

# 无线 OFDM 系统时频同步方法研究

任光亮, 常义林, 张辉, 张会宁

(西安电子科技大学 综合业务网与关键技术国家重点实验室 陕西 西安 710071)

**摘要:** 在分析 OFDM 系统同步训练符号性质的基础上, 设计出一个具有伪随机序列加权因子的新同步训练符号, 并提出基于该训练符号的同步方法. 利用新训练符号中的伪随机序列加权因子和数据序列的相关特性进行符号同步偏移估计; 在符号同步的基础上, 利用消去新训练符号中伪随机加权因子的数据序列进行频偏估计. 仿真结果表明所提方法的符号同步偏移估计精度和频偏估计范围均优于已有的同步方法.

**关键词:** 正交频分复用; 训练符号; 同步偏移估计

**中图分类号:** TN929.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-240X(2005)05-0758-04

## Timing and frequency synchronization method for wireless OFDM systems

REN Guang-liang, CHANG Yi-lin, ZHANG Hui, ZHANG Hui-ning

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the synchronization training symbols in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems, a new training symbol weighted by the pseudo-noise (PN) sequence is designed, and the corresponding synchronization method is proposed. In the proposed method, the correlation properties of the PN weighted factor and the training symbol are utilized in the timing offset estimation. Based on the timing synchronization, the PN weighted factor in the training symbol is removed, and the renewed training symbol is used to estimate the frequency offset. Simulation results show that the accuracy of timing synchronization and the estimate range of the frequency offset outperform those of the other available methods.

**Key Words:** OFDM; training symbol; synchronization offset estimation

正交频分复用(OFDM)系统对时偏和频偏十分敏感,同步已成为 OFDM 系统研究的主要问题.在面向分组突发传输的 OFDM 系统中<sup>[1-2]</sup>,通常利用同步训练符号实现同步,最常用的是 Schmidl 在文献[3]中提出的同步训练符号,该符号包含有两个相同的部分.在文献[3]的基础上,文献[4,5]分别设计了新的训练符号,利用新训练符号所具有的新特性提高符号同步估计精度,但这些训练符号在频偏估计中同 Schmidl 方法类似,需要额外的训练符号来增大频偏估计范围.为了增大单个 OFDM 训练符号的频偏估计范围,文献[6,7]提出了一类包含多个重复部分的新 OFDM 训练符号,并分别提出增大频偏估计范围的不同算法,但新训练符号的特殊结构,使其在符号定时同步估计中具有较大的误差.

为了提高基于单个 OFDM 同步训练符号的定时同步精度和频偏估计范围,笔者通过引入伪随机序列加权因子,设计出一种新的同步训练符号,并提出基于该训练符号的时频同步方法.

## 1 OFDM 系统信号模型

在 OFDM 系统的复基带等效模型中,发送端 OFDM 符号的复基带数据的采样为

收稿日期 2004-08-22

基金项目 国家自然科学基金资助项目(60172030)

作者简介 任光亮(1971-),男,副教授,西安电子科技大学博士研究生.

$$x_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp(j2\pi kn/N) \quad , \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad , \quad (1)$$

式中  $N$  为系统子载波的数目,  $c_k$  是 OFDM 符号的第  $k$  个子载波上的调制复数据。

发送端的复基带信号经过信道传输后,在接收端符号定时同步偏移通常表示为接收信号的时延,载波的频率偏移通常表示为时域上接收数据的相位失真,因而具有符号同步(定时)偏移和载波频偏。OFDM 系统的接收信号可表示为

$$r_n = y_{n-n_e} \exp(j2\pi vn/N) + w_n \quad , \quad (2)$$

式中  $n_e$  表示未知的符号同步偏移,  $v$  是用载波间最小间隔归一化的载波频偏,  $w_n$  是信道中的加性高斯白噪声,  $y_n = \sum_{m=0}^{K-1} h_m x_{n-m}$ ,  $h_m$  是信道的冲击响应,  $K$  为无线信道中的多径数。

在 OFDM 系统中,同步的主要任务是估计符号同步偏移  $n_e$  和频偏  $v$ ,通过补偿消除或减弱同步误差对系统性能的影响。

## 2 训练符号特性与新训练符号

Schmidl 在文献 [3] 中提出了一种用于 OFDM 系统时频同步的训练符号, Park 通过分析该训练符号在符号同步中存在较大误差的原因,设计了一种新的训练符号<sup>[5]</sup>,其子载波上发送的频域矢量可表示为

$$C_{TS} = [c_0, 0, c_2, 0, \dots, c_{2i}, 0, \dots, c_{N-2}, 0] \quad , \quad (3)$$

式中  $c_{2i}$ ,  $i = 0, 1, \dots, (N/2) - 1$  是实数。该矢量经过逆傅里叶变换 (IDFT) 可得到训练符号的时域数据:

$$x_k = \sum_{i=0}^{N/2-1} c_{2i} \exp(j4\pi ik/N) \quad , \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad . \quad (4)$$

由 IDFT 的性质可知,其时域数据满足:

$$x_{k+N/2} = x_k \quad , \quad x_{k+N/4} = -x_k \quad , \quad x_{N-k} = x_k^* \quad , \quad x_{N/2-k} = x_k^* \quad . \quad (5)$$

利用  $x_{N-k} = x_k^*$  性质, Park 提出一种估计精度高的符号同步估计方法。但其频偏估计与文献 [3] 中方法类似,利用  $x_{k+N/2} = x_k$  性质估计系统存在的频偏,频偏估计范围小。

为了增大采用单个训练符号的频偏估计范围, Song 提出一种新的训练符号<sup>[7]</sup>,其频域矢量可表示为

$$C_{TS} = [c_0, 0, \dots, c_{2^l}, 0, \dots, c_{2^l i}, 0, \dots, c_{N-2^l}, 0, \dots, 0] \quad , \quad (6)$$

式中  $c_{2^l i}$ ,  $i = 0, 1, \dots, N/2^l - 1$  是复数据,  $l$  为大于 1 的整数。由 IDFT 的性质可知,其时域数据满足:  $x_{k+N/2^l} = x_k$ , 即训练符号分成了  $2^l$  个相互重复的序列,重复序列之间间隔减小,增大了频偏估计范围, Song 在文献 [7] 中提出了新的多状态频偏估计方法。但该训练符号在定时同步中,由于存在多个相互重复的序列,导致定时估计误差增大。

由以上分析可见,使用单个训练符号,同时要求符号同步估计精度高和频偏估计范围大,存在一定的矛盾和困难。为了解决该矛盾,需要设计出一种新的单个训练符号。首先考察式 (6) 中  $c_{2^l i}$ ,  $i = 0, 1, \dots, N/2^l - 1$  为实数时,训练符号的性质为

$$x_{k+N/2^l} = x_k \quad , \quad x_{k+N/2^{l+1}} = -x_k \quad , \quad x_{N-k} = x_k^* \quad , \quad x_{N/2^l-k} = x_k^* \quad . \quad (7)$$

由式 (7) 中  $x_{k+N/2^l} = x_k$  性质可知,该训练符号中的数据序列具有短的重复周期,因而利用文献 [7] 中多状态算法可增大频偏估计范围。但式 (7) 中  $x_{k+N/2^l} = x_k$ ,  $x_{N/2^l-k} = x_k^*$ ,  $x_{k+N/2^{l+1}} = -x_k$ , 使得训练符号对应的符号同步偏移估计函数存在多个相互之间差别不大的相关峰。为了使符号同步偏移估计函数在正确同步点处具有单值单峰特性,在式 (7) 中训练符号时域数据的基础上,引入伪随机加权因子构成新的同步训练符号:

$$x'_k = s_k x_k \quad , \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad , \quad (8)$$

式中  $s_k$  是取值为 +1 或 -1 的伪随机序列。

## 3 基于新训练符号的同步方法

根据式 (8) 定义的训练符号特点,利用其所包含数据序列的共轭对称性和伪随机因子相关特性进行符

号同步偏移估计,新的符号同步偏移估计函数定义为

$$M(d) = |P(d)|^2 / (R(d))^2 \quad (9)$$

其中

$$P(d) = \sum_{k=0}^{N/2-1} s_k s_{k+N/2} r(d+k) r(d-k+N) \quad (10)$$

$$R(d) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} |r(d+k)|^2 \quad (11)$$

$$\hat{n}_\varepsilon = \arg \max_d (M(d)) \quad (12)$$

由式(10)可见,由于加权因子 PN 序列的相关性和训练序列前后两部分的共轭对称性,使得其符号同步偏移估计函数在训练符号正确起始点处的峰值远大于其他点,从而可显著地提高符号同步的估计精度。

获得正确的符号同步偏移估计后,可确定训练符号的起点。此后,对式(8)的训练符号进行去除加权因子处理,恢复产生出具有式(7)性质的新训练符号  $r'_k, k=0, 1, \dots, N-1$ ,  $r'_n$  包含间隔长度不等的重复序列,利用不同序列的频偏估计具有不同的频偏估计范围。首先考察利用训练符号  $r'_n$  中间隔最长的序列进行频偏估计:

$$\hat{v}_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \text{angle} \left\{ \sum_{m=0}^{N/2-1} r'^*(n) \cdot r'(n+N/2) \right\} \quad (13)$$

由于函数  $\text{angle}(\cdot)$  的周期为  $2\pi$ , 因而  $\hat{v}_1$  的估计范围为  $\pm 1$ 。当  $|v| > 1$  时  $v$  与  $\hat{v}_1$  的关系为

$$v \approx 2q + \hat{v}_1 \quad (14)$$

式中  $q$  为整数。然后,再利用训练符号  $r'_n$  中间隔最短符号相反的序列进行频偏估计为

$$\hat{v}_2 = \frac{2^l}{\pi} \cdot \text{angle} \left\{ - \sum_{m=0}^{2^{l+1}-1} \sum_{n=0}^{N/2^{l+1}-1} r'^*(n+mN/2^{l+1}) \cdot r'(n+(m+1)N/2^{l+1}) \right\} \quad (15)$$

由于函数  $\text{angle}(\cdot)$  的周期为  $2\pi$ , 因而  $\hat{v}_2$  的估计范围为  $\pm 2^l$ 。当  $|v| < 2^l$  时,

$$\hat{v}_2 \approx 2q + \hat{v}_1 \quad (16)$$

因而  $q$  的估计可表示为

$$\hat{q} = \arg \min_q \{ \hat{v}_2 - 2q - \hat{v}_1 \} \quad (17)$$

系统总的频偏估计可表示为

$$\hat{v} = 2\hat{q} + \hat{v}_1 \quad (18)$$

在频偏估计中,若训练符号数据  $r'_k, k=0, 1, \dots, N-1$  中的噪声服从高斯分布,训练符号的信噪比为  $\rho$ , 则系统总的频偏估计满足:

$$\text{var}(\hat{v}) \geq \text{var}(\hat{v}_1) \geq 2/(\pi^2 N \cdot \rho) \quad (19)$$

## 4 计算机仿真结果

对文中所提出的同步方法进行了计算机仿真验证。仿真过程中,系统的主要参数选为:子载波个数  $N=1024$ ;循环前缀采用 128 个采样点;采用 WSSUS 无线多径信道模型,最大路径数为 16,相邻路径间的时延间隔为 8 个采样间隔,传输系数幅度服从瑞利分布,信道延迟功率谱(PDF)选择了具有负指数分布的模型。假定信道相关时间远大于 OFDM 系统突发传输时间。在仿真中,新设计的导频符号参数  $l$  取为 5,伪随机序列选为 1024 长的 M 序列。为了便于性能比较,同时模拟了文献[5,7]中同步方法。由于均方误差(MSE)可同时反映估计的偏移和方差两个方面的性能指标,因而在性能测试中采用均方误差比较各种同步方法的估计性能。

图 1 给出了经过无线多径信道传输后 3 种同步方法符号定时估计的均方误差曲线。同其他方法相比,在信噪比小于 15 dB 时,新方法优于文献[5,7]中的方法,在信噪比大于 15 dB 时,与文献[5]中方法的均方误差曲线基本重合。

由定时估计的结果确定 OFDM 训练符号的起点,去除伪随机加权因子,获得用于频偏估计的训练符号。图 2 是 3 种频偏估计算法在信噪比为 30 dB 时,频偏估计的均值与归一化频偏之间的关系曲线。新算法归一化频偏估计范围为  $\pm 32$ ,文献[5]的频偏估计范围为  $\pm 1$ ,文献[7]的频偏估计范围为  $\pm 16$ 。

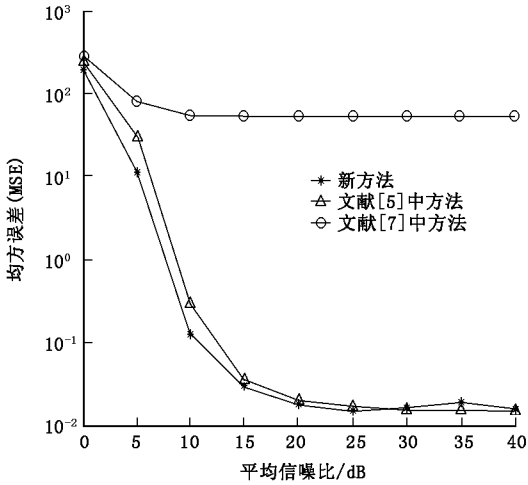


图 1 符号估计均方误差曲线

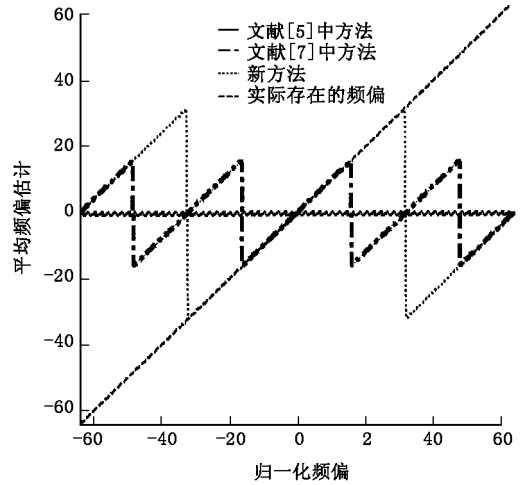


图 2 SNR = 30 dB 频偏估计算法的均值曲线

图 3 是 3 种频偏估计方法的均方误差曲线。M<sub>7</sub> 是式 (19) 给出的在 Gaussian 白噪声情况下的估计下限。新方法和文献 [7] 中方法在不同频偏下估计性能基本相同,但文献 [5] 中方法当实际存在的频偏超出其估计范围时,存在大的偏移。

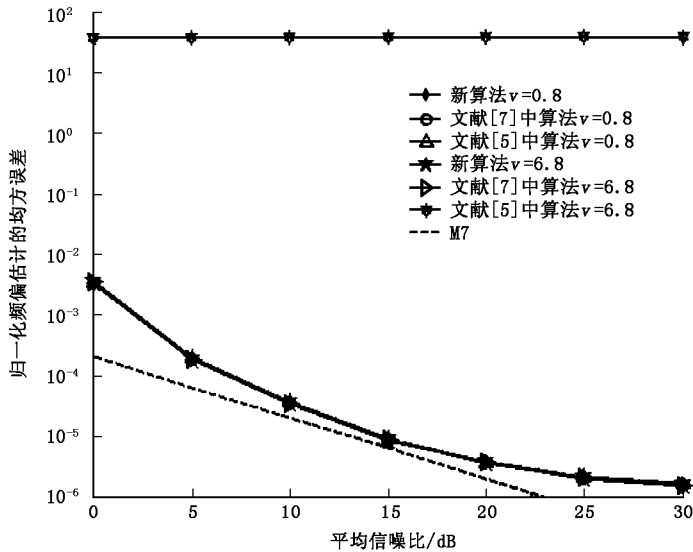


图 3 频偏估计的均方误差曲线

### 5 结 论

在分析 OFDM 系统中训练符号性质的基础上,通过引入伪随机加权因子,提出了一种新的训练符号设计方案,并提出了基于该符号的定时同步和载波频率偏移估计的新方法,同其他方法相比,其符号同步精度高,频偏估计范围大。所提出同步方法可提高无线分组 OFDM 系统的传输出效率和同步系统的性能。

#### 参考文献:

[ 1 ] Prasetyo B Y, Said F, Aghvami A H. Fast Burst Synchronisation Technique for OFDM-WLAN Systems[ J ]. IEE Proc Commun, 2000, 147( 5 ): 292-297.  
 [ 2 ] 任光亮 张 辉,常义林. 基于虚载波的 OFDM 系统信噪比盲估计方法[ J ]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31( 2 ): 186-189.

