

# 一种 SC-FDE 系统中的定时捕获算法

张雪芬<sup>1</sup>, 邵华伟<sup>2</sup>ZHANG Xue-fen<sup>1</sup>, SHAO Hua-wei<sup>2</sup>

1. 山东经济学院 计算机科学与技术学院, 济南 250014

2. 山东省药品检验所, 济南 250012

1. Department of Computer Science and Technology, Shandong Economic University, Ji'nan 250014, China

2. Shandong Institute for the Control Pharmaceutical Products, Ji'nan 250012, China

E-mail: z\_xf@sdu.edu.cn

ZHANG Xue-fen, SHAO Hua-wei. New timing acquisition algorithm for SC-FDE system. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(8): 152-154.

**Abstract:** A new timing acquisition algorithm is proposed that can estimate the timing offset using only one training frame. This algorithm is intrinsically robust to multipath channel. The proposed algorithm has much better precision and fewer computations. Simulation results show that the method can solve the synchronization question in the SC-FDE system.

**Key words:** SC-FDE; timing offset; CP

**摘要:** 介绍了单载波频域均衡(Single Carrier system with Frequency Domain Equalization, SC-FDE)系统中的定时同步问题, 提出了一种新的定时捕获算法。算法仅使用一帧辅助数据就可以完成定时捕获, 并对算法的可靠性进行了仿真。结果表明, 该算法较好地解决了 SC-FDE 系统的接收端的定时捕获问题。

**关键词:** SC-FDE; 定时同步; CP

**文章编号:** 1002-8331(2008)08-0152-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TN763

随着无线通信技术的飞速发展, 宽带无线接入系统日益成为人们关注的热点。许多国际性组织都对宽带无线接入系统制订了相应的标准, 其中 IEEE802.16 标准体系对物理层关键技术建议了两种可供选择方案, 即正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)和 SC-FDE 系统<sup>[1]</sup>。此标准的制定, 推动了 SC-FDE 的研究进展。基于 FFT/IFFT 实现的正交频分复用(OFDM)技术可以有效克服频率选择性衰落带来的载波干扰和码间干扰, 因此成为无线通信和移动通信领域的热点<sup>[2,3]</sup>。但是, OFDM 系统存在对定时误差、载频同步误差比较敏感和大的峰均功率比(PAPR)等不足, 直接影响了 OFDM 技术的更大规模应用。SC-FDE 系统基于 OFDM 系统信号处理方式, 发送的是调制后的高速率单载波信号, 接收端通过 FFT 和 IFFT 变换来实现频域均衡, 这种结构能够克服 OFDM 系统的不足, 并在保持相同复杂度的同时, 获得与 OFDM 系统近似的性能。

SC-FDE 系统对定时偏差特别敏感, 定时偏差对系统的性能会产生很大的影响, 所以接收端需要对定时偏差进行估计和补偿。本文分析研究了 SC-FDE 的定时捕获问题。

## 1 SC-FDE 系统基本结构

SC-FDE 系统是宽带无线传输中一种很有前途的抗多径

干扰的方法, 但目前研究较少。SC-FDE 系统发送的是调制后的高速率单载波信号, 接收端通过 FFT 和 IFFT 变换来实现频域均衡, 实际上是对接收信号的频域分析。系统的结构如图 1 所示, 该系统使用  $N$  点 FFT 变换和有  $N$  个抽头系数的频域均衡器。

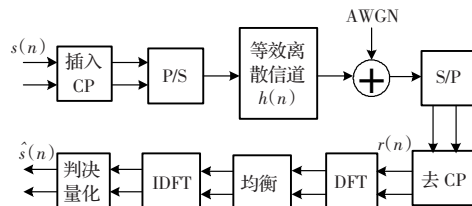


图 1 单载波频域均衡传输系统方框图

采用以循环前缀 CP 作为保护间隔的离散 SC-FDE 模型, 如图 1 所示。设 SC-FDE 系统发送端送出经量化后的一帧信号为  $s(n), n=0, 1, \dots, N-1$ ; 信道脉冲响应为  $h(n), n=0, 1, \dots, L_h-1$ ,  $L_h$  小于 CP 长度  $L$ 。信号传输过程中要受到加性白高斯噪声(AWGN: Additive White Gauss Noise)的干扰, 设噪声为  $w(n), n=0, 1, \dots, N-1$ ; 接收端接收到的信号为  $r(n), n=0, 1, \dots, N-1$ , 去掉 CP 后得到:

$$r(n) = s(n) \otimes h(n) + w(n), n=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

$\otimes$  表示循环卷积运算, 频域表达式为:

$$R(k)=S(k)H(k)+W(k), k=0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

其中  $R(k)$ 、 $S(k)$ 、 $H(k)$ 、 $W(k)$  分别为通过对  $r(n)$ 、 $s(n)$ 、 $h(n)$ 、 $w(n)$  做离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 得到的频域形式,  $H(k)$  ( $k=0, 1, \dots, N-1$ ) 为信道的传输函数。

设发送信号  $s(n)$  的单个符号周期为  $T_c$ , 系统存在定时偏差  $\Delta t$ , 表示接收信号起始时刻与抽样起始时刻的差值, 则  $\Delta t$  为绝对时偏, 单位为 s, 定义相对时偏  $\tau = \frac{\Delta t}{T_c}$ , 为绝对时偏与单个符号持续时间的比值。

当系统存在归一化相对时偏  $\tau$  时, 接收信号频域表达式变为:

$$R(k)=S(k)H(k)\exp\frac{j2\pi\tau(k+L)}{N}+W(k)\exp\frac{j2\pi\tau(k+L)}{N} \quad (k=0, 1, \dots, N-1) \quad (3)$$

当时偏很小时, 系统可以正常工作, 设  $\hat{H}(k)$  为利用一定的信道估计算法得到  $H(k)$  的估计值。然后进行信道均衡, 以迫零 (ZF) 均衡方式为例, 均衡后的信号为

$$\hat{X}(k)=\frac{R(k)}{\hat{H}(k)}, k=0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

其中,  $\hat{H}(k)$  表示信道频域响应  $H(k)$  的估计值, 它是由特定的信道估计算法给出, 对  $\hat{X}(k)$  进行 IFFT 变换, 然后根据判决规则量化, 就可以得到这一帧 SC-FDE 数据信息的估计值  $\hat{s}(n)$ 。

## 2 一种新的定时捕获算法

设 SC-FDE 系统传输帧中有用符号长度为  $N$ , CP 点数为  $L$ , 则对应一帧 SC-FDE 信号, 共有  $L_f=N+L$  个符号需要传送。设系统传送每个符号用时  $T_s$ , 这也就是 D/A 转换器的抽样间隔, 则传送一帧 SC-FDE 信号的时间为  $T_f=L_fT_s=(N+L)T_s$ 。设系统存在帧同步误差  $d$  ( $d$  是整数倍的抽样时间间隔,  $0 \leq d < L_f - 1$ ); 抽样时刻的误差  $\tau T_s$ , 其中  $\tau$  为相对时偏,  $0 \leq \tau < 1$ 。SC-FDE 系统的定时捕获算法分为整数时偏估计和小数时偏估计两部分完成, 分别估计参数  $d$  和  $\tau$ 。

本文提出一种采用训练帧的定时同步捕获算法, 它改进了 Schmidl 和 Cox 提出的时偏估计算法, 用一个训练符号完成时偏整数部分和小数部分的估计, 提高了定时同步的精度。其训练帧结构如图 2 所示。



图 2 SC-FDE 训练符号帧结构

训练符号  $A$  记为  $A(n)$ ,  $n=0, 1, \dots, \frac{N}{4}-1$ , 它的选取与

Schmidl 和 Cox 提出的定时算法中第一个训练符号相似, 只是对产生参考符号的 PN 序列没有特殊规定。

### 2.1 整数时偏估计

Schmidl 和 Cox 算法中, 用于定时的训练符号具有前后对称的特性, 但是由于循环前缀是帧符号最后部分的复制, 使得对相距  $\frac{N}{2}$  的样值求相关时, 前缀与它对应的复制值的一致性

造成峰值重复出现, 以致定时测度出现一个平台。为了消除平台现象, 必须使得循环前缀部分求相关运算在总的相关运算中的比例减少。所以在采用如图 2 所示的训练帧结构时, 充分利用训练符号中相同符号不同位置的关系, 扩大相关的数目。对训练帧四部分两两取相关。相关数目增多, 减少了循环前缀部分在求相关运算中的比例, 有效避免了平台现象。

算法中参考符号相关求和表示为:

$$P_1(d)=-\sum_{m=0}^{\frac{N}{4}-1} r^*(d+m)r\left(d+m+\frac{N}{4}\right)-\sum_{m=0}^{\frac{N}{4}-1} r^*\left(d+m+\frac{N}{4}\right)r\left(d+m+\frac{N}{2}\right)-\sum_{m=0}^{\frac{N}{4}-1} r^*\left(d+m+\frac{N}{2}\right)r\left(d+m+\frac{3N}{4}\right)-\sum_{m=0}^{\frac{N}{4}-1} r^*(d+m)r\left(d+m+\frac{3N}{4}\right)+\sum_{m=0}^{\frac{N}{4}-1} r^*(d+m)r\left(d+m+\frac{N}{2}\right)+\sum_{m=0}^{\frac{N}{4}-1} r^*\left(d+m+\frac{N}{4}\right)r\left(d+m+\frac{3N}{4}\right) \quad (5)$$

接收到的训练帧第二部分的信号能量由两部分组成, 定义为:

$$R_1(d)=\sum_{m=0}^{\frac{N}{4}-1} \left| r\left(d+m+\frac{N}{2}\right) \right|^2 + \sum_{m=0}^{\frac{N}{4}-1} \left| r\left(d+m+\frac{3N}{4}\right) \right|^2 \quad (6)$$

这样, 可以获得符号定时检测的一个测度:

$$M_1(d)=\frac{|P_1(d)|^2}{|R_1(d)|^2} \quad (7)$$

定时测度最大值对应的时刻就是参考符号的第一个样点时刻, 即:

$$\hat{d}=\arg\{\max[M_1(d)]\} \quad (8)$$

如图 3 所示, 该算法所求定时测度  $M_1(d)$  的峰值尖锐性比 Schmidl 和 Cox 提出时偏估计的算法有明显提高。仿真采用两种信道模型, 一种是 AWGN 信道, 另外一种信道模型为 IEEE802.16.3 中建议的改进 SUI (Stanford University Interim) 信道中的 SUI-5 型信道<sup>[4,5]</sup>。对比分析在 SUI-5 信道和 AWGN 信道下的曲线, 可见该算法具有较强的抗多径衰落能力。

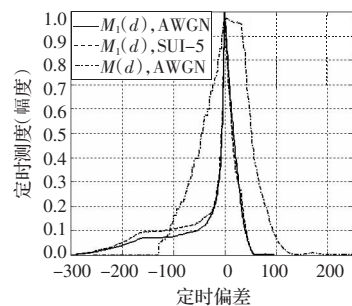


图 3 两种定时测度的比较 ( $N=256$ ,  $SNR=10$  dB)

### 2.2 小数时偏估计

考查在符号长度为  $N$ 、CP 长度为  $L$  的 SC-FDE 系统, 采用的信道是理想的, 并且没有噪声。当系统存在抽样时刻的误差  $\tau T_s$ , 即归一化相对时偏  $\tau$  时, 接收到的信号频域形式为:

$$R(k)=S(k)\exp\frac{j2\pi\tau(k+L)}{N} \quad (k=0, 1, \dots, N-1) \quad (9)$$

当存在时偏 $\tau$ 时,训练帧中 $R(k)$ 和 $R(k+\frac{N}{2})$ 样值角度偏

转了 $\frac{2\pi(\frac{N}{2})\tau}{N}=\pi\tau$ ,把样点 $R(k)$ 与延迟了 $\frac{N}{2}$ 个间隔的样点做相关:

$$P=\sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} R^*(k)R(k+\frac{N}{2})=e^{j\pi\tau}\sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} |R^*(k)| \left| R(k+\frac{N}{2}) \right| \quad (10)$$

因此可以采用下式来估计小数时偏 $\tau$ :

$$\hat{\tau}=\frac{\text{angle}(P)}{\pi} \quad (11)$$

由此可知,小数时偏的估计是利用接收信号频域上相位的变换推导而出,算法的思路和在OFDM系统中频偏估计思路相同,文献[6]推导出了OFDM系统中频偏估计的Cramer-Rao界,同理,SC-FDE系统关于定时偏差 $\tau$ 的估计Cramer-Rao界为:

$$\text{Var}(\tau)=\frac{1}{\pi^2(\frac{N}{2})\text{SNR}} \quad (12)$$

### 3 仿真结果与结论

仿真在帧长为256的SC-FDE系统中进行,采用两种信道

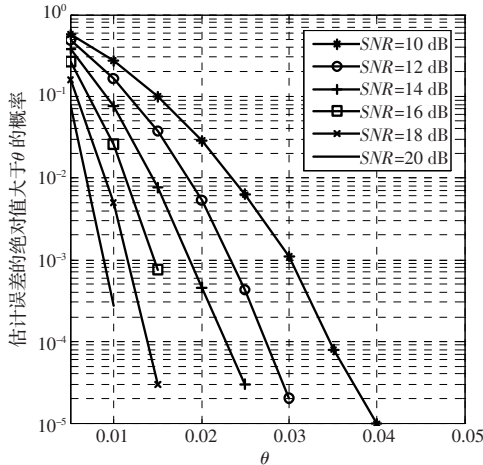


图4 定时捕获算法的可靠性(帧长256)

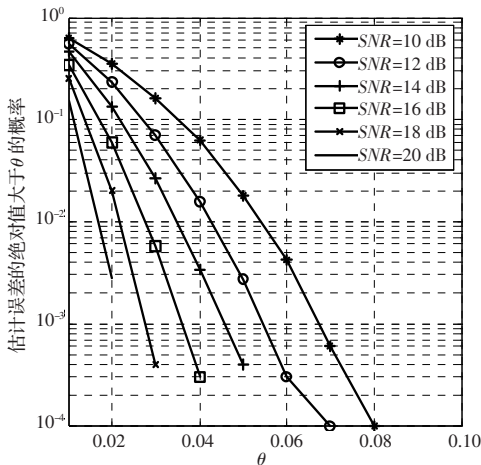


图6 定时捕获算法的可靠性(SUI-5信道)

模型。由于算法采用训练帧结构,发送一帧信号所需要的时间很短,远小于时变信道的相干时间,在此期间信道的变化也是很小的,所以在仿真中,一种信道模型采用恒参5径信道(记为Multipath)。信道的脉冲响应为 $h(0)=1+i, h(7)=0.5-0.3i, h(9)=0.3+0.2i, h(21)=0.2-0.1i, h(30)=0.1$ ,其余分量为0;另外一种信道模型为SUI-5。

首先考查捕获算法估计时偏的可靠性,采用上述恒参5径信道,每点 $10^5$ 次仿真。图4给出了在AWGN信道环境下,相对时偏为6.6时算法的可靠性。从图上可以看出,在信噪比低至10 dB时,也能将估计误差的绝对值严格控制在0.04个符号间隔以内。图5和图6分别给出了在恒参5径信道Multipath和SUI-5信道下的可靠性,从图中可以看出,与AWGN信道相比,捕获算法的估计性能稍差,但是在信噪比较低的条件下,仍能将估计误差的绝对值严格控制在0.08个符号间隔以内。图7考查了定时捕获算法估计误差(绝对值)大于0.1的概率,图8考查了算法的均方误差。

### 4 结束语

本文中提出了一种新的定时捕获算法。算法仅使用一帧辅助数据就可以完成定时捕获。由仿真结果可以看出,该算法捕获可靠性高,可以将相对时偏严格控制在0.1个抽样间隔以内,确保系统的正常工作。

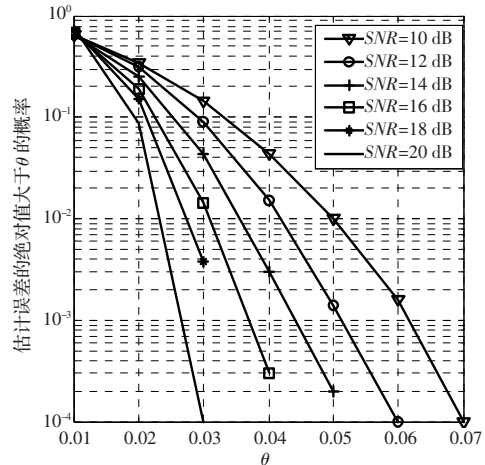


图5 定时捕获算法的可靠性(Multipath信道)

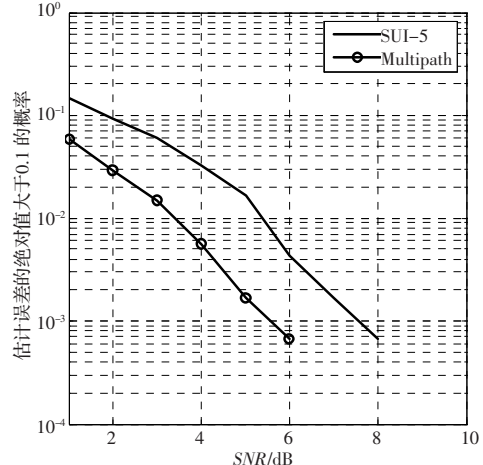


图7 定时捕获算法估计误差(绝对值)大于0.1的概率