22.62 dB,干扰所占带宽为 50 个子载波的带宽。仿真的同步波形图如图 4 所示。

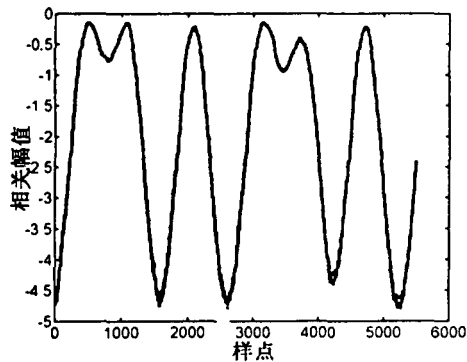


图 4(a) 基于循环前缀的帧同步仿真波形

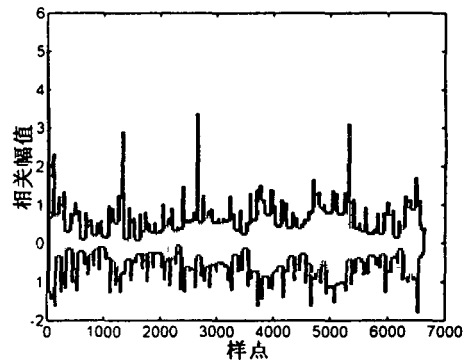


图 4(b) 基于 PN 序列的帧同步仿真波形

从仿真的波形图可以看出,基于循环前缀的同步算法在干扰信道中是不能找到同步位置的。而在基于 PN 序列的同步算法的波形图中,可以清楚看到 5 根尖锐的相关峰值,这些尖锐峰值所在的位置也就是正确的同步位置。

通过上述分析及仿真可以看出,循环前缀的引入,对于消除符号间串扰、简化系统结构有很大的好处,但是利用其来进行同步估计的算法却不适用于窄带干扰信道以及信噪比较低的情况中。而在基于 PN 序列的同步算法中,通过插入 PN 序列,一方面可以使同步更加可靠,另一方面也可以取得很好的抗多径和窄带干扰能力。综合而言,在信道中存在强窄带干扰或低信噪比的信道条件下,基于 PN 序列的帧同步算法能够有效地实现精确的帧同步。

参考文献:

- [1] Ahmad Chini, Yiyan Wu. Filtered decision feedback channel estimation for OFDM based DTV terrestrial broadcasting system [J]. IEEE Trans on Broadcasting, 1998, 40 (3) : 2 ~ 10.
- [2] Weinstein S B, Paul M E. Data transmission by frequency division multiplexing using the discrete fourier transform [J]. IEEE Transaction on Communications, 1971, 19(10) : 628 ~ 634.
- [3] Kim D K, DoS H. A New Joint Algorithm Symbol Timing Recovery And Sampling Clock Adjustment For OFDM Systems [J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 1998, 44(3) : 1574 - 1579.
- [4] 傅延增, 张海林. 正交频分复用中的符号同步技术 [J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(3) : 15 ~ 19.
- [5] 周一青, 胡爱群. 利用训练帧进行 OFDM 系统同步的新算法 [J]. 通信学报, 2001, 22(4) : 13 - 18.

(编辑: 门向生)

An Algorithm of Symbol Synchronization for OFDM Based on PN Sequences

CHENG Ren, LENG Juan - hua, YANG Zheng - bin

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: In this paper an algorithm of symbol synchronization for OFDM is proposed based on PN sequences. First, the algorithm of symbol synchronization based on cyclic prefix is discussed, and then its drawbacks are analyzed. The results of computer simulation show that the new algorithm based on PN sequences can overcome the drawbacks of the algorithm based on cyclic prefix and get better synchronization in particular in the channel of strong interference and in the case of low SNR.

Key words: OFDM systems; cyclic prefix; PN sequences; frame synchronization