

一种适用于多径衰落信道的 OFDM 系统同步算法

周 恩 陈茅茅 王文博

(北京邮电大学无线通信中心 北京 100876)

摘 要: 该文针对多径衰落信道的具体特点,提出了一种适用于无线衰落信道环境下的 OFDM 符号同步方法。此种方法利用前一帧估计的信道最大时延来调整相关窗长度,在最大程度上避开了多径的影响;并利用本帧信道估计得到的多径信息进一步完成符号精细同步。仿真证明,该方法比传统的方法有较大的性能改善,比较适合多径衰落信道环境下的符号定时同步。

关键词: 正交频分复用(OFDM), 符号同步, 多径衰落信道, 多径信息估计

中图分类号: TN929.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)10-1625-05

A Synchronization Algorithm for OFDM Based System in Multipath Fading Channels

Zhou En Chen Mao-mao Wang Wen-bo

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract In this paper, a novel synchronization algorithm is proposed for OFDM based system in multipath fading channels. In order to mitigate the effect of the multipath, the length of the correlation window is adapted according to the channel maximum time delay estimated in the fore frame. And the further fine synchronization is completed using the multipath information estimated in current frame. Simulation results demonstrate that the synchronization performances are improved greatly compared with the conventional methods. And the method is much suitable for the OFDM time synchronization in multipath fading channel environment.

Key words OFDM, Time synchronization, Multipath fading channel, Multipath estimation

1 引言

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)系统能够有效地对抗无线信道多径时延扩展的影响,成为后 3G 系统中研究的热点。在 OFDM 调制中,所有子载波保证相互正交。正是由于正交性的存在使得 OFDM 相对于传统串行调制以及一般多载波调制有很多优点。然而也是因为这一点,基于 OFDM 的系统对定时和频偏比较敏感。目前有很多文章分析了 OFDM 信号的同步问题,提出了许多解决方案^[1-11]。概括起来可分为两类,一类是基于训练符号的定时频偏估计^[1,2],这类方法可以获得较好的定时频偏估计性能。然而,由于该类方法引入了额外的训练符号来做定时频偏估计,增加了系统开销,降低了系统效率。另一大类是基于循环前缀(CP)的方法^[3-8],该类方法利用了 OFDM 信号已有的 CP,不需要额外的开销就能完成定时和频偏的估计。两类方法的定时同步性能在 AWGN 信道下都比较好,然而,一旦将这些方法应用在多径衰落信道下,其性能就恶化得很严重。到目前为止,几乎没有在多径衰落信道下定时同步性能比较满意的

方法。本文研究了利用 CP 在多径衰落信道下的定时同步方法,通过恰当地调整相关窗的大小削弱了多径的影响,并在获得粗同步后,进一步利用信道估计出的多径信息完成精细同步。仿真结果表明,该方法能够在多径衰落信道下获得较好的定时同步性能。

2 OFDM 系统模型

假设 OFDM 系统有 N 个子载波,则 OFDM 信号可表示为

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中 $X[k]$ 为第 k 个子载波上调制的基带数据。多径信道的时域冲激响应可表示为

$$h[n] = \sum_{k=0}^{J-1} a_k \delta[n - \tau_k] \quad (2)$$

其中 J 为信道的多径数目, a_k 为第 k 径信道的衰落系数, τ_k 为第 k 径的延迟样点数。在理想同步情况下,接收端接收到的信号为

$$y[n] = \sum_{k=0}^{J-1} \alpha_k x[n - \tau_k] \quad (3)$$

若存在时延和频偏,并叠加上高斯噪声后的接收信号可表示为

$$r[n] = y[n - \theta]e^{j(2\pi\varepsilon n / N)} + w[n] \quad (4)$$

其中 θ 和 ε 即是需要估计的信号时延和系统频偏, w 为高斯噪声。

3 基于 CP 的定时同步

文献[3~8]对 AWGN 信道下基于 CP 的定时和频偏估计算法进行了深入的研究。若保护间隔的长度大于信道最大时延,则系统对一定范围内的定时偏移不敏感。只要定时偏移 θ 与信道最大时延 τ_{\max} 之和不超过 CP 的长度 G (样点),符号间干扰(ISI)和载波间干扰(ICI)就可以避免。由于 CP 的循环特性,此种情况下的定时偏移只会使各个子载波产生一定的相位旋转,后面的信道估计器并不能区分这些相位旋转是由定时偏移导致的还是信道本身带来的。依靠信道估计技术,这些相位可以得到补偿,而不会恶化系统性能。然而当定时偏移 θ 大到一定程度,就会产生 ISI 和 ICI。如果保护间隔较长,符号定时的要求就可以宽松一点;另一方面,精确的符号定时允许更短的 CP,提高系统频谱效率。

文献[7]研究了 AWGN 信道下利用多个连续符号的定时频偏估计方法,推导了对数最大似然判决函数为

$$A[\theta, \varepsilon] = |\Gamma_N[\theta]| \cos\{2\pi\varepsilon + \angle\Gamma_N(\theta)\} + \Gamma_0[\theta] \quad (5)$$

这里 $\angle x$ 表示 x 的相位,

$$\Gamma_N[\theta] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=\theta+m(N+G)}^{\theta+m(N+G)+L-1} r[k]r^*[k+N]$$

$$\Gamma_0[\theta] = -\frac{\rho}{2} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=\theta+m(N+G)}^{\theta+m(N+G)+L-1} (|r[k]|^2 + |r[k+N]|^2)$$

式中 L 为相关窗宽度, M 为用来做定时频偏估计的连续符号数, $\rho = \text{SNR}/(\text{SNR}+1)$ 为与信噪比(SNR)有关的一个系数。

定时和频偏的最佳估计式为

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \{|\Gamma_N[\theta]| + \Gamma_0[\theta]\} \quad (6)$$

$$\hat{\varepsilon} = -\frac{1}{2\pi} \angle \Gamma_N[\hat{\theta}] \quad (7)$$

式中 $\hat{\theta}$ 为估计的符号定时偏移, $\hat{\varepsilon}$ 为估计的系统频偏。

这种基于CP的方法是Van de Beek^[4]提出来的,称之为J.J. ML算法。该算法在AWGN信道下能够获得较好的定时同步性能,但在多径衰落信道下,其性能较差。我们利用这种方法进行符号粗同步,但并不将该方法中的相关窗长度 L 固定为CP长度 G ,而是根据估计出的信道信息自动调整。

4 本文提出的算法

基于CP的ML算法在多径信道下的定时性能变得较差,

其因为CP中一部分数据受到ISI的干扰,导致CP与原数据在整个CP长度窗口内的相关性变差。一般情况下设定CP长度大于信道最大时延,则仍然有一部分CP未受ISI污染,如图1所示。若只利用未受ISI干扰的CP部分来做定时频偏估计,就可以较好地消除多径的影响,提高定时与频偏估计的精度。即用于J.J. ML算法的滑动相关窗长度不再固定为CP的长度,而是根据不同的信道环境,自动调整相关窗长度,以达到最佳的定时和频偏估计性能。

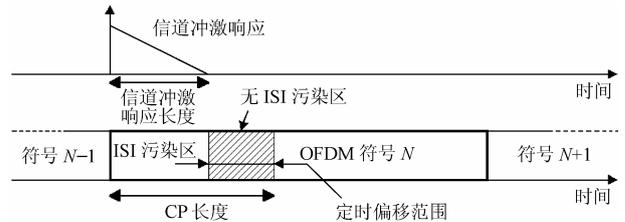


图1 多径对OFDM符号定时的影响

对于OFDM系统,一般均需要对信道进行估计以正确恢复传送的信号。将估计出的信道频域响应通过IFFT变换到时域,若信道冲激响应的模值大于一恰当门限 η ,则可判定为多径,从而可估计出信道的多径位置 λ_k ($0 \leq \lambda_k < N$, $k = 0, 1, \dots, \hat{J}-1$)。其中 \hat{J} 为估计出的多径数目。最大时延 τ_{\max} 可表示为

$$\hat{\tau}_{\max} = |[\lambda_{\hat{J}-1}]_N - [\lambda_0]_N| \quad (8)$$

定义 λ_k 的主值区间为 $(-N/2, N/2]$, $[n]_N$ 表示将 n 以 N 为周期进行周期拓展,并取落入主值区间的值作为其结果。

通常,相邻数据帧的信道多径情况是缓慢变化的,因此可以根据估计出的最大时延 $\hat{\tau}_{\max}$ 调整下一帧符号粗同步时的相关窗长度 L 为

$$L = G - \hat{\tau}_{\max} \quad (9)$$

这样就可以跟踪信道的变化,使得符号粗同步的相关窗自适应调整为无ISI污染的CP部分,提高了符号粗同步的精度。这样的改进相对于采用固定CP长度(G 个样点)做为相关窗长度的算法,性能有了较大的改善。

通过符号粗同步,可以将FFT窗的起始位置基本锁定在无ISI干扰的CP部分。当相关窗的长度减小时,多径影响减弱,噪声影响增强,因此,对于某个特定的信道环境,存在一个最佳的相关窗长度。通过粗同步获得的FFT窗的位置 κ_0 为

$$\hat{\kappa}_0 = \hat{\theta} + L \quad (10)$$

在多径衰落信道下,引入自适应相关窗的粗同步方法与直接利用J.J. ML算法相比,定时同步性能得到了较大提高,然而其性能还可以进一步改善。一方面,多径衰落信道给

OFDM 系统定时同步带来了困难,另一方面,如果可以将多径信道的信道信息引入符号定时,则可以获得更精确的同步。

在获得符号粗同步后,对频偏进行了正确估计和补偿,时域接收信号可表示为

$$r[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k]H[k]e^{j\frac{2\pi}{N}k(n+g)} + w[n] \quad (11)$$

其中 g 为粗同步后系统残余符号定时偏差。将接收信号 $\{r[n]\}$ FFT 变换到频域,有

$$\begin{aligned} R[m] &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{k=0}^{N-1} X[k]H[k]e^{j\frac{2\pi}{N}k(n+g)} \right) e^{-j\frac{2\pi}{N}mn} + W[m] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k]H[k]e^{j\frac{2\pi}{N}kg} \left(\sum_{n=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}(k-m)n} \right) + W[m] \\ &= X[m]H[m]e^{j\frac{2\pi}{N}mg} + W[m] \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $W[m]$ 为频域噪声样点。信道估计器估计的信道频域响应为

$$\hat{H}[m] = H[m]e^{j\frac{2\pi}{N}mg} \quad (13)$$

$H[m]$ 为理想同步时的信道频域响应。估计出的信道冲激响应为

$$\begin{aligned} \hat{h}[n] &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} \hat{H}[m]e^{j\frac{2\pi}{N}mn} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \left(\sum_{k=0}^{N-1} h[k]e^{-j\frac{2\pi}{N}km} \right) e^{j\frac{2\pi}{N}(n+g)m} = h[(n+g)_N] \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $(n)_N$ 表示 n 模 N 的余数。可见,残余定时偏差将反映在所估计出的信道冲激响应上面。在根据门限 η 估计出信道多径信息后,根据得到的第一径位置 λ_0 就可以获得粗同步后的定时残余偏差 g 的估计值:

$$\hat{g} = [\lambda_0]_N \quad (15)$$

经过细同步调整后,FFT 窗的起始位置为

$$\hat{\kappa} = \hat{\kappa}_0 + \hat{g} \quad (16)$$

门限 η 的选取将影响多径信息的估计性能,从而也将影响定时同步的性能。根据 IFFT/FFT 的线性性质经 IFFT/FFT 变换后的噪声分布不变,仍是均值为 0 方差为 σ^2 的高斯分布。可根据噪声模值小于门限的概率 P_T 来设计 η , 即

$$\Pr(|w[n]| < \eta) = P_T \quad (17)$$

其中 $\Pr(x)$ 为 x 出现的概率。由于复高斯噪声的模值呈 Rayleigh 分布,可推得门限 η 为

$$\eta = \sqrt{-\ln(1 - P_T)} \sigma \quad (18)$$

加入同步算法后的整个 OFDM 系统如图 2 所示。接收到的信号首先进行符号粗同步和频偏估计。在粗同步中,相

关窗的宽度初始设定为 CP 长度 G 。在频偏补偿后,再利用信道估计器提供的信息估计信道的多径情况,并利用估计出的多径信息完成符号精细同步。由于需要动态估计信道多径情况,本文所提同步算法计算复杂度有所增加。然而,OFDM 系统本身就需要做信道估计,通常也要将信道估计的频域响应变换到时域,并在时域用一恰当门限去除噪声,再变换到频域以提高信道估计精度。因此,本文同步算法在此基础上,并未额外增加多少计算复杂度。

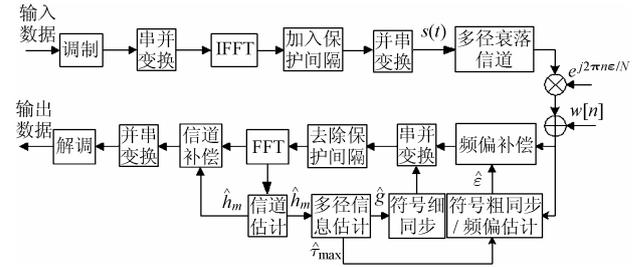


图 2 加入同步算法后的 OFDM 系统框图

5 性能仿真分析

本节将通过仿真验证所提方法在多径衰落信道下的有效性,所采用的仿真参数如表 1 所示。仿真所采用的信道为 NTT 指数信道模型^[9],其功率分布如图 3 所示,其具体参数见表 2。

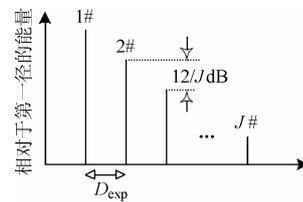


图 3 NTT 指数信道模型

表 1 仿真参数

表 1 仿真参数	
带宽	80MHz
FFT/IFFT 点数	512
系统子载波数, N	512 (子载波间隔 156.25kHz)
调制方式	QPSK
OFDM 符号长度	6.4 μ s + 1.6 μ s (保护间隔) (512+128 样点)
采样间隔	12.5ns
帧长度	64 OFDM 符号
平均符号数, M	63 OFDM 符号
最大多普勒频移	80Hz
信道估计	时分导频信道估计
P_T	0.99
信道模型	NTT 指数信道模型, 见图 3

表2 信道参数

J	D_{exp} (μs)	τ_{max} (μs)	r.m.s. (μs)
3	0.40	0.80	0.269
12	0.10	1.10	0.290

图4~图7为以表1,表2中的参数为仿真条件得到的同步性能曲线。图4为利用J.J. ML算法,定时均方差(MSE)随相关窗宽度的变化曲线。由图可见,随着相关窗宽度的增加,定时的性能变好;当相关窗宽度增加到一定程度时,继续增加相关窗的宽度反而使系统定时性能迅速恶化。这是因为,在相关窗宽度比较小时定时性能主要受噪声影响,增加相关窗宽度可以更好地平滑噪声,从而提高定时性能。然而,当相关窗宽度大于未受ISI污染的CP部分长度时,定时性能主要受多径的影响,相关窗宽度越宽,多径导致的ISI落入相关窗中的份量就越大,从而使得定时性能变差。对于特定的多径信道,存在一个最佳的相关窗宽度。从图4可以看出,该最佳宽度约为未受ISI污染的CP部分长度,即图1中的阴影部分长度 $G - \tau_{\text{max}}$ 。从而也说明了,传统方法直接将CP长度作为滑动相关窗长度的方法在多径衰落信道下的性能是不好的。

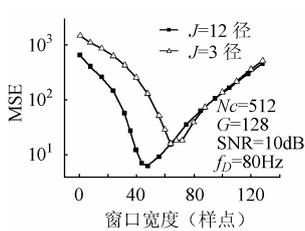


图4 符号定时均方差随相关窗宽度变化曲线

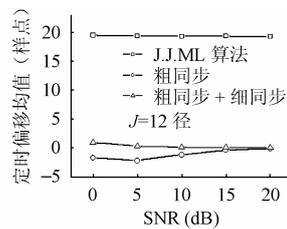


图5 符号定时误差均值随信噪比变化曲线

图5,图6分别给出了符号定时误差均值和均方差MSE随信噪比的变化曲线。可以看出,本文所提出的粗同步算法已经很接近正确的定时位置,粗同步的性能曲线由负方向随信噪比的增加靠近正确位置,FFT窗开始于CP未受ISI干扰的部分,对整个系统的误码率性能基本不造成影响。仅用粗同步方法,性能已得到明显的改善,再经细同步调整,定时更加精准。细同步后虽然由正方向趋于正确同步位置,但它几乎不会导致ISI和ICI而降低系统性能。这是因为细同步算法仅在第一径处于深度衰落时才定时在第二径位置,这时第一径能量很弱,不会对系统性能产生影响。图7给出了符号同步错误概率随信噪比的变化曲线。J.J. ML算法在多径衰落环境下的性能较差,符号同步错误概率一直高于95%,且不随信噪比的增加而改善。这主要是因为J.J. ML算法受多径影响很严重,噪声的作用可以忽略。而本文所提

出的粗同步方法,在低信噪比时的符号同步错误概率较高,但随着信噪比的增加,性能迅速改善。在加入细同步之后,符号同步错误概率大大降低,即使在低信噪比时性能也很好。在多径衰落信道下,本文提出的方法有很大性能优势。

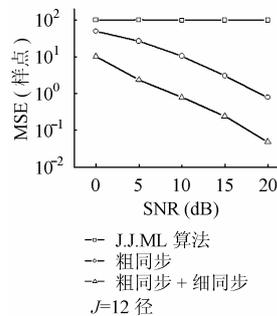


图6 符号定时均方差随信噪比变化曲线

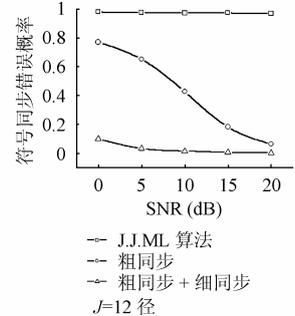


图7 符号同步错误概率随信噪比变化曲线

6 结束语

本文提出了一种适用于无线多径衰落环境下的OFDM符号同步方法。这种方法包括粗同步和细同步两个阶段。在粗同步阶段根据前一帧估计的信道最大时延调整本帧相关窗宽度以避免多径的影响;在细同步阶段,利用本帧估计的多径信道信息进一步细调定时位置。仿真结果表明,该方法比传统的方法有较大的性能改善。在12径衰落信道,信噪比为10dB条件下,准确定时概率高达98%。该方法比较适合多径衰落信道下的符号定时同步,并且简单灵活,具有较好的实用价值。

参考文献

- [1] Schmidl T M, Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM. *IEEE Trans. on Communications*, 1997, 45(12): 1613 - 1621.
- [2] Kim Y H, Hahn Y K, Jung H J, et al.. An efficient frequency offset estimator for timing and frequency synchronization in OFDM systems. *IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing*, Aug. 1999: 580 - 583.
- [3] Ramasubramanian K, Baum K. An OFDM timing recovery scheme with inherent delay-spread estimation. *IEEE GLOBECO '01*. Nov. 2001, Vol.5: 3111 - 3115.
- [4] Van de Beek J J, Sandell M, Borjesson P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1997, 45(7): 1800 - 1805.
- [5] Van de Beek J J, Sandell M, Isaksson M, et al.. Low-complex

- frame synchronization in OFDM systems. IEEE International Conference on Universal Personal Communications, Nov. 1995: 982 – 986.
- [6] Landstrom D, Wilson S K, vande Beek J J, *et al.*. Symbol time offset estimation in coherent OFDM systems. *IEEE Trans. on Communications*, 2002, 50(4): 545 – 549.
- [7] Van de Beek J J, Borjesson P O, Boucheret M L, *et al.*. Three non-pilot based time and frequency estimators for OFDM. *Signal Processing*, 2000, 80(7): 1321 – 1334.
- [8] Hsieh M H, Wei C H. A low-complexity frame synchronization and frequency offset compensation scheme for OFDM systems over fading channels. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1999, 48(9): 1596 – 1609.
- [9] Atarashi Hiroyuki, Abeta Sadayuki, Sawahashi Mamoru. Pilot channel assisted MMSE combining in forward link for broadband OFCDM packet wireless access. *IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, July 2002: 1635 – 1647.
- [10] 邝育军, 候晓林, 乐光新. 无线弥散信道下 OFDM 系统中时间同步方案的比较分析. *北京邮电大学学报*, 2003, 26(3): 75 – 80.
- [11] 王文博, 郑侃. 宽带无线通信 OFDM 技术. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 63 – 77.
- 周 恩: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为宽带无线通信.
- 陈茅茅: 女, 1980 年生, 硕士生, 研究方向为多载波系统同步技术.
- 王文博: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 北京邮电大学电信工程学院院长, 主要研究方向为未来移动通信系统的关键技术, 通信信号处理等.