

## 一种基于数据辅助的 OFDM 系统符号同步算法

高燕 王炎 尤肖虎

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

**摘要:** 该文提出了一种改进的 OFDM 系统符号同步算法。在集相关法估计出 FFT 有效采样窗的基础上, 加以数据的辅助, 将恢复后的符号序列再次进行 OFDM 调制并与接收信号作相关, 能够求出符号到达的准确时刻。这种基于数据辅助的方法提高了估计过程中的信噪比。仿真结果表明, 该方法在多径衰落信道下能获得较好的定时同步性能。

**关键词:** OFDM; 符号同步; 循环前缀; 多径衰落信道

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)01-0044-04

## A Data-Aided Symbol Synchronization Algorithm for OFDM Systems

Gao Yan Wang Yan You Xiao-hu

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** An improved symbol synchronization algorithm for OFDM systems is proposed in this paper. Based on the assemble correlation method which estimates the available sampling window for FFT, the recovered binary serial is modulated for the second time. By computing the correlation of received signal and the twice modulated signal, the correct symbol timing is obtained. This data-aided method increases the SNR during the estimation. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm has good timing synchronization performance over multi-path fading channel.

**Key words:** OFDM; Symbol synchronization; Cyclic-prefix; Multi-path fading channel

### 1 引言

正交频分复用(OFDM)技术是一种特殊的多载波传输技术, 它由于具有很强的抗频率选择性、衰落性能和较高的频谱利用率, 并且能实现高质量、高速率的数据传输而备受关注, 有望成为下一代移动通信系统的核心技术。

同步是 OFDM 的一项关键技术, OFDM 系统对时间和频率同步误差非常敏感。载波频率的偏差会导致载波间干扰(ICI), 而符号的时间同步偏差则会导致码间干扰(ISI)<sup>[1]</sup>。OFDM 的时间同步方法通常分为两类: (1)基于循环前缀法, 利用循环前缀(CP)的相关特性来估计时间同步, 如 van de Beek 提出的最大似然估计(ML)法<sup>[2]</sup>和 Kenkichi 提出的差分法<sup>[3]</sup>。(2)基于导频法, 通过在传输符号中插入特殊的导频符号来辅助估计, 如 Schmidl 和 Cox 提出的 SC 法<sup>[4]</sup>。本文在已有同步算法的基础上提出一种新的基于数据辅助的符号同步方法, 将信道估计后恢复的 OFDM 符号用于辅助估计, 仿真结果表明, 该方法可以得到更为精确的符号定时估计。

### 2 OFDM 系统模型

一个基本的 OFDM 系统实现框图如图 1 所示。OFDM 系统将数据流分成若干个子比特流, 并用子比特流的数据去

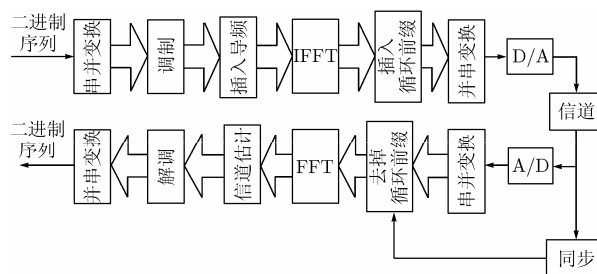


图 1 OFDM 系统实现基本框图

调制若干个相互正交的子载波。设  $X_k$  为第  $k$  个子载波上调制的基带数据, 在数字通信系统中, 调制过程可由 IDFT 变换来实现, 一个 OFDM 符号持续时间内的发送信号序列表示为

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(j \frac{2\pi kn}{N}\right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

在多径信道中, 接收信号为发送信号经过  $M$  条互相独立的路径之后的迭加:

$$r(n) = \sum_{m=0}^{M-1} s(n - \tau_m) c(n, \tau_m) + w(n) \quad (2)$$

其中  $w(n)$  为零均值的高斯白噪声,  $c(n, \tau_m)$  为每条路径的瑞利衰落参数, 对应的信道多径时延为  $\tau_m$ 。如果时间和频率同步, 信号在去除循环前缀和进行 FFT 变换之后, 在频域中表示为

$$Y_k = X_k H_k + W_k \quad (3)$$

其中  $H_k$  为信道响应函数在第  $k$  个子载波上的参数,  $W_k$  为加性高斯白噪声的傅里叶变换。 $Y_k$  经信道估计和矫正后, 进行解调和串并转换恢复二进制数据。

### 3 符号同步算法

#### 3.1 基于循环前缀的符号同步算法

为了保证子载波之间的正交性, OFDM 系统在每个 OFDM 符号之间插入宽度为  $T_g$  的循环前缀, 其中的信号是 OFDM 符号尾部宽度为  $T_g$  的信号的复制。一般要求最大多径时延小于循环前缀宽度, 这样可以保证时延副本不会对下一个符号造成干扰, 并且在一个 FFT 周期内不会发生信号相位的跳变, 仅仅会存在一些相位的偏移。

由于循环前缀与符号尾部信号的相关性, 可被用于时间同步估计。van de Beek 提出一种利用循环前缀的时间频率联合同步算法<sup>[2]</sup>, 通过计算最大似然函数来估计时间和频率。但是该方法只适用于单径 AWGN 信道。因为当信号经过多径信道时, 循环前缀中的一部分数据受到 ISI 的影响, 与符号尾部信号的相关性被破坏, 这时最大似然函数的估计结果将出现偏差。

文献[5]提出的“集相关”方法在多径情况下改善了同步性能。通过计算归一化集相关函数:

$$P(n) = \frac{\left| \sum_{m=0}^{M-1} r^*(n + m(N + L))r(n + m(N + L) + N) \right|}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} |r(n + (m(N + L)))|^2} \sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} |r(n + (m(N + L) + N))|^2}}, \quad (4)$$

$$0 \leq n < N + L$$

独立观察每个采样点与其对应延迟点的相关关系, 可以更好地提取时延扩展和定时信息, 划分出无 ISI 干扰的有效采样窗起始点的范围, 避免被破坏的信号用于估计而破坏估计性能。如图 2 所示, 函数顶部平坦的区域对应于未受 ISI 干扰的部分循环前缀。但是文献[5]并没有给出符号定时估计的具体实现方法, 需要进一步改进。

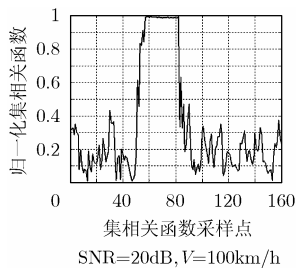


图 2 归一化集相关函数

#### 3.2 基于数据辅助的 OFDM 系统符号同步算法

基于循环前缀的定时同步方法通常被称为盲估计算法。

由于发送端信号的信息未知, 这类方法在估计时完全基于接收到的信号, 利用信号本身的特性进行分析处理。但是当噪声功率增大到一定的程度, 加上多径造成的干扰, 接收端 OFDM 信号的特性被破坏, 将会大大影响符号定时估计的性能。考虑到接收信号与发送信号的相关函数可以给出准确的时延信息, 如图 3 所示, 如果能够在估计中用发送信号的信息加以辅助, 则相当于提高了信噪比, 必然有助于改善低信噪比条件下的估计性能。

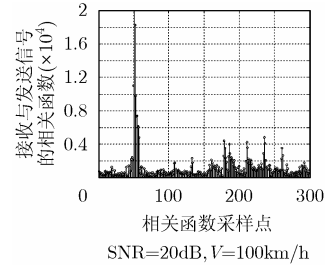


图 3 理想情况下接收与发送信号的相关函数

本文在上述集相关法的基础上进一步加入数据信息来辅助估计, 以提高符号同步精度。基本框图如图 4 所示。

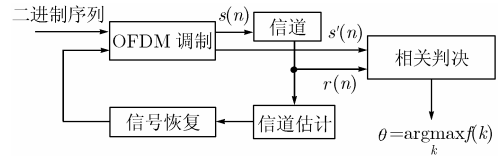


图 4 本文算法实现框图

在多径信道环境下的 OFDM 系统中, 集相关函数式(4)有一段平坦的峰值, 其宽度等于循环前缀中不受 ISI 干扰的区域宽度。取这段区域内的采样点为起始点得到的 FFT 变换窗与发送的数据窗相比, 在时域上产生了循环移位, 相当于输出频域信号产生相位偏移, 但模值不变。取无 ISI 干扰区域的中点为粗同步估计, 并结合信道估计, 就能初步恢复出频域信号  $X_k$ 。

由式(3)知  $Y_k = X_k H_k + W_k$ , 假设信道估计得到的信道参数为  $H_{ek}$ , 则矫正后的频域信号为

$$X_{ek} = \frac{Y_k}{H_{ek}} = \frac{X_k H_k + W_k}{H_{ek}} = X_k \cdot \frac{H_k}{H_{ek}} + \frac{W_k}{H_{ek}} \quad (5)$$

对  $X_{ek} (k = 0, 1, \dots, N - 1)$  进一步进行解调和串并变换, 即可恢复出二进制的源符号。信道估计得越准确, 则误码率越低。

将恢复后的二进制序列再一次进行 OFDM 调制, 可得近似的发送信号

$$s_e(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_{ek} \exp\left(j \frac{2\pi kn}{N}\right), \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (6)$$

$s_e(n)$  包含了丰富的已知信息, 将它用来辅助估计 OFDM 的符号定时信息, 将在很大程度上提高同步估计精度。

实际接收信号在经过多径衰落信道后受到衰落、频偏、时延以及高斯噪声的影响,表示为

$$r(n) = \alpha(n)s(n - \theta)e^{-j2\pi\epsilon n/N} + w(n) \quad (7)$$

对  $r(n)$  和  $s_e(n)$  作相关运算:

$$\begin{aligned} f(k) &= \sum_n s_e^*(n)r(k+n) \\ &= \sum_n \left\{ s_e^*(n) \left[ \sum_{m=0}^{M-1} s(k+n-\tau_m)c(k+n, \tau_m) + w(k+n) \right] \right\} \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \left[ \sum_n s_e^*(n)s(k+n-\tau_m)c(k+n, \tau_m) \right] \\ &\quad + \sum_n s_e^*(n)w(k+n) \end{aligned} \quad (8)$$

由于高斯白噪声是独立分布的,式(8)中第2项可近似等于零。假设信道在一个 OFDM 符号内保持不变,在信道估计较为准确时,式(8)第1项中  $\sum_n s_e^*(n)s(k+n-\tau_m)$  近似为发送信号自相关,在  $k-\tau_m=0$  时达到最大值。因此,搜索函数  $f(k)$  的峰值对应的坐标,为各径时延参数  $k=\tau_m$  ( $m=0,1,\dots,M-1$ )。若第一径为最强径,其他径的能量相对较弱,对性能影响不大,那么最大值对应的坐标就是接收端信号到达的起始位置,得信号时延估计为

$$\theta = \arg \max_k f(k) \quad (9)$$

结果如图5所示。

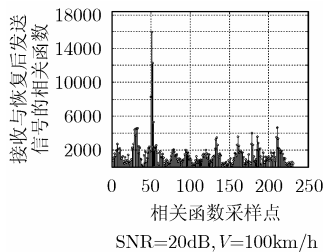


图5 接收信号与恢复后发送信号的相关函数

#### 4 仿真结果分析

本文在 Matlab 环境下对算法进行仿真分析。OFDM 系统仿真参数如表1所示。每帧时长 10ms,划分为 20 个子帧,每个子帧中含有 7 个 OFDM 符号。信道为 6 径瑞利衰落信道,每条径时延相差两个采样点,第一条径无时延,每条径的功率分布如图6所示。信道估计采用 LS 算法。

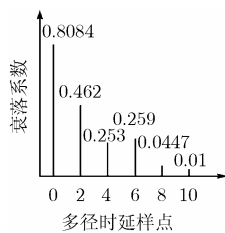


图6 多径信道功率分布图

表1 OFDM 系统仿真参数

带宽	1.25MHz
子帧持续时间	0.5ms
子载波间隔	15kHz
采样频率	1.92MHz
FFT 点数	128
子载波数	76
循环前缀长度	32
导频间隔	5

在上述参数条件下对本文提出的基于数据辅助的 OFDM 系统符号同步算法进行仿真,并将仿真结果与文献[6]提出的 ML 改进算法(简称 Robust ML 法)仿真结果作比较。图7给出了两种算法的归一化符号同步误差均值随信噪比变化的曲线。其中误差均值小于零的部分表示符号同步估计位置在正确位置之前,而大于零的部分则表示符号同步估计位置在正确位置之后。

从图7可以看出,Robust ML 法虽然相对于 ML 法已有改善,但是在多径衰落信道下的性能仍然不够理想。而本文提出算法的符号同步误差均值明显小于 Robust ML 法,且随着信噪比的增加,符号同步逐渐接近正确位置。本文提出的算法得到的符号同步误差均值小于零,说明符号同步估计位置在正确位置之前,因此接收信号中 FFT 采样窗的起始时间也在正确的数据段起始时间之前,保证了采样数据不会受到下一个 OFDM 符号的影响。另外,根据 OFDM 系统及多径信道仿真参数,不受 ISI 影响的循环前缀段相对于数据段起始时刻的范围为  $[-21, 0]$ ,归一化后的范围为  $[-0.1313, 0]$ ,从图7可以看出,本文提出算法得到的符号同步误差能够保证 FFT 采样窗起始时刻在无 ISI 干扰的循环前缀部分。

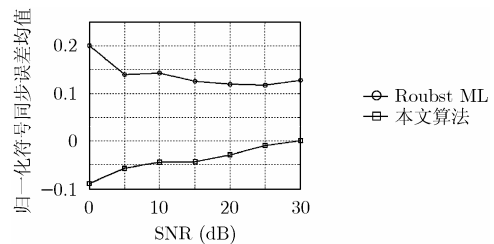


图7 多径衰落信道下符号定时误差

图8给出了在本文算法实现过程中加入了数据辅助前后的接收端误码率的比较。从图中可以看到,由于加入了数据辅助,相当于在符号同步估计时提高了系统的信噪比,因此同步估计性能相对于未加数据辅助之前有明显的改善,因此接收端的误码率也随之降低。并且随着信噪比的增加,误码率降低的幅度变大。

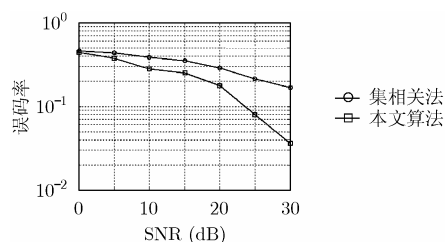


图 8 基于数据辅助和无数据辅助的符号同步算法误码率比较

## 5 结束语

本文提出了一种基于数据辅助的 OFDM 系统定时同步算法。文献[5]提出的集相关法解决了信道多径对循环前缀相关性的影响,给出了无 ISI 采样点的范围,但是信号具体的起始位置并没有明确的计算。本文在此基础上结合信道估计恢复出二进制信号,对恢复后的二进制序列再一次进行 OFDM 调制,用于与接收信号作相关,能够得出较为精确的符号定时估计。仿真结果表明,该算法在多径衰落信道下能获得很好的符号同步性能。

## 参考文献

- [1] van Nee R and Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications. Boston, London: Artech House, 2000: 77-80.
- [2] van de Beek J J, Scandell M, and Börjesson P O. ML

estimation of time and frequency offset in OFDM systems. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1997, 45, 7: 1800-1805.

- [3] Takahashi K and Saba T. A novel symbol synchronization algorithm with reduced influence of ISI for OFDM systems. IEEE GLOBECOM, San Antonio, Texas, USA, 2001: 524-528.
- [4] Schmidl T M and Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM. *IEEE Trans. on Commun.*, 1997, 45, 12: 1613-1621.
- [5] Ramasubramanian K and Baum K. An OFDM timing recovery scheme with inherent delay-spread estimation. IEEE GLOBECOM, San Antonio, Texas, USA, 2001: 3111-3115.
- [6] Landström D, Wolson S K, van de Beek J J, Ödling P, and Börjesson P O. Symbol time offset estimation in coherent OFDM systems. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50, 4: 545-549.

高 燕: 女, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为未来宽带移动通信理论.

王 炎: 男, 1969 年生, 副教授, 研究方向为通信与雷达中的阵列天线、分布式多天线、信号处理、检测算法、以及相关的电子系统设计.

尤肖虎: 男, 1962 年生, 教授, 主要研究方向为未来宽带移动通信理论与技术、智能信号处理与通信.