

信噪比辅助的 OFDM 系统剩余载波频偏估计算法

任光亮, 行江涛, 常义林

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出了一种适合无线衰落信道的剩余载波频偏估计新算法. 该算法利用估计出的各个子信道信噪比, 选择出高质量子信道, 再利用这些高质量子信道上的判决数据, 联合导频子载波上的数据共同估计剩余载波频率偏移. 新算法具备导频辅助估计(PTA)算法和判决数据导向(DD)算法的优点. 仿真结果表明, 当平均信噪比大于 10dB 时, 新算法的估计精度比 PTA 算法提高了至少 3 倍, 比 DD 算法提高了至少 20 倍.

关键词: 正交频分复用; 剩余载波频偏; 导频辅助估计算法; 判决数据导向算法

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2008)02-0201-05

SNR aided RCFO estimation method for OFDM systems

REN Guang-liang, XING Jiang-tao, CHANG Yi-lin

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

Abstract: A new residual carrier frequency offset(RCFO) estimation method is proposed for orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) systems in wireless fading channel. In the method, the SNRs on all the sub-carriers are estimated and used to select high quality sub-channels. And then the hard decision data on the high quality sub-channels are combined with the pilot data to estimate the RCFO. The new method has the advantages of both pilot tone assisted(PTA) and decision directed(DD) methods. Simulation results show that the estimation accuracy of the proposed method has an improvement at least 4 times better than that of the PTA method, and at least 21 times better than that of the DD method when the SNR is more than 10 dB.

Key Words: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); residual carrier frequency offset (RCFO); pilot tone assisted(PTA) method; decision directed(DD) method

Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM)系统对同步误差非常敏感,在数据传输过程中,由于多普勒频移、收发双方的振荡器频率稳定度受限,使得系统存在剩余载波频率偏移.虽然这一误差的数值较小,但它会导致子载波上的信号幅度降低,并引入载波间干扰(ICI)^[1,2],降低系统性能.因此必须及时准确地进行同步误差的估计与校正.近年来国内外在此方面开展了大量的研究,其中经典的算法有导频辅助(PTA)算法^[3]和判决数据导向(DD)算法^[4].PTA算法简单且易于实现,但导频数目有限,导频子信道系数的衰落等因素严重地限制了PTA算法的估计性能.DD算法通过引入判决数据代替导频数据,增大了算法中有用数据的数量,提高了估计的性能,但DD算法中判决数据的错误将会引入干扰,大大降低了其估计性能.目前,国内外对信道信噪比的估计进行了深入的研究,而且信道信噪比的估计过程中可以获得各个子载波上的信噪比,文献[5~7]提出的利用OFDM分组中前导符号或导频符号进行信噪比估计的几种方法,都可以获得各个子信道的信噪比信息.

为了有效克服PTA算法和DD算法存在的问题,进一步提高剩余频偏的估计性能,笔者在无线OFDM系统高性能信噪比估计方法的基础上,提出了根据子信道信噪比情况,选择高质量子信道进行判决,并在

收稿日期:2007-06-01

基金项目:国家部委重点实验室基金资助(51473020105DZ0103);国家部委基金资助(9140A24030206DZ0115);陕西省自然科学基金资助(2006F28);国家自然科学基金资助(60602063)

作者简介:任光亮(1971-),男,副教授,博士,E-mail: glren@mail.xidian.edu.cn.

PTA 算法中引入这些判决后的数据,进行系统剩余载波频偏同步估计.所提出的新算法综合了 PTA 算法和 DD 算法的优点,有效地提高了剩余频偏估计的性能.

1 信号模型

在 OFDM 传输系统中,若 OFDM 调制采用 N 点 IDFT,系统采用 $K+1$ 个子载波传输信息, $K < N$, 系统采样时钟周期为 T ,循环保护前缀时间为 $N_g T$,一个完整的 OFDM 符号包括 N_s 个采样点, $N_s = N + N_g$. 发端发送的第 m 个 OFDM 符号的复基带信号可表示为

$$x_m(t) = \frac{1}{N^{1/2}} \sum_{k=-K/2}^{K/2} S_{m,k} \exp(j2\pi k[t - (N_g + mN_s)T]/(NT)) \quad (1)$$

式中 $S_{m,k}$ 是发端的第 m 个 OFDM 符号第 k 个子载波上的调制复数据.

在 OFDM 传输系统中,若传输信道的离散时间单位脉冲响应表示为

$$h_m(k) = \sum_{k=0}^{D-1} h_{m,k} \delta(k - \tau_k) \quad (2)$$

式中 $\delta(k)$ 表示单位脉冲序列, $\{h_{m,k}, k = 0, \dots, D-1\}$ 是在第 m 个复符号对应的信道冲激响应的第 k 个采样值, $\{\tau_k\}$ 是信道冲激响应的第 k 个采样值对应的时延,通常取为采样时间的整数倍, D 为无线信道中的路径总数.

若在接收端载波频率为 f' ,采样时钟周期为 T' ,并假定在 $m=0$ 时系统是严格同步的,因而接收端存在的剩余同步误差可定义为

$$\epsilon = (f - f')/f \quad , \quad \beta = (T - T')/T \quad (3)$$

在接收端,第 m 个 OFDM 符号的第 k 个子载波上的数据就可以表示为^[3]

$$Z_m(k) = \sum_{n=0}^{N-1} r_{m,n} \exp\left(-j \frac{2\pi kn}{N}\right) = \exp\left(j \frac{2\pi}{N} \epsilon (mN_s + N_g)(1 + \beta)\right) \cdot \exp\left(j \frac{2\pi k}{N} (mN_s + N_g)\beta\right) H_m(k) S_m(k) \alpha_{m,k} + n_m(k) + I_m(k) \quad (4)$$

式中 $H_m(k) = \sum_{l=0}^{K-1} h_m(l) \exp(-j2\pi \tau_l k/T_u)$, $n_m(k)$ 是第 m 个 OFDM 符号期间在第 k 个子载波上的加性高斯噪声, $I_m(k)$ 是子载波间的干扰信号,由于剩余同步误差比较小,子载波间的干扰信号通常等效为高斯白噪声, $\alpha_{m,k}$ 是同步误差引起的第 k 个子载波上信号的衰减系数,由于剩余同步误差较小,因而 $\alpha_{m,k} \rightarrow 1$. 在 PTA 算法中,导频符号一般是均匀插入在有用符号中间,若假定导频的个数为 N_p 个,且定义导频子载波集合为 γ ,则 $S_m(k)$ 有如下表示

$$S_m(k) = \begin{cases} P_m(k) & , \quad k \in \gamma \\ X_m(k) & , \quad k \notin \gamma \end{cases} \quad (5)$$

式中, $P_m(k)$ 和 $X_m(k)$ 分别表示导频数据符号和有用数据符号.

因此,在假定信道为缓慢衰落信道的条件下,即 $H_m(k) \approx H_{m+1}(k)$,在接收端相邻两个 OFDM 符号的互相关数据 $R_m(k)$ 为

$$R_m(k) = Z_{m+1}(k) Z_m^*(k) = \exp(j\theta_m(k)) |H_m(k)|^2 S_{m+1}(k) S_m^*(k) + \tilde{n}_m(k) \quad (6)$$

$$\theta_m(k) \approx 2\pi(1 + N_g/N)(\epsilon + k\beta) \quad (7)$$

其中 $\tilde{n}_m(k)$ 是指对相邻符号的数据进行相关运算时产生的噪声.

2 剩余载波频偏估计算法

2.1 PTA 剩余载波频偏估计算法

文献[3]提出了一种经典的 PTA 算法.在该算法中,对式(7)进行线性最小二乘估计运算,并对连续的 L 个 OFDM 符号进行计算求平均,可以得到剩余载波频偏表达式:

$$\hat{\epsilon} = \left(\sum_{m=1}^{L-1} \sum_{k=1}^{N_p} \theta_m(k) \right) / \left(2\pi(1 + N_g/N) N_p (L-1) \right) \quad , \quad k \in \gamma \quad (8)$$

在高斯白噪声信道中,该算法剩余频偏估计的性能^[4]为

$$\text{MSE}(\hat{\epsilon}) = 1 / \left(4\pi^2 (N_s/N)^2 N_p E_s / N_0 \right) , \quad (9)$$

其中 E_s/N_0 为导频所在子信道的平均信噪比。

该算法的性能与剩余载波频率偏移的大小、导频的数目以及无线信道中导频子信道受到的衰落情况有关。剩余载波频率偏移越小,导频子载波数目越多,则该算法的性能就越好。但导频数目的有限,以及无线信道中导频子信道受到的衰落情况各不相同,限制了 PTA 算法的估计性能。

2.2 DD 剩余载波频偏估计算法

文献[4]提出了一种经典的 DD 算法,算法的估计表达式如下

$$\hat{\epsilon} = \sum_{m=1}^L \left(\frac{1}{2\pi(1+N_g/N)} \cdot \frac{\theta_{m,1} + \theta_{m,2}}{2} \right) , \quad (10)$$

$$\text{其中,} \quad \theta_{m,i} = \arg \left(\sum_{k \in C_i} Z_{m+1}(k) \hat{S}_{m+1}^*(k) Z_m^*(k) \hat{S}_m(k) \right) , \quad i = 1, 2 , \quad (11)$$

以及 $C_1 = [-K/2, -1]$, $C_2 = [1, K/2]$ 分别表示数据子载波的前后两部分, $\hat{S}_m(k)$ 和 $\hat{S}_{m+1}(k)$ 表示接收端相邻两个符号的数据子载波的判决数据, K 表示数据子载波的总个数。

在 AWGN 信道下,该算法剩余频偏的估计性能^[4]为

$$\text{MSE}(\hat{\epsilon}) = 1 / \left(4\pi^2 (1+N_g/N)^2 KE_s / N_0 \right) \quad (12)$$

该算法的性能与剩余载波频率偏移的大小和接收端判决数据误码等有关。剩余载波频率偏移越小,接收端数据的判决误码越少,则该方案的性能就越好。但接收端出现的较多错误的判决数据,限制了 DD 算法的估计性能。

3 信噪比估计算法

在文献[6]中, Boumard 针对 MIMO-OFDM 系统,提出了一种基于前导符号的信噪比估计算法,现将之应用于 SISO-OFDM 系统。假设 OFDM 系统第 σ 个符号为前导符号,文献[6]中的噪声平均功率估计为

$$\hat{W} = \frac{E\{|S_\sigma(k-1)Z_\sigma(k) - S_\sigma(k)Z_\sigma(k-1)|^2\}}{2} = \frac{E\{|S_{\sigma-1}(k-1)\omega_{\sigma-1}(k) - S_\sigma(k)\omega_\sigma(k-1)|^2\}}{2} , \quad (13)$$

式中 $E\{\cdot\}$ 表示求期望, $\omega_\sigma(k) = n_\sigma(k) + I_\sigma(k)$ 。文献[6]给出了第 k 个子信道信噪比估计为

$$\hat{\rho}(k) = |S_\sigma^*(k)Z_\sigma(k)|^2 / \hat{W} . \quad (14)$$

4 信噪比辅助的 OFDM 系统剩余载波频偏估计算法

PTA 算法的优点就是简单易于实现,但在标准中,导频数目通常都比较少,并且在无线信道中导频子信道受到的衰落情况各不相同,仅采用导频数据进行同步估计,其性能受到很大的限制。而 DD 算法由于对接收端数据较多的误判,限制了其估计性能。因此,笔者在无线 OFDM 系统高性能信噪比估计方法的基础上,提出了一种信噪比辅助的 OFDM 系统剩余载波频偏估计算法。在该算法中根据这些子信道信噪比信息,选择高质量子信道上的数据进行判决,并在 PTA 算法中引入这些判决后的数据,进行系统剩余载波频偏同步估计,提高了估计的性能。信噪比辅助的 OFDM 系统剩余载波频偏估计算法的接收端框图如图 1 所示。具体估计步骤如下:

(1) 基于子信道信噪比的选择方法是利用系统提供的子信道信噪比为依据,选择满足条件的子信道。本文中的新算法利用简单的信噪比门限方法来选择子信道:

$$\zeta = \{l | \hat{\rho}_m(l) \geq \text{SNR}_{\text{th}}\} , \quad (15)$$

式中 $\hat{\rho}_m(l)$ 为第 m 个符号的第 l 个子信道上的信噪比, SNR_{th} 为信噪比选择门限, ζ 为挑选出的子信道系数集合。因此,高质量子信道上的互相关数据 $R_m(l)$ 如下:

$$R_m(l) = Z_{m+1}(l)Z_m^*(l) = \exp(j\phi_l) |H_m(l)|^2 S_{m+1}(l)S_m^*(l) + \tilde{n}_m(l) , \quad l \in \zeta , \quad (16)$$

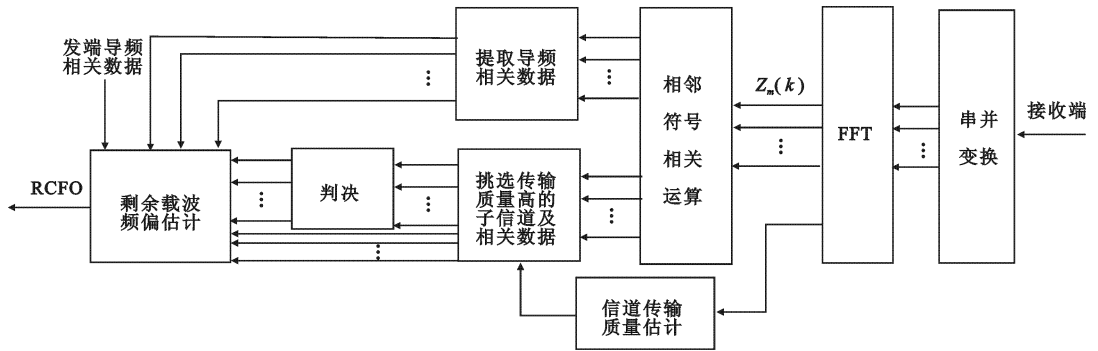


图 1 新算法接收端框图

式中 ζ 为挑选出的高质量子信道标号的集合。

(2) 通过简单的硬判决措施^[4], 可以得到挑选的互相关数据的判决数据为 $\hat{R}_m(l)$, 继而这些判决数据对选出子信道上的互相关数据进行补偿, 得到携带相位偏移的互相关数据的相位为

$$\phi_l \approx 2\pi(1 + N_g/N)(\epsilon + l\beta) \quad , \quad l \in \zeta \quad (17)$$

在集合 ζ 中, 由于子载波的系数不是对称分布的, 所以不能采用最小二乘准则对同步误差进行估计. 因此, 首先将集合 ζ 中的所有子载波系数按从小到大的顺序排序, 然后将集合 ζ 分为子载波个数相等的两个子集合 ζ_1 和 ζ_2 . 子集合 ζ_1 和 ζ_2 中对应的两个子载波上的互相关数据的相位分别为

$$\phi_{l'} \approx 2\pi(1 + N_g/N)(\epsilon + l'\beta) \quad , \quad l' \in \zeta_1 \quad (18)$$

$$\phi_{l''} \approx 2\pi(1 + N_g/N)(\epsilon + l''\beta) \quad , \quad l'' \in \zeta_2 \quad (19)$$

(3) 将这两个集合中的相位对应相减, 通过加权平均的方法可以得到采样时钟偏移的估计值:

$$\hat{\beta} = \frac{1}{2\pi(1 + N_g/N)} \cdot \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L \left(\sum_{\nu \in \zeta_3} \nu \cdot \phi_{\nu} / \sum_{\nu \in \zeta_3} \nu_2 \right) \quad , \quad \nu \in \zeta_3 \quad (20)$$

式中 $\phi_{\nu} = \phi_{l''} - \phi_{l'}$, 集合 ζ_3 表示 ζ_1 和 ζ_2 中对应的子载波上数据的相位差构成的集合。

(4) 将式(20)的估计值代入式(15), 通过求平均的方法估计出剩余载波频率偏移的值

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2\pi(1 + N_g/N)} \cdot \frac{1}{N_c} \sum_{l \in \zeta} (\phi_l - 2\pi(1 + N_g/N)(l\hat{\beta})) \quad , \quad l \in \zeta \quad (21)$$

式中 N_c 表示集合 ζ 中高质量子载波和导频子载波的总个数。

5 仿真结果及分析

仿真条件说明如下: 系统中所用参数是按照 802.16 的标准进行设置, 采样频率为 20 MHz; 子载波个数 $N = 256$, 即采用 256 点的逆傅立叶变换 (IFFT), 其中, 循环前缀 CP 为 64, 有用子载波数为 200; 采用 4 径瑞利衰落信道模型, 均方根时延扩展为 $1 \mu\text{s}$, 信道的延时功率谱为均匀分布的形式. 在 PTA 算法和新算法中, 采用的导频都是含在 200 个有用子载波中, 其数目为 8 个, 分别位于 $[13, 38, 63, 88, 113, 138, 163, 188]$ 的载波位置上. 仿真中, 使用的信噪比估计算法是文献[6]中提出的 Boumard 方法。

图 2 给出采用 PTA 算法、DD 算法以及笔者提出的新算法, 在不同信噪比下剩余载波频率偏移的估计性能比较曲线. 在该图中, 给出在剩余载波频率偏移归一化值为 0.04 条件下, 采用 3 个不同门限的新算法和 PTA 算法以及 DD 算法的估计剩余频偏的 MSE 曲线. 新算法中的 3 个门限值按照从小到大的顺序分别为: 新算法门限 1、新算法门限 2 和新算法门限 3. 由图 2 可见, 新算法在当门限选择较高时, 如门限 3, 其频偏估计性能与 PTA 算法性能基本一致, 这主要是因为高的信噪比选择门限使得满足条件

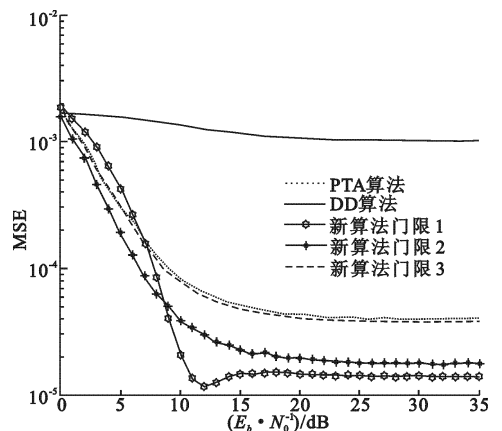


图 2 RCFO 为 0.04 时 3 种算法估计 RCFO 的 MSE 曲线

的高质量子信道数目非常少.但当门限选择较低时,如门限 1,满足条件的子信道数目多,但在平均信噪比较低时,满足条件的子信道会出现误码,使系统性能下降.但新算法在 3 个门限下的估计性能均优于 DD 算法,这是由于 DD 算法出现判决误码所造成的结果.比较 3 个不同门限的性能,可以发现信噪比门限 2 对于新算法而言是最佳门限.

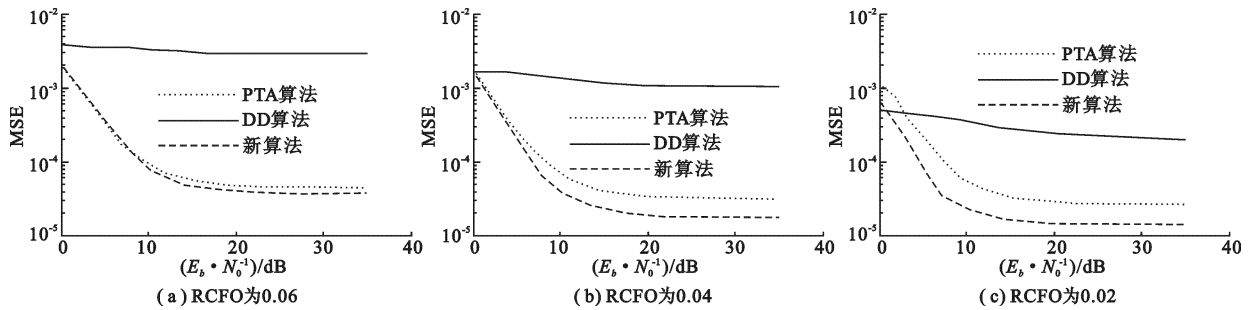


图 3 RCFO 的 MSE 估计曲线

图 3 是在不同剩余载波频率偏移(剩余载波频率偏移归一化值分别为 0.06, 0.04 和 0.02)下,PTA 算法、DD 算法以及新算法的估计性能比较曲线.由该图可知,PTA 算法随着剩余频偏的减小,其 MSE 略有减小;DD 算法随着剩余频偏的减小,其 MSE 迅速下降;新算法的估计性能在 3 种情况下,性能均优于 PTA 算法和 DD 算法;但在剩余频偏较大时,其估计性能改进较少,基本上趋于 PTA 算法,随着剩余频偏的减小 MSE 曲线迅速下降,这是由于随着剩余频偏的减小,高质量的子信道随之增多,因此,新算法的估计性能有了比较明显的提高.

5 结 论

提出了一种剩余载波频率偏移的估计新算法,即信噪比辅助的 OFDM 系统剩余载波频偏估计算法.该算法通过增加参与剩余载波频率偏移估计的子信道数目,解决了 PTA 算法性能受限于导频数目的缺点,同时利用高传输质量子信道上的互相关数据,克服了 DD 算法中较多的误判数据对估计性能的影响.仿真结果表明,本文中所提的新算法的估计性能优于 PTA 算法和 DD 算法.

参考文献:

- [1] Moose P H. A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction[J]. IEEE Trans on Communications, 1994, 42(10): 2908-2914.
- [2] Wang X B, Tjhung T T, Wu Y Y, et al. SER Performance Evaluation and Optimization of OFDM System with Residual Frequency and Timing Offsets from Imperfect Synchronization[J]. IEEE Trans on broadcasting, 2003, 49(2): 170-177.
- [3] Liu S Y, Chong J W. A Study of Joint Tracking Algorithms of Carrier Frequency Offset and Sampling Clock Offset for OFDM-based WLANs[C]//IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions:1. Orlando: IEEE, 2002:109-113.
- [4] Shi K, Serpedin E, Ciblat P. Decision-directed Fine Synchronization for Coded OFDM Systems[C]//IEEE 2004 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing: 4. Montreal: IEEE, 2004: 365-368.
- [5] 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.
Ren G Y, Zhang H, Chang Y L. An SNR Blind Estimation Technique Based on Virtual Carriers in OFDM Systems[J]. Journal of Xidian University, 2004, 31(2):186-189.
- [6] Sandrine B. Novel Noise Variance and SNR Estimation Algorithm for Wireless MIMO OFDM Systems[C]//Global Telecommunications Conference on Mobile:3. San Francisco: IEEE, 2003: 1330-1334.
- [7] Xu H L, Wei G, Zhu J K. A Novel SNR Estimation Algorithm for OFDM[C]//Vehicular Technology Conference:5. Stockholm: IEEE, 2005: 3068-3071.