

一种新的基于判决反馈的 OFDM 频率跟踪算法

杜岩 刘鹏 朱鹏程
(山东大学信息科学与工程学院 济南 250100)

摘要: 该文提出了一种新的用于多径信道的基于判决反馈的 OFDM 载波频率跟踪算法。该算法具有精度高, 计算量小, 实现简单的优点。基于该算法的特点同时提出了根据信道特性加权的改进方法, 加强了对抗频率选择性衰落信道的能力, 进一步提高了在低信噪比下的跟踪性能。

关键字: 正交频分复用, 多载波, 频偏, 同步

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)05-0688-03

A New Efficient OFDM Frequency Offset Tracking Algorithm Based on Decision-directed

Du Yan Liu Peng Zhu Peng-cheng

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract A new OFDM decision-directed carrier frequency offset tracking algorithm is presented. High precision, low computational efforts and simple implement are obtained with the new algorithm. And an improvement method is also described which enhances the capacity of resist frequency selected fading channel, based on channel information. With this method, the tracking performance at low SNR is improved.

Key words Orthogonal frequency division multiplexing, Multicarrier, Frequency offset, Synchronization

1 引言

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 由于其频带利用率高、抗多径能力强、实现相对简单等优点, 近年来受到广泛的关注。但是, OFDM 系统对载波同步的精度要求特别高^[1]。理论分析表明, 当剩余相对频偏超过 2% 后, 由于频偏引起的载波间干扰也会使系统的性能受到相当大的影响。目前提出的 OFDM 系统频偏估计方法有: 辅助数据法和不用辅助数据的盲估计方法^[2-3]。辅助数据法最大的缺点是要占据有效带宽来传输辅助数据, 对频谱效率要求很高的无线通信系统, 这一缺点非常突出。

本文提出一种在跟踪阶段适用于频率选择性衰落信道的基于信号重构的频偏跟踪算法, 并根据这种跟踪算法在低信噪比条件下精度较低的问题给出一种加权改进方法。该算法具有抗深衰落效果好, 实现简单等特点。本文第 2 节是 OFDM 系统模型, 第 3 节描述了这种频偏跟踪算法, 第 4 节是加权改进方法的说明, 第 5 节是仿真结果, 第 6 节为结束语。

2 系统模型

设待传输的一帧 OFDM 数据为 $X(0), X(1), \dots, X(N-1)$, 它们是由待传输的比特数据根据特定的子载波调制方式(如 MQAM, MPSK 等)和星座图计算出的一组复数, 则经过 IFFT 以后得到时域(离散)形式的 OFDM 信号:

$$s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp[j2\pi nk / N], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中 $j = \sqrt{-1}$ 为虚单位; N 为子载波的数目, 也就是 FFT 的点数。设 $\mathbf{h} = [h(0), h(1), \dots, h(N-1)]^T$ 为信道脉冲响应向量, 其中只有前 L 个分量非 0, 并且假设 CP 的长度大于 L 。当系统存在归一化相对频偏 ϵ_0 时, 接收端收到的 OFDM 信号为

$$r(n, \epsilon_0) = (\mathbf{h} \otimes s)(n) \exp(j2\pi\epsilon_0 n / N) + \tilde{N}(n) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

其中 $\tilde{N}(n)$ 为 OFDM 信号第 n 个抽样时刻的信道噪声, 它是一个服从 Gauss 分布的随机变量; \otimes 表示循环卷积。

对 $r(n, \epsilon_0) (n = 0, 1, \dots, N-1)$ 作 FFT, 得到

$$R(k, \epsilon) = H(k)S(k, \epsilon) + \hat{N}(k), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

其中 $H(k)$ 是第 k 个子信道的频域特性, 可以通过适当的信道估计算法将其估计出来; $S(k, \epsilon)$ 是第 k 个子信道的输出, 其中包含了由于频偏引起的载波间干扰; $\hat{N}(k)$ 是第 k 个子信道上输出的噪声。

根据一定的信道估计算法估计出 $H(k)$, 则根据 $R(k, \varepsilon_0)$ 和 $H(k)$ 我们可以得到对 $S(k, \varepsilon_0)$ 的估计值 $\hat{S}(k, \varepsilon_0)$, 其估计的精度受信道噪声和信道估计算法性能的影响, 对 $\hat{S}(k, \varepsilon_0)$ 作 IFFT 可以得到 $\hat{s}(n, \varepsilon_0)$ 。由 $\hat{S}(k, \varepsilon)$ 根据判决规则, 我们可以得到对这一帧 OFDM 数据信息的估计 $\tilde{X}(k)$, ($k = 0, 1, \dots, N-1$), 在该帧不出现误码时, 将有 $\tilde{X}(k) = X(k)$, ($k = 0, 1, \dots, N-1$)。

3 基于信号重构的 OFDM 频率同步跟踪算法

将 $\tilde{X}(k)$ 作为 OFDM 的一帧数据在接收端重构 OFDM 信号

$$\tilde{s}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}(k) \exp[j2\pi nk/N], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

将与 $s(n)$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$) 十分接近, 如果当前一帧数据解调后没有误码 (系统正常工作时这种可能性很大), 有 $\tilde{s}(n) = s(n)$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$)。设系统频偏估计值为 ε , 忽略信道噪声的影响, 则 $s(n, \varepsilon)$ 与 $\tilde{s}(n)$ 仅相差一个包含系统频偏的系数: $s(n, \varepsilon) = \tilde{s}(n) \exp(j2\pi \varepsilon n/N)$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 。

为估计出 ε , 求解极小化问题

$$\min_{\varepsilon} \Phi(\varepsilon) = \min_{\varepsilon} \sum_{n=0}^{N-1} \phi(n, \varepsilon) \quad (5)$$

其中

$$\phi(n, \varepsilon) = |\hat{s}(n, \varepsilon_0) - s(n, \varepsilon)|^2, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

由此可以估计出频偏 ε_0 的估计值。

$$\varepsilon(n) = \frac{\tilde{a}(n)b(n) - a(n)\tilde{b}(n)}{(\tilde{a}^2(n) + \tilde{b}^2(n))2\pi n/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

上式中 $n = 0$ 时, 分母为 0, 因此应去掉对应的一项。将(7)式解出的 $N-1$ 个 $\varepsilon(n)$ 求平均

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} \varepsilon(n) \quad (8)$$

但利用式(8)估计频偏偶尔会出现计算上的问题: 式(7)中的分母对有时个别 n 非常接近于 0, 这时计算出的 $\varepsilon(n)$ 将有很大的误差, 即相除的过程对噪声有很大的放大作用, 为避免这种情况发生, 考虑到在理想情况(没有噪声)下式(7)的 N 个方程解出的是同一个频偏值, 所以我们将频偏估计公式修改为

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} [\tilde{a}(n)b(n) - a(n)\tilde{b}(n)]}{\sum_{n=1}^{N-1} [(\tilde{a}^2(n) + \tilde{b}^2(n))2\pi n/N]} \quad (9)$$

这就是根据 OFDM 时域信号估计出的频偏。由于受噪声的影响, 该估计值是一个随机变量。通过计算该估计值与实际频偏的均方误差(MSE)可以了解该估计算法的精度。本文跟踪算法的框图如图 1 所示:

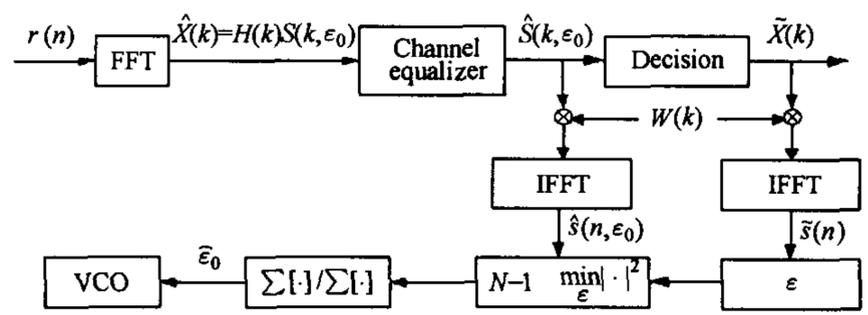


图 1 跟踪算法框图

这种基于信号重构的 OFDM 频率同步算法的性能受信道估计精度和误码率的影响。但仿真结果表明, 当系统正常工作时, 该算法对误码有较强的耐受性。虽然信道估计精度受频偏的影响, 但只要信道估计误差不对判决产生显著影响, 这种基于信号重构的 OFDM 频率同步算法的性能受信道估计精度的影响不大。同时, 我们假设这种算法应用于时偏已经得到纠正, 且系统不发生移动的情况。

4 基于信号重构的 OFDM 频率同步加权改进算法

4.1 问题提出

在进行频偏跟踪的仿真时我们发现, 在相同信噪比下当信道特性表现为频率选择性深衰落时, 跟踪精度将变差。在上文的算法中, 各个子信道无论其信道特性如何, 受噪声影响多大, 都以相同的权重对系统频偏的估计施加影响。当 OFDM 信号某些子信道衰落相对较大时, 噪声对这些子信道信号的影响相对于其它子信道来的大, 而衰落较深的子信道所携带的频偏信息受噪声的污染更严重。如果较多子信道表现为深衰落的情形, 系统的跟踪精度将严重下降, 甚至无法正常工作。

4.2 加权算法

针对这个问题, 控制不同子信道对系统频偏估计的贡献是必要的。控制的原则是根据信道估计时获得的信道频域信息, 采用加权法处理 OFDM 频域数据, 即在计算频偏时对各子信道信息施加不同的权重(如图 1 所示):

$$\tilde{s}(n) = \text{IDFT}[W(k)\tilde{X}(k)], \quad \hat{s}(n, \varepsilon_0) = \text{IDFT}[W(k)\hat{S}(k, \varepsilon_0)] \quad (10)$$

其中 $W(k)$ 是实的权重函数。

在频偏估计前对 OFDM 频域信号进行上述处理是恰当的。这是因为如果只考虑第 k 路频域信号 $\tilde{X}(K)$ 和 $\hat{S}(k, \varepsilon_0)$, ($0 \leq k \leq N-1$), 其它各路均置零并计算式(9)可得到一个 ε 。这样共可求出 N 个频偏的估计值, N 个频偏估计的平均即为当前计算的频偏估计值。由于频率选择性衰落信道中某些路子信道信号估计出的频偏值偏差较大, 在求平均时采用加权平均的方法可以抑制这些偏差对估计结果的影响。随着信噪比的减小, 加权法对估计精度的改善将更加明显。随后的仿真过程也证明了这一点。需要指出, 这种加权的频偏估计算法对信道估计的精度并不敏感。

4.3 权重函数的选择

权重函数是由信道频域特性决定的函数,它应当体现出信道传输函数 $H(k)$ 在频域的幅度特征。在 OFDM 系统中,传输函数是一组离散值,即对应于每个子信道的一组复变量(在慢变信道情况下一段时间内可认为是恒定不变的复数)。采用不同的权重函数的系统耐受深衰落信道,低信噪比的程度不同,收敛速度不同;同时实现复杂性也不相同。应当指出的是,深衰落信道中低信噪比的耐受程度与收敛速度是两个相对的指标,采用能够抵抗更差的信道的权重函数的系统其收敛速度必然更慢,反之亦然。

5 仿真结果及讨论

本文提出的频偏跟踪算法需要与精度较高的频偏捕获算法相配合。本文的仿真过程采用的是文献[4]提出的频偏捕获算法,仿真时假设已纠正时偏。仿真时均采用 256 载波,4QAM 调制方式,初始相对频偏设为 0.1。为了简单,本文采用时不变信道系统进行仿真。需要指出:如果结合适当的信道跟踪算法,本文提出的算法完全适用于时变信道环境。仿真采用的信道频域模型如图 2 所示。图 2 中横轴表示归一化频率,纵轴表示信道衰减系数。信道估计采用辅助数据法(训练帧)。在 SNR=15、相对频偏等于 0.1 的情况下,由图 2 可以看出,信道估计的精度是比较差的。下面的仿真结果说明在这样的信道估计条件下,我们提出的算法仍然可以保持较好的性能。

图 3 是在如图 2 所示的信道条件下,加权算法与原算法的性能比较。原算法可视其权重函数为 1,加权算法采用的权重函数分别采用 $|H(X)|$ 和 $|H(X)|^2$ 。可以看出使用加权算法后提高了系统的稳定性,且系统收敛速度并未明显下降。 $W(k)=|H(k)|^2$ 时,频偏估计的波动幅度比 $|H(k)|$ 时小,但同时系统的收敛速度也较慢。由此可以看出:不同的权重函数对算法的收敛速度与稳定性的作用不同。一般情况下,收敛速度与稳定性是一对矛盾,两者不能同时提高。

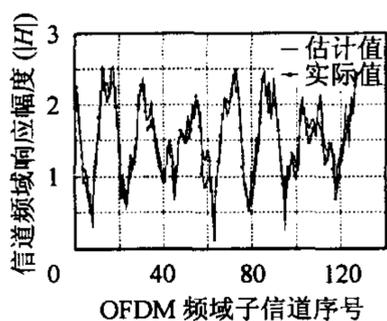


图 2 仿真用信道归一化频域特性及估计结果 (SNR = 15dB)

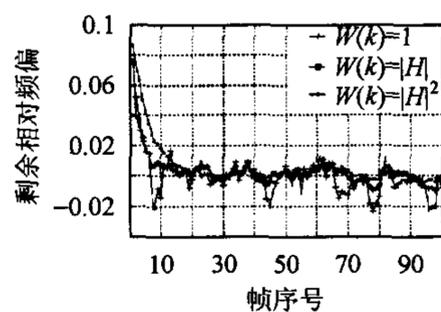


图 3 相同信道下几种不同权重性能比较, SNR=12, 初始相对频偏 0.1

图 4 是 Luise 算法^[3]、ML 算法^[2]与权重函数分别为 1、 $|H(k)|$ 和 $|H(k)|^2$ 的加权算法的 MSE 曲线。即使在信噪比较低,误比特率较高(例如 10^{-2} 左右)的情况下,本文提出的频

偏跟踪算法仍然表现出较好的性能。可见这种跟踪算法的精度受误码的影响较小,而且在高信噪比下,经过加权,算法的性能明显优于 Luise 和 ML 算法。

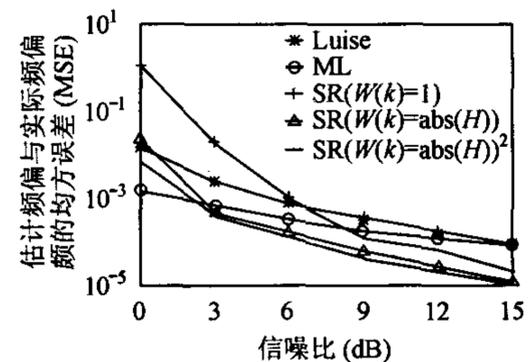


图 4 各种算法性能比较 (帧长度 256, CP 长 32, 初始相对频偏 0.1)

6 结束语

本文提出了一种基于判决反馈的 OFDM 频偏跟踪算法。该算法的计算复杂度低,其主要计算量主要在于两次 FFT;算法跟踪精度超过我们已知的几种著名算法;并且具有可工作的信噪比范围宽,实现简单等优点。针对该算法对于存在深衰落的频率选择性信道,在低信噪比情况下出现的估计精度变差的问题,分析了其中的原因并提出了一种加权改进算法。仿真结果表明该法在频率选择性深衰落信道中可正常工作,采用适当的加权改进算法可有效改善低信噪比下的估计精度,并且估计精度受系统误码影响较小。仿真结果同时指出,跟踪精度与跟踪收敛速度是一对矛盾。不同的加权方法的精度与收敛速度都不同,应根据实际需要恰当选取。

本文算法可直接应用于无线局域网、固定无线接入等准静态信道的情形,如果结合适当的信道跟踪算法,也可应用于一般的移动无线通信环境。

参考文献

- [1] Pollet T, Bladel M, Moeneclaey M. BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise. *IEEE Trans. on Commun.*, 1995, 43(2/3/4): 191 - 193.
- [2] van de Beek J J, Sandell M, Börjesson P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1997, 45(7): 1800 - 1805.
- [3] Luise M, Marselli M, Reggiannini R. Low complexity blind carrier frequency recovery for OFDM signals over frequency-selective radio channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(7): 1182 - 1188.
- [4] 朱鹏程, 杜岩, 刘鹏, 张伟. 一种新的 OFDM 系统载波频率捕获算法. *电子与信息学报*, 2004, 26(6): 859 - 863.

杜岩: 男, 1966 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为宽带无线通信技术、电阻抗成像等。

刘鹏: 男, 1978 年生, 硕士, 研究方向为数字移动通信技术。

朱鹏程: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为数字移动通信技术。