

一种新的多用户 OFDM 系统的频偏估计算法

赵林靖, 李建东, 张岗山

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 信息科学研究所, 陕西西安 710071)

摘要: 由于载波频偏会给多用户正交频分复用(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM)系统带来子载波之间干扰,从而造成多用户之间的干扰,导致系统性能下降.本文研究了多用户 OFDM 上行链路的频偏估计问题,通过使用多用户检测中的干扰抵消方法提出一种迭代参数估计算法用于估计多用户 OFDM 上行链路的频偏,该算法解决了使用似然估计(Maximum Likelihood, ML)进行多维搜索的问题,降低了 ML 估计器的复杂度,同时解决了多个频偏估计的问题.

关键词: OFDM; 频偏估计; 迭代参数估计

中图分类号: TN919

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2007) 6A-161-04

A Novel Algorithm of Frequency Offsets Estimation for Multiuser OFDM Systems

ZHAO Lin-jing, LI Jian-dong, ZHANG Gang-shan

(State Key Laboratory of ISN, Information Science Institute, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Carrier Frequency offsets in multiuser Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) system will introduce Inter-Carrier Interference (ICI) and Multiple-Access Interference (MAI), and consequently degrade the system performance. The problem of frequency offsets estimation in the uplink of multiuser OFDM is addressed. A novel iterative parameter estimation method with interference cancellation of multiuser detection is proposed. The new estimator decreases the complexity of the multi-dimensional search with ML method, and efficiently solves the problem of multi-frequency offsets estimation.

Key words: OFDM; frequency offsets estimation; iterative parameter estimation

1 引言

正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency-division multiplexing)能够有效地克服信道的频率选择性衰落,因而被广泛应用于宽带通信系统,例如:IEEE802.16标准,有线电视(CATV),认知无线电(Cognitive Radio)系统中.在多用户移动环境中,OFDM方案具有两个主要的优点:一方面通过合理添加循环前缀,可以避免使用自适应均衡器;另一方面,通过FFT/IFFT运算可以使每个用户很方便地访问每个子载波,这使得动态信道分配变得简单.

OFDM系统对载波频率偏差(CFOs, Carrier Frequency Offsets)十分敏感,频偏会引起子载波间的干扰(ICI, Inter-Carrier Interference),在多用户OFDM系统的上行链路中,不同的用户到达接收机的载波频偏是各不相同的,载波频偏还会引入多址干扰(MAI, Multiple-Access Interference).因此,在多用户OFDM系统中,载波频偏估计成为一个多参数估计问题,必须寻找新的解决办法.

目前,许多文献研究并提出了多用户OFDM的频偏估计问题.文献[1]提出了一种适合交织多用户OFDM系统的上行链路频偏估计算法,其利用了信号的确定性结构,即每个用户的信号都具有特定的周期性结构,采用基于子空间分解的方法进行频偏估计.文献[2]采用四阶统计量进行多用户OFDM的频偏估计.文献[3]采用频域干扰抵消的方法估计每个用户的频偏.文献[4]研究了多用户OFDM基于子带的同步方法,要求系统中必须存在空载波,其基本思想是通过测量空载波的平均能量并不断调整振荡器频率,直至能量最小.假设原有用户的同步已经准确完成,文献[5]提出一种适合于交织的多用户OFDM上行链路的新加入用户的同步方法,其利用多个重复的同步码元来估计频偏.文献[6]提出了一种适合基于子带的多用户OFDM上行链路的同步方法,首先通过带通滤波器进行信号的分离,然后使用OFDM信号的循环前缀估计每个用户的频偏.但是上述方法不同程度的存在着实现复杂度高,或者子载波分配方式不灵活等缺点.

收稿日期:2006-06-14;修回日期:2007-10-22

基金项目:国家杰出青年科学基金(No. 60725105);国家自然科学基金重大项目(No. 60496316);国家自然科学基金项目(No. 60572146);高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20050701007);高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划;教育部科学技术研究重点项目(No. 107103)

干扰抵消的方法广泛应用于多用户检测和参数估计,文献[8]提出一种 MIMO 平坦衰落信道下的迭代参数估计方法,可以降低计算复杂度,但是没有考虑频率选择性信道.本文针对存在频率选择性的多用户 OFDM 上行链路的频偏估计问题,借鉴文献[8]中的干扰抵消方法,提出一种迭代参数估计的算法,该算法不仅计算复杂度低,而且不受子载波分配的限制.

文章结构安排如下:第 2 节中介绍了多用户 OFDM 的系统模型;第 3 节中提出了迭代参数估计方法,给出了该方法的具体步骤;第 4 节中通过 Monte Carlo 仿真,给出了这种方法的性能;第 5 节中给出了结论.

2 数学模型

考虑一个具有 N 个子载波, K 个用户的多用户 OFDM 上行基带系统.

将 N 个子载波分成 K 个子信道,每个子信道有 $P = N/K$ 个子载波.第 k 个用户的数据为 $\mathbf{c}_k = [c_k(0), c_k(1), \dots, c_k(P-1)]^T$ (上标 T 表示转置操作),对向量 \mathbf{c}_k 插入 $(N-P)$ 个 0,得到 N 点 IFFT 的输入信号 $\mathbf{d}_k = [d_k(0), d_k(1), \dots, d_k(N-1)]^T$, \mathbf{d}_k 定义为:

$$d_k(n) = \begin{cases} c_k(l), & n = p_k(l) \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中, $p_k(l), l = 0, 1, \dots, (P-1)$ 表示调制数据 \mathbf{c}_k 要使用的 P 个子载波的位置.那么,第 k 个用户的未加循环前缀的发射信号可表达为:

$$x_k(n) = \sum_{i=0}^{N-1} d_k(i) e^{j2\pi i n / N} = \sum_{l=0}^{P-1} c_k(l) e^{j2\pi(p_k(l)n) / N} \quad (1)$$

假设同步准确,去掉循环前缀后的接收信号可以表示为:

$$y(n) = \sum_{k=1}^K e^{j2\pi n \Delta f_k / N} \sum_{l=0}^{L-1} h_{k,l} x_k(n-l) + z(n) \quad (2)$$

其中, $h_{k,l}$ 是第 k 个用户和基站间的第 l 径的信道增益, Δf_k 为第 k 个用户和基站之间和频偏(各径频偏相同),并且假设其频偏小于子载波间隔的一半, $z(n)$ 是均值为零、方差为 1 的复高斯白噪声.定义下列向量:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{f} &= [\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_K] \\ \mathbf{h}_l &= [h_{1,l}, h_{2,l}, \dots, h_{K,l}]^T \\ \mathbf{h} &= [\mathbf{h}_0^T, \mathbf{h}_1^T, \dots, \mathbf{h}_{L-1}^T]^T \\ \mathbf{x}(n) &= [x_1(n) e^{j2\pi n \Delta f_1 / N}, x_2(n) e^{j2\pi n \Delta f_2 / N}, \dots, \\ &\quad x_K(n) e^{j2\pi n \Delta f_K / N}] \\ \mathbf{y} &= [y(0), y(1), \dots, y(N-1)]^T \\ \mathbf{z} &= [z(0), z(1), \dots, z(N-1)]^T \end{aligned}$$

$$X_{\Delta f} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(0) & \mathbf{x}(-1) & \dots & \mathbf{x}(-L+1) \\ \mathbf{x}(1) & \mathbf{x}(0) & \dots & \mathbf{x}(-L+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{x}(L-1) & \mathbf{x}(L-2) & \dots & \mathbf{x}(0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix}$$

那么式(2)就可以表示成矩阵的形式:

$$\mathbf{y} = X_{\Delta f} \mathbf{h} + \mathbf{z} \quad (3)$$

3 提出的算法

假定采用 ML 估计方法,对于给定的 $\{\Delta f_k\}$,信道 \mathbf{h} 的估计就是要最小化范数

$$\| \mathbf{y} - X_{\Delta f} \mathbf{h} \|^2 \quad (4)$$

此时, \mathbf{h} 的估计值 $\hat{\mathbf{h}}$ 的取值是:

$$\hat{\mathbf{h}} = (X_{\Delta f}^H X_{\Delta f})^{-1} X_{\Delta f}^H \mathbf{y} \quad (5)$$

其中,上标 H 表示共轭转置操作,将式(5)带入式(4)中,得到多用户 OFDM 系统中频偏的最大似然估计为:

$$\Delta \hat{\mathbf{f}} = \arg \max_{\Delta \mathbf{f}} X_{\Delta \mathbf{f}}^H X_{\Delta \mathbf{f}} (X_{\Delta \mathbf{f}}^H X_{\Delta \mathbf{f}})^{-1} X_{\Delta \mathbf{f}}^H \mathbf{y} \quad (6)$$

不难看出,由于 $\Delta \hat{\mathbf{f}} = [\Delta \hat{f}_1, \Delta \hat{f}_2, \dots, \Delta \hat{f}_K]$,式(6)是一个 K 维的搜索问题,而且式(6)中还包括了 $(X_{\Delta f}^H X_{\Delta f})^{-1}$ 的矩阵求逆运算,计算复杂度非常高.

针对这一问题,借鉴多用户检测的思想,本文提出了一种迭代的频偏参数估计的方法,可以有效降低式(6)中频偏参数估计的复杂度,而且具有可靠的估计精度.基本思想是,首先利用单用户的频偏估计方法计算出每个用户的频偏,然后采用迭代干扰抵消的思路来逐步修正提高频偏估计的准确性.

将接收信号式(2)写成如下形式:

$$\begin{aligned} y(n) &= \sum_{k=1}^K e^{j2\pi n \Delta f_k / N} \sum_{l=0}^{L-1} h_{k,l} x_k(n-l) + z(n) \\ &= e^{j2\pi n \Delta f_1 / N} \sum_{l=0}^{L-1} h_{k,l} x_k(n-l) \\ &\quad + \sum_{m=1, m \neq k}^K e^{j2\pi n \Delta f_m / N} \sum_{l=0}^{L-1} h_{m,l} x_m(n-l) + z(n) \\ &= e^{j2\pi n \Delta f_1 / N} \sum_{l=0}^{L-1} h_{k,l} x_k(n-l) + I_k(n) + z(n) \quad (7) \end{aligned}$$

其中

$$I_k(n) = \sum_{m=1, m \neq k}^K e^{j2\pi n \Delta f_m / N} \sum_{l=0}^{L-1} h_{m,l} x_m(n-l) \quad (8)$$

式中, $I_k(n)$ 是其他用户对第 k 个用户的干扰.

根据中心极限定理,当用户数目较多时, $I_k(n)$ 可以近似地认为高斯分布.因此,第 k 个用户和基站间的子信道认为是一个单用户系统,于是可以使用单用户 OFDM 的频偏估计方法来分别估计每个用户的频偏.单用户 OFDM 频偏估计的方法有很多,本文采用 Morelli^[7] 的方法进行单用户的频偏估计,Morelli 使用 B 个长度为 P 的相同子块的训练序列,通过在接收端进行相关运算进行频偏估计,具体如下:

$$\Delta \hat{f}_k = \frac{1}{2\pi P} \text{angle} \left\{ \sum_{b=1}^B R_k(b) (R_k(b-1))^H \right\} \quad (9)$$

其中, $R_k(b) = \sum_{n=1}^P y_k(bP+n) x_k^H(bP+n)$.

通过将多用户 OFDM 信道分解成 K 个子信道,所有的用户的频偏都可以通过式(9)计算出.然后通过 ML 信道估计式(5)估计出所有子信道的信道增益.

对于任何一个用户到基站的子信道,其他用户带来的干扰 $I_k(n)$ 是未知的,然而,经过所有子信道的估计后,频偏和信道增益都可以认为是已知量,于是对于每个用户和基站之间的信道,其他用户造成的干扰就可以通过频偏和信道估计值计算出来:

$$I_k(n) = \sum_{m=1, m \neq k}^K e^{(jn2\pi\Delta f_m)/N} \sum_{l=0}^{L-1} h_{m,l} x_m(n-l) \quad (10)$$

这样一来,对单个用户而言,便可以从接收信号中减去其他用户的干扰估计值,提高接收信噪比,从而通过再次进行单用户的频偏和信道估计来得到更加准确的估计值.

重复上述操作,便可形成如下的迭代估计方法,具体步骤如下:

(1) 迭代次数 $s = 1$;

(2) 对每个子信道进行干扰抵消;

$$\hat{y}_k^s(n) = y(n) - \hat{I}_k^{s-1}(n) \quad (\hat{I}_k^0(n) = 0)$$

(3) 计算每个子信道的频偏;

$$\Delta \hat{f}_k^s = \frac{1}{2\pi P} \text{angle} \left\{ \sum_{b=1}^B R_k^s(b) (R_k^s(b-1))^H \right\}$$

(4) 根据 $\Delta \hat{f}^s = [\Delta \hat{f}_1^s, \Delta \hat{f}_2^s, \dots, \Delta \hat{f}_K^s]$, 得到 $X_{\Delta \hat{f}^s}$, 计算每个信道的信道增益;

$$\hat{h}^s = (X_{\Delta \hat{f}^s}^H X_{\Delta \hat{f}^s})^{-1} X_{\Delta \hat{f}^s}^H y$$

(5) 计算每个子信道的干扰估计值;

$$\hat{I}_k^s(n) = \sum_{m=1, m \neq k}^K e^{(jn2\pi\Delta f_m)/N} \sum_{l=0}^{L-1} \hat{h}_{m,l}^s x_m(n-l)$$

(6) $s = s + 1$, 返回至第二步;

由以上实现步骤可以看出,采用干扰抵消的迭代参数估计算法不受子载波分配方式的限制,因此可以应用于基于交织或基于子带的子载波分配方式.

4 仿真结果

仿真中,假设有 4 个用户,每个用户的训练序列选用 4 个长度为 64 的相同子块的训练序列,因此未加循环前缀的训练序列的总长度为 256 个.每个用户的多径信道数为 6,第 i 径的时延为 $(i-1)$ 个采样间隔,多径的功率按指数衰减.采用交织的子载波分配方式.仿真中每个用户频偏取值不同,并且归一化频偏范围为 $[-0.5, 0.5]$.由于每个用户的频偏估计方法相同,因此可以不失一般性地选择任意一个用户的频偏估计作为评估.这里选用频偏估计值和信道估计值的均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 作为算法估计性能的准则,并与克拉美罗下界 (Cramer-Rao Lower Bound, CRLB) 对比以衡量算法的性能.

图 1,图 2 仿真了在 AWGN 信道下频偏估计和信道估计的 MSE 性能.仿真结果表明,每次迭代均能减少信道估计和频偏估计的 MSE,随着迭代次数的增加,迭代的效

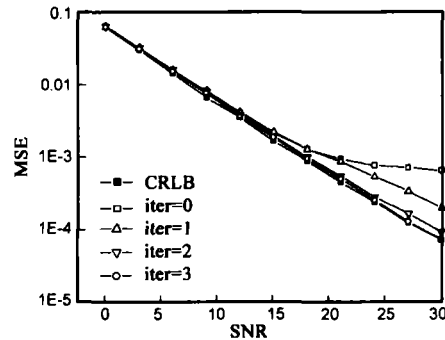


图 1 AWGN 信道下迭代估计的信道估计 MSE 性能

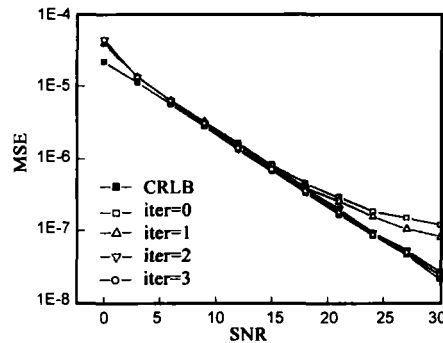


图 2 AWGN 信道下迭代估计的频偏估计 MSE 性能

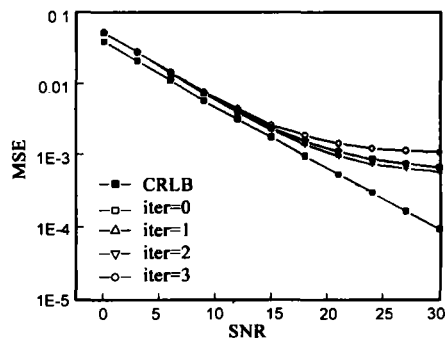


图 3 准静态多径信道下迭代估计的信道估计 MSE 性能

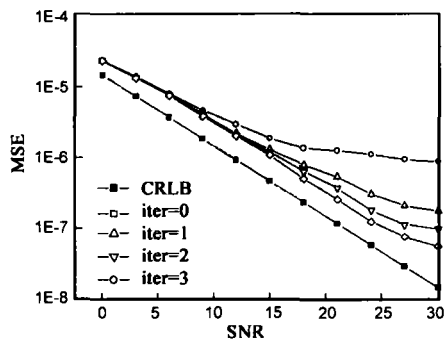


图 4 准静态多径信道下迭代估计的频偏估计 MSE 性能
果逐渐收敛.图 3、图 4 仿真了准静态多径信道下的频偏估计和信道估计的 MSE 性能.根据仿真结果,可以看出采用迭代参数估计的方法有效的解决了多用户

OFDM 上行链路的频偏估计,同时避免了 ML 方法进行 K 维搜索的问题,大大降低了计算的复杂度。

5 结论

本文在文献[7,8]的基础上,针对多用户 OFDM 上行链路的多参数估计问题,提出了一种迭代参数估计的方法,该方法将单用户参数估计和多用户检测中的干扰抵消思想有效地结合在了一起。与 ML 方法比较,该算法具有计算复杂度低、便于实现的优点,并且可保证相当可观的估计性能。

参考文献:

- [1] Zhongren Cao, Ufuk Tureli, Yu-Dong Yao. Deterministic multiuser carrier-frequency offset estimation for interleaved OFDMA uplink[J]. IEEE Transaction on Communications, 2004, 52(9): 1585 - 1594.
- [2] Yao Y, Giannakis G. B. Blind carrier frequency offset estimation in SISO, MIMO, and multiuser OFDM systems[J]. IEEE Transaction on Communications, 2005, 53(1): 173 - 183.
- [3] Defeng (David) Huang, Khaled Ben Letaief. An interference-cancellation scheme for carrier frequency offsets correction in OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(7): 1155 - 1165.
- [4] Barbarosssa S, Pompili M, Giannakis G B. Channel-independent synchronization of orthogonal frequency division multiple access system[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(2): 474 - 486.
- [5] Michele Morelli. Timing and frequency synchronization for the uplink of an OFDMA system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(2): 296 - 306.
- [6] Jan-Jaap van de Beek, Per Ola Borjesson, Marie-Laure Boucheret. A time and frequency synchronization scheme for multiuser OFDM[J]. IEEE Journal on Selected Areas in

Communications, 1999, 17(11): 1900 - 1914.

- [7] Michele Morelli, Umberto Mengali. Carrier-frequency estimation for transmissions over selective channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(9): 1580 - 1589.
- [8] Zhuo Lu, Jiandong Li, Linjing Zhao, Jiyong Pang. Iterative parameter estimation in MIMO flat-fading channels with frequency offsets[A]. Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'06)[C]. Vienna: IEEE Computer Society, April 2006. 802 - 805.

作者简介:



赵林婧 女, 1976年1月生于陕西咸阳, 西安电子科技大学讲师, 博士生, 2003年获工学硕士学位, 现为西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室信息科学研究所博士研究生。主要研究方向为软件无线电、认知无线电、OFDM、宽带移动通信。E-mail: ljzhao@mail.xidian.edu.cn



李建东 男, 1962年出生于江苏省, 1990年获工学博士学位, 1994年破格晋升为教授, 现任西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室主任, 兼任西安电子科技大学研究生院常务副院长、博士生导师。中国通信学会会上、IEEE 高级会员。2002年1月-2003年1月美国 Cornell 大学访问教授, 国家新一代宽带无线移动通信网重大专项实施方案编制组专家, 信息产业部宽带无线 IP 技术标准工作组组长, 信息产业部宽带无线移动通信技术专家组成员, 并兼任宽带无线接入工作组副组长, 总装备部通信导航测控专业专家组成员。我国首批“新世纪百千万人才工程”国家级人选, 第三届教育部“青年教师奖”获得者, 第一届和第四届 863 高技术个人通信技术专业专家组成员, 科技部国家 863 计划十五周年“先进个人”, 陕西省“三五人才”第一层次人选, 陕西省和电子部有突出贡献的专家, 享受国家政府特殊津贴。