

一种新的 OFDMA 上行链路定时偏移估计算法

郭 漪, 刘 刚, 葛建华

(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: 分析了定时偏移对 OFDMA 系统接收信号的影响, 得到接收信号相位旋转角度与定时偏移和子载波序号的乘积成正比的结论. 提出利用导频符号子载波间相位差估计 OFDMA 上行链路各用户定时偏移的线性最小平方算法. 本算法能够同时估计所有用户的定时偏移, 适用于各种子载波分配方案. 相比传统方案, 本算法同步建立更快、适用范围更广, 并避免了复杂的矩阵运算, 实现简单.

关键词: 正交频分多址; 导频; 定时偏移; 最小平方估计

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2008)06-0963-05

Novel timing synchronization algorithm for the uplink of an OFDMA system

GUO Yi, LIU Gang, GE Jian-hua

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

Abstract: The effect of timing offset on OFDMA signals is exploited and a least squares algorithm of timing offset is proposed for OFDMA uplink systems. The phase difference between the sub-carriers of pilot symbols is used to estimate the timing offset. Compared with the conventional algorithms, all the users' timing offsets are estimated simultaneously and the algorithm suits both the interleaved OFDMA and the sub-band based OFDMA, providing a faster acquisition of synchronization with a lower complexity.

Key Words: OFDMA; pilot; timing offset; least squares estimation

正交频分多址(OFDMA)是以 OFDM 技术为基础, 结合 TDMA, FDMA 或 CDMA 多址技术的一种多用户通信系统的接入制式. 它具有频谱利用率高, 用户容量大, 抗多径衰落能力强等优点, 是第四代移动通信系统中的关键技术之一. 然而, OFDMA 对定时偏移非常敏感, 尤其在 OFDMA 上行链路中, 基站的接收信号是不同用户发送信号的叠加, 因而用户和基站之间的定时偏差将会破坏子载波间的正交性, 造成用户间的多址干扰(MAI), 严重影响系统性能, 因而定时同步成为 OFDMA 系统研究的主要问题之一.

目前针对 OFDMA 上行链路定时同步的研究论文很多^[1~7], 但它们大都采用复杂的矩阵运算, 而且需要假设只有一个或有限的几个用户没有被同步, 而其余用户均已同步, 这与实际情况不符; 另外, 在传统方案中大都假设 OFDMA 的子信道划分采用相邻子载波划分方案, 这样相邻子信道干扰较小, 并且实现起来简单, 但是它不能充分利用频率分集, 尤其在频率选择性信道中, 信道深衰落有时会完全湮没某些用户, 导致系统性能严重下降. 针对上述问题, 笔者提出一种新的 OFDMA 上行链路定时偏移估计算法. 相比传统算法, 该算法可以同时估计出所有用户的定时偏移, 而且实现复杂度低、适用范围广, 在连续子载波分配方案和交织子载波分配方案下均能获得良好的性能.

1 系统模型

假设上行 OFDMA 系统包含 N 个子载波, 可以同时容纳 K 个用户, 每用户分配 $S = N/K$ 个子载波来传

收稿日期: 2007-11-12

基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助(B08038); "863"计划课题资助(B50306290182); 国家自然科学基金资助(J60104010107)

作者简介: 郭 漪(1977-), 女, 西安电子科技大学博士研究生, E-mail: guoyi402@163.com.

输数据,则用户 k (其发射、接收框图如图 1 所示)的复基带发射信号为

$$d_k(m) = \begin{cases} c_k(s) & , m = p_k(s) \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $c_k(0), c_k(1), \dots, c_k(S-1)$ 为用户 k 的发送数据, $[p_k(0), p_k(1), \dots, p_k(S-1)]$ 为用户 k 占用的子载波序号, $p_k(s)$ 为 $[0, N-1]$ 中的任意整数. 将 d_k 送入 IDFT 单元后,得到相应的时域采样信号为

$$b_k(n) = \frac{1}{N^{1/2}} \sum_{m=0}^{N-1} d_k(m) \exp(j \frac{2\pi}{N} nm) = \frac{1}{N^{1/2}} \sum_{s=0}^{S-1} c_k(s) \exp(j \frac{2\pi}{N} np_k(s)) \quad , \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2)$$

进一步在 b_k 上附加 N_G 点的循环前缀,并假设序列经过一个脉冲响应为 $g(t)$,信号间隔为 T_s 的线性调制器,则发送信号可以表示为

$$s_k(t) = \exp(-j2\pi f_k t) \sum_{l=-N_G}^{N-1} b_k(l) g(t + \tau_k - lT_s) \quad , \quad (3)$$

这里, $T_s = T/(N + N_G)$ (T 为 OFDM 符号持续时间),参数 f_k 和 τ_k 分别用于补偿 Doppler 频移和信道传输延时.

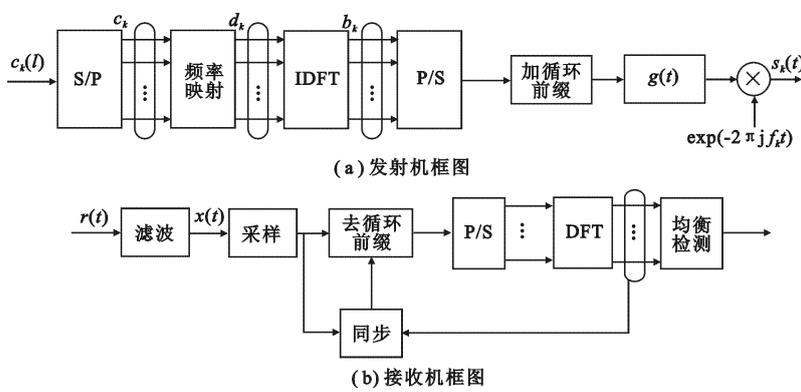


图 1 用户 k 的 OFDMA 发射机、接收机框图

若基站(接收端)与各用户完全同步,则分配给用户 k 的子载波 $p_k(s)$ 上的接收信号为

$$Z_k[p_k(s)] = H_k[p_k(s)]d_k[p_k(s)] + N[p_k(s)] \quad , \quad (4)$$

其中, $H_k[p_k(s)]$ 为用户 k 经历信道的频域响应, $N[p_k(s)]$ 为信道噪声. 若收发端不完全同步,并假设用户 k 的定时偏移为 θ_k ($\theta_k < N_G$),则子载波 $p_k(s)$ 上的接收信号为

$$Z_k[p_k(s)] = H_k[p_k(s)]d_k[p_k(s)] \exp(-j \frac{2\pi}{N} p_k(s)\theta_k) + W[p_k(s)] \quad , \quad (5)$$

其中, $W[p_k(s)]$ 为用户间的多址干扰(MAI)及噪声. 由公式(5)可以看出,用户和基站间的定时偏差会产生用户间的多址干扰,从而破坏子载波间的正交性,恶化 OFDMA 系统性能. 笔者的主要任务就是估计所有用户的定时偏移,保证 OFDMA 系统的正确解调.

2 定时偏移估计方案

对于上行 OFDMA 系统,同步任务不能在接收端(基站)来完成,因为一个用户的同步会导致其他用户定时偏移,所以纠正定时偏移必须在发射端(用户端)来完成. 为了达到这个目标,接收端必须估计出各个用户的定时偏移,然后把偏移信息反馈给用户,用户再根据这些估计的偏移信息来纠正它们的定时偏差. 下面给出一种适用于 OFDMA 上行链路的定时偏移估计算法,该算法不仅可以同时估计出各个用户的定时偏移,而且复杂度低、适用于各种子载波分配方案. 在给出算法之前,首先证明以下引理.

引理 随着参数 n 的变化,信道频域响应 $H(n)$ 的变化是极其缓慢的.

证明 假设信道时域响应为 $\mathbf{h} = [h(0), h(1), \dots, h(L-1)]$, L 为经系统采样周期归一化的信道最大时延,则信道频域响应为

$$H(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l) \exp(-j(2\pi/N)ln) \quad (6)$$

用 x 取代 n 并进一步对 x 作微分,可得

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x} = (-j2\pi) \sum_{l=0}^{L-1} h(l) \exp(-j \frac{2\pi}{N} lx) \frac{l}{N} \quad (7)$$

利用 OFDM 系统的特征,即 $L \ll N$,可以得到

$$\partial H(x)/\partial x \approx 0 \quad (8)$$

式(8)表明信道频域响应 $H(n)$ 的幅度和相位对参数 n 的微分接近于 0,由此得出结论:随着参数 n 的变化,信道频域响应的变化是极其缓慢的,因此可以近似认为在相关带宽范围内信道频域响应是不变的^[8].

进一步考察式(5)可知,接收信号相位旋转的角度与定时偏移和子载波序号的乘积成正比,因此可以利用各用户所占用的邻近子载波之间的相位差来估计定时偏移.基于以上分析,下面提出一种简单有效的定时偏移估计算法.

考虑用户 k ,假定其定时偏移为 θ_k ($\theta_k < N_G$),并且占用的邻近子载波间隔小于相关带宽,则根据式(5)可得接收端在用户 k 占用的两个邻近子载波 $p_k(s)$ 和 $p_k(s+1)$ 上的接收导频信号分别为

$$Z_k[p_k(s)] = H_k[p_k(s)]d_k[p_k(s)] \exp(-j \frac{2\pi}{N} p_k(s)\theta_k) + W[p_k(s)] \quad (9)$$

$$Z_k[p_k(s+1)] = H_k[p_k(s+1)]d_k[p_k(s+1)] \exp(-j \frac{2\pi}{N} p_k(s+1)\theta_k) + W[p_k(s+1)] \quad (10)$$

又由引理可知,邻近子载波上的信道频域响应接近相同,即可以认为

$$H_k[p_k(s)] \approx H_k[p_k(s+1)] \quad (11)$$

于是

$$Z_k[p_k(s)]d_k^*[p_k(s)](Z_k[p_k(s+1)]d_k^*[p_k(s+1)])^* = \exp(j \frac{2\pi}{N} (p_k(s+1) - p_k(s))\theta_k) \cdot |H_k[p_k(s)]|^2 |d_k[p_k(s)]|^2 |d_k[p_k(s+1)]|^2 + I_s \quad (12)$$

若令
$$v_s = \frac{N}{2\pi} \text{angle}\{Z_k[p_k(s)]d_k^*[p_k(s)](Z_k[p_k(s+1)]d_k^*[p_k(s+1)])^*\} = (p_k(s+1) - p_k(s))\theta_k + e_s \quad (13)$$

并记
$$\mathbf{V} = [v_0 \quad v_1 \quad \cdots \quad v_{S-2}]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{P} = [p_k(1) - p_k(0) \quad p_k(2) - p_k(1) \quad \cdots \quad p_k(S-1) - p_k(S-2)]^T \quad (15)$$

则根据线性最小平方估计 (Linear Least Squares Estimation; LLSE)^[9] 准则,用户 k 的定时偏移为

$$\hat{\theta}_k = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{V} = \left(\sum_{s=0}^{S-2} (p_k(s+1) - p_k(s))v_s \right) / \left(\sum_{s=0}^{S-2} (p_k(s+1) - p_k(s))^2 \right) \quad (16)$$

同理可以估计出其他用户的定时偏移.

综上所述,笔者提出的算法具有如下优点:

1) 建立同步快 在实际 OFDMA 上行链路系统中,通常存在多个用户,并且各用户的定时偏移不尽相同,传统算法大都先假设只有一个或有限的几个用户没有被同步,而其余用户均已同步,待这有限的几个用户同步后,再依次假设其他用户没有被同步,采用同样的方法进行下去,直到所有用户都同步.而本算法可以同时估计出所有用户的定时偏移并及时反馈给各用户,因此,相比传统方案,它的同步建立速度更快;

2) 复杂度低 由于各用户占用的子载波是已知的,因此可以事先将 $1 / \left(\sum_{s=0}^{S-2} (p_k(s+1) - p_k(s))^2 \right)$ 计算并存储起来,另外求角度可以采用查表法获得,因此只需进行简单的乘法运算和查表即可获得用户 k 的定时偏移 $\hat{\theta}_k$,因而相比传统方案,避免了复杂的矩阵运算,复杂度大大降低;

3) 适用范围广 传统方案中大都假设 OFDMA 的子信道划分采用相邻子载波划分方案,在频率选择性信道中,某些用户会由于经历深衰落而完全湮没,从而大大影响系统性能.而本算法不仅适用于连续子载波

分配方案,而且也适用于交织子载波分配方案,从而能够充分利用频率分集来提高系统性能.事实上,很多现有标准(例如 IEEE802.16e 标准)中都建议采用交织的子载波分配方案,因而本算法将更具有实用性.

3 仿真结果

针对上述 OFDMA 上行链路定时偏移估计算法,对其进行仿真实验.仿真中 OFDMA 系统带宽设定为 1.024 MHz,包含 $N=1024$ 个子载波,共有 8 个用户,采用交织子载波分配方案,每个用户占用 $1024/8=128$ 个子载波,系统循环前缀长度为 $G=N/16=64$,信道采用多径瑞利衰落模型,路径数为 7,路径时延在 $0\sim 30\ \mu\text{s}$ 等间隔分布,功率时延分布服从指数衰减,均方根时延扩展为 $10\ \mu\text{s}$. 用户 1 的定时偏移设为 D (采样点),其余用户的定时偏移为服从 $[0, D-1]$ 上均匀分布的随机变量.

图 2 和图 3 分别给出了最大定时偏移 D 分别为 10, 20 和 30 时,用户 1 符号定时偏移估计的平均误差及均方误差随信噪比变化的曲线以及信噪比 SNR 分别为 5 dB, 10 dB 和 15 dB 时,用户 1 符号定时偏移估计的平均误差及均方误差随 D 变化的曲线. 由图可以看出,笔者提出的定时偏移估计算法具有良好的性能,在信噪比为 10 dB 时,定时偏移估计的平均误差只有零点几个采样点,均方误差仅为 10^{-1} .

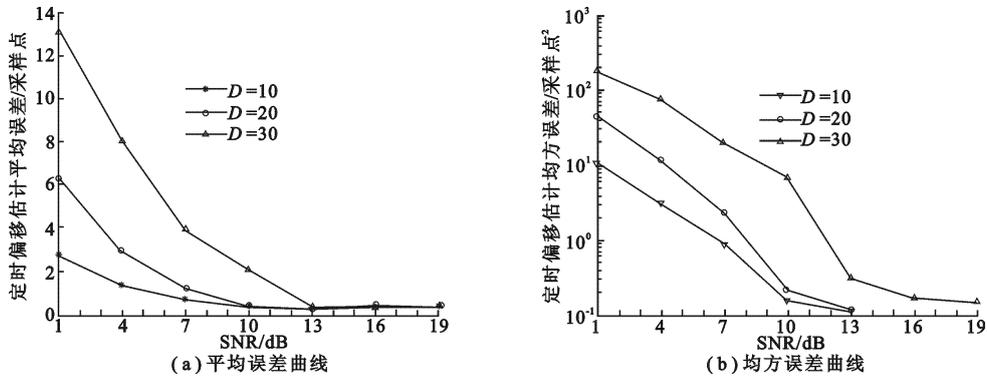


图 2 符号定时偏移估计曲线 I

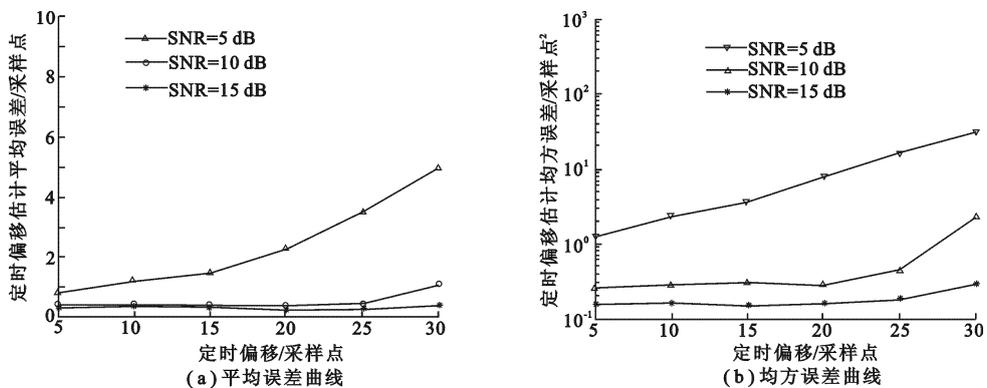


图 3 符号定时偏移估计曲线 II

最后,图 4 给出了最大定时偏移 D 为 20,均方根时延扩展分别为 $5\ \mu\text{s}$, $10\ \mu\text{s}$ 和 $15\ \mu\text{s}$ 时,用户 1 符号定时偏移估计的平均误差及均方误差随信噪比变化的曲线. 由图可以看出,随着均方根时延扩展的增加,符号定时偏移估计性能逐渐下降,这是因为信道均方根时延扩展增加时,信道的相关带宽就会变窄,同一用户占用的邻近子载波信道频域响应的相关性就会减弱,而本算法依然假定信道频域响应不变,从而导致了符号定时偏移估计性能的恶化. 然而需要特别指出,通常信道均方根时延扩展小于 $10\ \mu\text{s}$ ^[10,11],而本算法在此时仍然具有较好的性能,由图可以看出,当信噪比为 10 dB 时,定时偏移估计平均误差只有零点几个采样点,均方误差仅为 10^{-1} ,从而显示了本算法的稳健性.

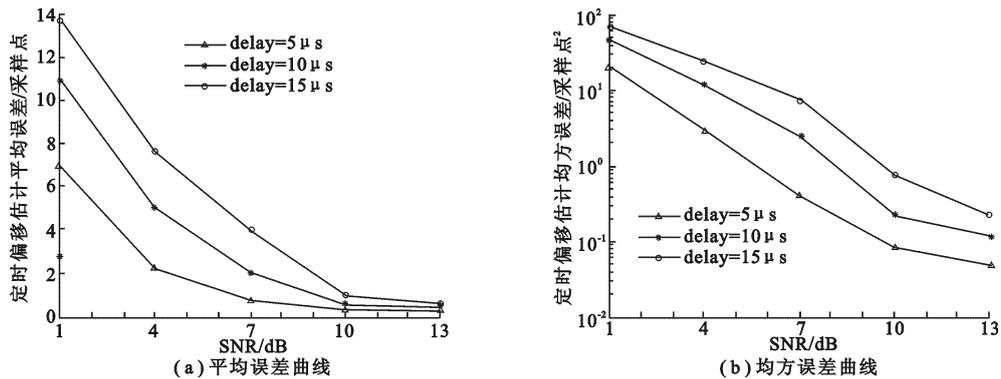


图 4 不同均方根时延扩展下符号定时偏移估计曲线

4 结 论

提出了一种适用于 OFDMA 上行链路各用户的定时偏移估计算法,根据线性最小平方估计准则,利用导频符号子载波之间的相位差来估计各用户的定时偏移。相比传统算法,该算法同步建立快、适用范围广,并且实现简单,因而具有重要的实际意义。

参考文献:

- [1] Su Huan, Zhang Jianhua, Zhang Ping. A Preamble-Based Cell Search Scheme for OFDMA Cellular Systems [C]// International Conference on Mobile Communications. Mauritius: IEEE Computer Society, 2006: 1 628-1 632.
- [2] Kim JungJu, Noh JungHo, Chang KyungHi. Robust Timing and Frequency Synchronization Techniques for OFDM-FDMA Systems [J]. IEEE Workshop on Signal Processing Systems Design and Implementation, 2005, 11(2-4): 716-719.
- [3] Bala E, Cimini L J Jr. On the Uplink Synchronization of OFDMA Systems [C]//IEEE Military Communications Conference. Newark: Delaware University, 2005: 1 133-1 139.
- [4] Puny M, Morelli M, Kuo C C J. Maximum Likelihood Synchronization and Channel Estimation for OFDMA Uplink Transmissions [J]. IEEE Trans on Communication, 2004, 54(4): 726-736.
- [5] Morelli M. Timing and Frequency Synchronization for Uplink of an OFDMA System [J]. IEEE Trans on Communication, 2004, 52(2): 296-306.
- [6] Cao Zhongren, T'ureli U, Yao Yudong. User Separation and Frequency-Time Synchronization for the Uplink of Interleaved OFDMA [C]//Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Sydney: IEEE Computer Society, 2002: 1 842-1 846.
- [7] Cao Zhongren, Tureli U, Yao Yudong. Analysis of Two Receiver Schemes for Interleaved OFDMA Uplink [C]// Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Sydney: IEEE Computer Society, 2002: 1 818-1 821.
- [8] 刘刚. 新一代无线移动通信系统中信道建模与信道估计技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
Liu Gang. On Channel Modeling and Channel Estimation Techniques for Next-generation Wireless Mobile Communication Systems [D]. Xi'an: Xidian University, 2006.
- [9] Kay S M. Fundamentals of Statistical Signal Signal Processing: Estimation Theory [M]. Englewood: Prentice Hall, 1993.
- [10] Matthias P. Mobile Fading Channel [M]. New York: Wiley. 2002.
- [11] 刘刚, 郭漪, 葛建华, 等. MIMO-OFDM 系统中的一种新的低代价信道估计方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(5): 772-776.
Liu Gang, Guo Yi, Ge Jianhua, et al. A New Low-cost Channel Estimation Method for MIMO-OFDM System [J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(5): 772-776.