

# 一种数据辅助的 OFDM 符号定时同步算法\*

王 顶, 李鹏飞

(西北工业大学 电子信息学院, 西安 710129)

**摘要:** 针对正交频分复用系统的同步偏差敏感性,提出了一种新的符号定时同步算法。该算法通过新设计的训练序列结构,得到新的符号定时偏移估计函数表达式。仿真结果表明,该算法有效地克服了 Schmidl、Minn 和 Park 算法中的符号定时缺陷,并且在低信噪比下能实现更准确的同步;另外,该算法在同等条件下符号定时偏移估计的均方误差更低。

**关键词:** 正交频分复用; 符号定时同步; 训练序列; 偏移估计; 均方误差

**中图分类号:** TN911.22      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2012)05-1832-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.061

## Symbol timing synchronization algorithm for OFDM systems in data-aided

WANG Ding, LI Peng-fei

(School of Electronic & Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** To overcome the serious influence of synchronization offset on OFDM communication systems, this paper proposed a novel symbol timing synchronization algorithm. It deduced the new symbol timing offset estimation function expressions by the new structure of training sequence. Simulation results show that the proposed algorithm effectively overcomes the symbol timing defect in Schmidl's, Minn's and Park's methods. The proposed algorithm has a more accurate synchronization in low signal noise ratio. Moreover, symbol timing offset estimation of the proposed algorithm has lower mean-square error under the same conditions.

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); symbol timing synchronization; training sequence; offset estimation; mean-square error

## 0 引言

正交频分复用(orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM)是一种多载波传输技术,因具有频谱利用率高和抗频率选择性衰落等优点,并且能实现高质量、高速率的数据传输而备受关注,被广泛应用于宽带无线数字通信系统中,同时也成为4G的核心技术。因此,OFDM通信技术有很好的应用前景。

OFDM系统的一个关键是对同步偏差的敏感性,包括符号定时同步和载波频率同步。当系统存在符号定时偏移时,会导致码间干扰(ISI)<sup>[1]</sup>;而当系统存在载波频偏时,会导致载波间干扰(ICI),系统性能会迅速恶化。同步性能决定了OFDM系统的性能。因此,在OFDM系统中,进行精确的符号定时偏移估计显得极为重要。OFDM符号定时同步算法可以归为两大类:a)基于非数据辅助法,利用循环前缀(CP)的相关特性来估计符号定时同步,如Van de Beek等人<sup>[2]</sup>提出的最大似然估计(ML)法和Takahashi等人<sup>[3]</sup>提出的差分法,这些算法具有计算复杂度低、捕获时间长和同步精度不高的缺点;b)基于数据辅助法,通过在传输符号中插入特殊的训练序列来辅助估计,如Schmidl等人<sup>[4]</sup>提出的S&C法。由于循环前缀CP的存在,符号定时估计存在一个“高原”区,定时估计的精度不高。为了改进S&C算法的缺点,相关文献提出Minn算法<sup>[5]</sup>、Park算法<sup>[6]</sup>、Ren算法<sup>[7]</sup>等。Minn算法在符号定时估计正确位置附

近出现一些尖锐的副峰使定时估计精度不高;Park算法在距离符号定时估计正确位置 $\pm N/4$ ( $N$ 为OFDM符号长度)采样点处具有较大的旁瓣,严重影响了系统的符号定时偏移估计性能。但这些算法相对非数据辅助算法具有计算量少、捕获时间短和同步精度高等优点。

本文针对这些数据辅助型算法的缺点,通过重新设计训练符号,提出了一种新的符号定时同步方案,该方案在高斯信道下具有更好的符号定时偏移估计性能,具有很好的同步效果。

## 1 系统模型

一个基本的OFDM系统实现框图如图1所示。基带信息流经过信道编码、星座映射后,再经过串并变换分成 $N$ 个支路,这 $N$ 个支路的数据流经过IFFT模块后,由频域离散数据变换到时域离散数据,再通过并串转换和插入循环前缀CP构成OFDM符号,通过载波调制并将其送入信道传输。接收端经同步算法估计出符号定时点,去除CP,再经串并转换后经过FFT模块将信号从时域变换至频域,经并串变换、逆映射、信道译码恢复出原始数据。

发送端发送OFDM符号的复基带数据可表示为

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{j2\pi kn} \quad -N_g \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

其中: $N$ 为系统子载波数目; $N_g$ 为循环前缀长度; $X(k)$ 为第 $k$

收稿日期: 2011-08-22; 修回日期: 2011-09-24      基金项目: 航天支撑技术基金资助项目(2009XW080002)

作者简介: 王顶(1973-),男,陕西西安人,副教授,博士,主要研究方向为宽带无线通信的高速数据传输技术(wangd@nwpu.edu.cn);李鹏飞(1984-),男,内蒙古兴和人,硕士研究生,主要研究方向为OFDM通信技术。

个子载波上的调制数据。假设 OFDM 系统收发两端采样时钟完全同步,仅存在频率偏移和符号定时偏移,并且在接收端不考虑信道的衰减,发送数据经过高斯白噪声信道后的接收信号表示为

$$r(n) = s(n - \theta) \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}n\epsilon} + w(n) \quad (2)$$

其中: $\theta$ 表示未知的符号定时偏移; $\epsilon$ 表示用载波间最小间隔归一化的频率偏移; $w(n)$ 表示均值为0、方差为 $\sigma_n^2$ 的加性高斯白噪声。

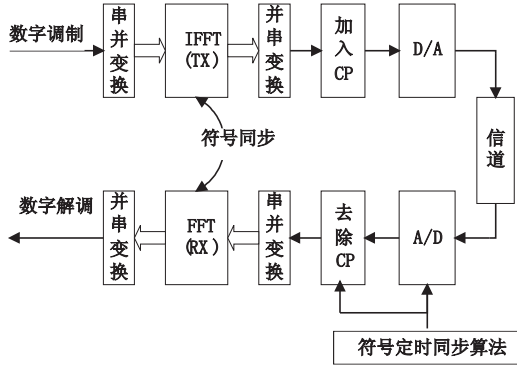


图1 OFDM系统实现基本框图

本文主要研究估计符号定时偏移 $\theta$ ,并通过数据辅助来消除或减弱同步误差对 OFDM 系统性能的影响。

## 2 符号定时同步算法

在提出新算法之前,简短地描述一下已提出的符号定时同步算法,如 S&C 算法、Minn 算法和 Park 算法。

### 2.1 传统算法

#### 2.1.1 S&C 算法

一般 OFDM 符号定时同步算法利用接收端信号 $r(n)$ 的自相关性,在符号序列结构中添加自相关性好的特殊训练序列来完成 OFDM 符号定时同步。如 S&C 算法添加特殊训练序列(PN 序列)使符号定时同步比较准确。S&C 算法提出的训练序列结构如下:

$$P_{S\&C} = [A_{s\&c}, A_{s\&c}]$$

其中:结构中的 $A_{s\&c}$ 是长度为 $N/2$ 的 PN 序列。

S&C 算法符号定时偏移估计函数为

$$M_{S\&C}(d) = \frac{|P_1(d)|^2}{(R_1(d))^2} \quad (3)$$

其中:

$$P_1(d) = \sum_{k=0}^{N/2-1} r^*(d+k) \cdot r(d+k+N/2) \quad (4)$$

$$R_1(d) = \sum_{k=0}^{N/2-1} |r(d+k+N/2)|^2 \quad (5)$$

S&C 算法符号定时偏差估计为

$$\bar{\theta} = \arg \max_d (M_{S\&C}(d)) \quad (6)$$

S&C 算法用于符号定时同步的训练序列分为重复的两部分。由于循环前缀 CP 的存在,符号定时偏移估计函数在正确定时位置附近有一个近似为循环前缀减去信道最大时延的峰值平台,如图 2 所示,这给定时造成很大的模糊性。

#### 2.1.2 Minn 算法

为了改进 S&C 算法的缺点,文献[5]提出了一种新的训练序列结构:

$$P_{Minn} = [A_{Minn}, A_{Minn}, -A_{Minn}, -A_{Minn}]$$

其中:结构中的 $A_{Minn}$ 是长度为 $N/4$ 的 PN 序列。

Minn 算法符号定时偏移估计函数为

$$M_{Minn}(d) = \frac{|P_2(d)|^2}{(R_2(d))^2} \quad (7)$$

其中:

$$P_2(d) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} r^* \left( d + \frac{N}{2}m + k \right) \cdot r \left( d + \frac{N}{2}m + k + \frac{N}{4} \right) \quad (8)$$

$$R_2(d) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k=0}^{N/4-1} \left| r \left( d + \frac{N}{2}m + k + \frac{N}{4} \right) \right|^2 \quad (9)$$

Minn 算法符号定时偏差估计为

$$\bar{\theta} = \arg \max_d (M_{Minn}(d)) \quad (10)$$

Minn 算法通过后半个训练符号采用负值克服了 S&C 算法所产生的峰值平台效应,并且提高了定时频偏估计的精度。但在错误时刻很容易出现一些副峰,给判决门限的选取带来困难,尤其在子载波数目较小的突发系统中,往往错误时刻峰值超过正确时刻的峰值,从而估计错误。在 ISI 信道条件下 Minn 算法定时偏移的均方误差较大<sup>[5]</sup>,这样会给符号定时估计带来不确定性,使系统同步性能下降,如图 2 所示。

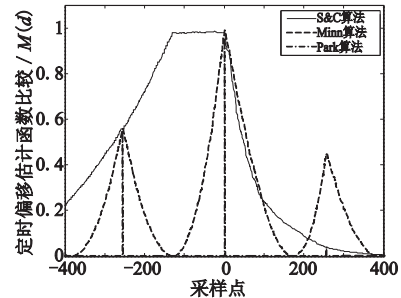


图2 符号定时偏移估计函数比较

#### 2.1.3 Park 算法

针对 S&C 算法、Minn 算法的缺点,文献[6]提出了一种新的训练序列结构:

$$P_{Park} = [A_{Park}, B_{Park}, A_{Park}^*, B_{Park}^*]$$

其中: $A_{Park}$ 代表一个 PN 序列经过 IFFT 变换之后长度为 $N/4$ 的时域采样点; $B_{Park}$ 与 $A_{Park}$ 是中心对称的; $[\ ]^*$ 表示去共轭。

Park 算法符号定时偏移估计函数为

$$M_{Park}(d) = \frac{|P_3(d)|^2}{(R_3(d))^2} \quad (11)$$

其中:

$$P_3(d) = \sum_{k=0}^{N/2-1} r(d-k) \cdot r(d+k) \quad (12)$$

$$R_3(d) = \sum_{k=0}^{N/2-1} |r(d+k)|^2 \quad (13)$$

Park 算法符号定时偏差估计为

$$\bar{\theta} = \arg \max_d (M_{Park}(d)) \quad (14)$$

Park 算法提出了一种四段共轭对称的训练符号,使得符号定时偏移估计精度得到进一步提高,但是它在距离正确位置 $\pm N/4$ ( $N$ 为 OFDM 符号长度)采样点处具有较大的旁瓣,严重影响了系统的定时偏移估计性能,如图 2 所示。

## 2.2 新的符号定时同步算法

### 2.2.1 新的训练符号结构

本文新设计的训练序列结构如下:

$$P_p = [A_{N/2}, B_{N/2}]$$

其中: $N$ 为子载波数目; $A_{N/2}$ 、 $B_{N/2}$ 的长度为 $N/2$ ,并具有共轭

对称性,即  $A_{N/2}(k) = B_{N/2}^*(N-k)$ ,  $k=0,1,\dots,N/2$ 。  $A_{N/2}$ 、 $B_{N/2}$  可以通过下面所述方法产生。训练符号在 IFFT 变换前对应形式为  $C=[C_1 \ C_2 \ C_3]$ , 序列  $C_1$  取长度为  $n_1$  个 0, 序列  $C_2$  取长度为  $n_2$  个伪随机序列 +1 或 -1, 序列  $C_3$  取长度为  $n_3$  个 0, 两部分 0 序列作为保护频带, 使  $N=n_1+n_2+n_3$ 。经过  $N$  点的 IFFT 变换后可得  $A_{N/2}$ 、 $B_{N/2}$  的共轭对称关系<sup>[8]</sup>。图 3 为训练序列的具体生成过程。

$$\left. \begin{aligned} x(0:n_1-1) &= 0 \\ x(n_1:n_1+n_2-1) &= -1 \text{ or } +1 \\ x(n_1+n_2:N-1) &= 0 \end{aligned} \right\} \xrightarrow{\text{IFFT}} x(n), n=0, \dots, N-1$$

$$y(n), n=0, \dots, N-1 \rightarrow \begin{cases} s(0, \dots, \frac{N}{2}-1) = y(0, \dots, \frac{N}{2}-1) \\ s(\frac{N}{2}, \dots, N-1) = y^*(0, \dots, \frac{N}{2}-1) \end{cases}$$

图3 训练序列的具体生成过程

### 2.2.2 符号定时偏差估计

发送 OFDM 符号记为  $s(n)$ , 接收符号记为  $r(n)$ , 假设不考虑频率偏移和信道的影响有  $r(n) = s(n-\theta) + w(n)$ ,  $n=0, \dots, N-1$ 。由新设计的训练序列结构提出的符号定时偏移估计函数为

$$M_p(d) = \frac{|P(d)|^2}{(R(d))^2} \quad (15)$$

其中:

$$P(d) = \sum_{k=0}^{N/2-1} r(d+k) \cdot r(d+N-k) \quad (16)$$

$$R(d) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=0}^{N/2-1} (|r(d+k)|^2 + |r(d+N-k)|^2) \quad (17)$$

则符号定时偏差估计为

$$\hat{\theta} = \arg \max_d (M_p(d)) \quad (18)$$

仿真结果表明, 新的符号定时偏移估计函数在正确定时位置总会出现一个尖锐的相关峰, 如图 4 所示, 图中的 OFDM 系统子载波数  $N=1024$ , 循环前缀长度  $N_g=128$ 。从图中可以看出, S&C 算法出现了“高原”区; Minn 算法消除了这一“高原”区, 但出现多峰现象; Park 算法的定时偏移估计函数曲线尖锐, 却在  $\pm 256$  处具有旁瓣; 本文算法能有效克服上述几种算法的缺点, 具有理想冲激函数的形状, 因而具有更好的符号定时偏移估计性能。

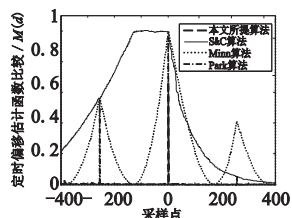


图4 高斯信道定时偏移估计函数比较

## 3 仿真结果与分析

在仿真过程中, 仿真参数为: OFDM 子载波数  $N=1024$ , 循环前缀长度  $N_g=128$ , 1024 点 IFFT/FFT, 64QAM 调制, 在加性高斯白噪声 (AWGN) 信道中对算法性能进行仿真比较。

本文用符号定时偏移的均值和均方误差衡量定时算法的性能<sup>[9]</sup>, 仿真结果是在不同信噪比下进行 10 000 次运算得到的。图 5 给出了在 AWGN 信道下, 本文算法和 S&C 算法、Minn 算法、Park 算法进行符号定时偏移估计的均值曲线。由图 5 可

看出, 在符号定时估计上, 本文算法克服了 S&C 算法存在峰值平台、Minn 算法存在多峰值, 以及在符号定时正确位置的  $\pm N/4$  采样点处, Park 算法存在较大的旁瓣的缺点; 尤其是信噪比大于 6 dB 后, 本文算法均值为零, 即符号同步准确率几乎达到 100%。所以本文算法在 AWGN 信道下具有更好的符号定时偏移估计性能。

图 6 给出对几种算法定时偏移的均方误差曲线。由图 6 可以看出, 在信噪比较小时, 本文算法不及 Minn 算法的性能; 当信噪比高于 3 dB 时, 本文算法明显优于其他算法的性能; 当信噪比高于 25 dB 时, 本文算法与 Park 算法性能相近。所以本文算法的定时同步准确率极高。

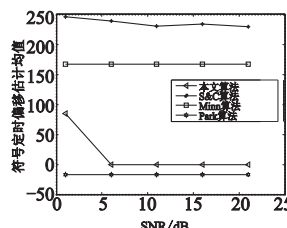


图5 符号定时偏移估计均值的比较

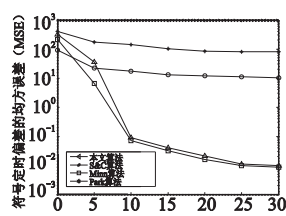


图6 符号定时偏移估计均方误差的比较

## 4 结束语

针对文献[4~6]的同步算法存在符号定时同步精度不高的问题, 提出了一种新的训练符号定时偏移估计方案。该训练符号在时域具有共轭对称性, 使得定时偏移估计函数在符号正确点处具有很好的尖峰, 有效地克服了文献[4~6]算法符号定时估计的缺点。新算法提高了符号定时同步精度, 是一种非常有效、实用的方法。

### 参考文献:

- [1] 佟学俭, 罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [2] Van De BEEK J J, SCANDALL M, BORJESSON P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1997, 45(7): 1800-1805.
- [3] TAKAHASHI K, SABA T. A novel symbol synchronization algorithm with reduced influence of ISI for OFDM systems[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2001: 524-528.
- [4] SCHMIDL T M, COX D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Trans on Communications, 1997, 45(12): 1613-1621.
- [5] MINN H, ZENG M, BHARGAVA V K. On timing offset estimation for OFDM systems[J]. IEEE Communication Letters, 2000, 4(7): 242-244.
- [6] PARK B, CHEON H, KANG C, et al. A novel timing estimation method for OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5): 729-732.
- [7] REN Guang-liang, CHANG Yi-lin, ZHANG Hui, et al. Synchronization method based on a new constant envelop preamble for OFDM systems[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2005, 51(1): 139-143.
- [8] 盛渊, 罗新民. 一种基于训练序列的 OFDM 时频同步新算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2082-2085.
- [9] GUO Yi, LIU Gang, GE Jian-hua. A novel time and frequency synchronization scheme for OFDM systems[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2008, 54(2): 321-325.