

一种基于二倍钟采样的 OFDM 载波偏差估计算法

边东明,冉崇森

(解放军信息工程大学通信工程系,河南郑州 450002)

摘 要: 本文从 OFDM 信号的二倍钟采样出发,给出了一种载波偏差估计算法,该算法直接利用时域信号的采样来估计载波偏差,克服了频域实现算法受载波偏差影响大的缺点,使得算法在不同的载波偏移下具有相同的估计精度,载波偏差估计范围大,同时该算法充分利用信号的有效能量,估计精度高,优于采用循环前缀的算法;论文同时给出了算法性能的理论分析和计算机仿真结果。

关键词: OFDM; 载波同步; 载波偏差估计

中图分类号: TN929. 5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 10-1473-03

A Carrier Frequency Offset Estimation Algorithm for OFDM Based on Over-sample

BIAN Dong-ming, RAN Chong-sen

(The PLA University of Information and Engineering, Zhengzhou, 450002, China)

Abstract: In this paper, we propose a new time-domain estimator for OFDM signal by using over-sample processing. The proposed estimator is able to achieve wider estimation range of carrier frequency offset with higher accuracy than cyclic prefix (CP) based estimator. And the results of computer simulation show the proposed estimator overcomes the impact of carrier frequency offset and achieves the same accuracy regardless of the carrier offsets.

Key words: OFDM; carrier frequency offset estimation; carrier synchronization

1 引言

正交频分复用技术 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 是一种多载波正交的数字调制技术,具有频谱利用率高、抗多径干扰等特点,近来受到广泛关注,它被欧洲的数字电视标准 DVB-T、数字音频广播 (DAB) 标准、IEEE802.11a, HyperLAN II 和 xDSL 等标准所采纳,并逐渐成为第四代移动通信技术核心。

由于 OFDM 采用正交载波进行调制,载波偏差严重破坏了子载波间的正交性,形成自干扰,所以和单载波系统相比,OFDM 系统对载波偏移更为敏感。文献[1]详细分析了载波偏差、符号定时和采样定时的不同步等几种破坏载波正交性的参数对系统性能的影响,和其他参数相比较,载波偏差对 OFDM 系统性能的影响最大。

近来,许多文献^[1~8]都对 OFDM 系统的载波偏差估计和同步进行了研究和探讨,其中基于循环前缀实现载波同步的算法^[2]是 OFDM 同步研究的一大热点,但该类算法具有一定的局限性,文献[3]指出 OFDM 符号的循环前缀似然函数受数据、噪声和信道的影响较大,同时算法工作信噪比较高,估计精度低,波形成形和循环前缀样点数对算法性能的影响比较

大。实现载波偏差估计最直接的办法是利用已知数据进行载波偏差估计,可以利用训练序列估计载波偏差^[4],也可以利用插入导频的相关信息实现对发射载波的跟踪^[5],但由于采用了已知数据,降低了系统有效信息的传送;而采用直接判决 (Direct Decide) 算法进行载波偏差估计,则因为接收数据译码错误而降低算法性能。此外, Hui Liu 在文献[6]中提出了一种利用虚载波进行载波偏差估计和同步的算法,主要通过考虑其他载波的泄漏来实现载波偏差的估计,但在同等条件下,该算法的性能要低于其他算法;同时, Helmut Bolcskei 等提出利用信号相关函数循环平稳的特性来获得 OFDM 信号载波偏差估计和同步^[7]。文献[8]给出了一种利用二倍钟采样,通过分析奇、偶序列频域采样的相位关系,利用相位和载波偏移的关系给出了一种基于双 FFT 的频域载波偏差捕获和跟踪算法。

本文在文献[8]的基础上,给出时域实现的载波偏差估计算法,克服了频域实现算法^[8]受载波偏差影响大的缺点。本文首先对接收信号进行二倍钟采样,并将采样数据分为奇、偶序列进行处理,然后利用载波偏差在奇、偶序列上引起的相位差,经过公式推导,给出时域实现的载波偏差估计算法,该算法估计精度高,载波偏差估计范围大,同时克服了调制信息和载波偏差对算法的影响,在不同的载波偏差下算法的估计精

度一致. 本文在第二节中导出载波偏差估计算法, 算法性能分析和计算机仿真结果在第三节中给出, 最后第四节总结全文.

2 载波偏差估计算法的推导

2.1 接收信号模型

考虑信道、载波频率偏差 f_c 和相位偏差 ϕ_c 的影响, 在 OFDM 解调器去循环前缀后接收信号可以表示为^[8]:

$$r(t) = e^{j(2\pi f_c t + \phi_c)} \sum_{k=0}^{N-1} a_{i,k} H_{i,k} e^{j2\pi f_k t} + w(t) \quad (1)$$

式中, $a_{i,k}$ 表示在第 i 个时隙第 k 个子载波发射的数据; $H_{i,k}$ 代表在第 i 个时隙第 k 个子载波 f_k 对应的信道传输函数; $f_k = k/T_{sub}$, T_{sub} 表示有效的 OFDM 符号长度; $w(t)$ 是复的 AWGN 过程.

不失一般性, 下面将按照时隙 0 来进行考虑, 这时离散后的接收信号可以表示为:

$$r(n) = e^{j\left(\frac{2\pi}{N}n + \phi\right)} \sum_{k=0}^{N-1} a_k H_k e^{j\frac{2\pi}{N}nk} + w(n) \quad (2)$$

其中: $T_{sub} f_c = Nf_c/f_s$, f_s 为系统的采样速率; $w(n)$ 为复 AWGN 过程 $w(t)$ 的采样. 注意到式(1)中每个子载波偏移了 f_c , 这时根据离散傅氏变换(DFT)得到的子载波不是真正的子载波 ($f_k + f_c$), 而是伪子载波 (f_k), 引入了载波间干扰 (ICI), 降低了系统性能, 这是存在载波偏差时, 频域实现算法性能降低的主要原因.

根据 DFT 和式(2), 可以得到频域采样信号的表达式:

$$z(i) = e^{j\phi} \sum_{k=0}^{N-1} a_k H_k O_{k-i} + w_i \quad (3)$$

其中: w_i 是 $w(n)$ 的离散傅氏变换; O_{k-i} 表示第 k 个子载波对第 i 个子载波的干扰, 可表示为:

$$O_{k-i} = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}l(k-i)} e^{j\frac{2\pi}{N}l(k-i)} \quad (4)$$

2.2 算法推导

和文献[8]类似, 我们的算法采用二倍钟进行采样, 同时将得到的采样序列根据顺序分为奇、偶序列: $\{r_n^e\}$ 和 $\{r_n^o\}$. 根据前面论述, 同时为了表达简洁, 忽略噪声项, 两序列可分别表示为:

$$r_n^e = e^{j\left(\frac{2\pi}{N}n + \phi\right)} \sum_{k=0}^{N-1} a_k H_k e^{j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (5)$$

$$r_n^o = e^{j\left[\frac{2\pi}{N}(n+1/2) + \phi\right]} \sum_{k=0}^{N-1} a_k H_k e^{j\frac{2\pi}{N}k(n+1/2)} \quad (6)$$

据式(2), 对这两个序列进行 DFT 运算, 得到相应的两个频域采样序列表示为:

$$z_i^e = e^{j\phi} \sum_{k=0}^{N-1} a_k H_k O_{k-i} \quad (7)$$

$$z_i^o = e^{j\phi} \sum_{k=0}^{N-1} a_k H_k O_{k-i} e^{j\frac{2\pi}{N}(k+i)} \quad (8)$$

在 $\phi \ll 1$ 时, $O_{k-i} \approx \delta(k-i)$, 据式(7)、(8)可以得到下面的关系式:

$$z_i^e = e^{j\frac{2\pi}{N}(i+\phi)} \cdot z_i^o \quad (9)$$

也就是说, 可根据式(9)得到载波偏差估计的一种表达式:

$$= \frac{N}{2} \arg\left(e^{j\frac{2\pi}{N}i} \frac{z_i^e}{z_i^o} \right) \quad (10)$$

显然, 可利用这一表达式来进行小的载波偏差估计, 但据文献[2,3]所述, 载波偏差引入了 ICI, 降低了信号的信噪比, 影响算法的估计精度, 同时, 根据式(9)的约束条件, 载波偏差直接影响着算法的性能. 为了克服载波偏差的影响, 考虑从时域对载波偏差进行估计. 根据傅氏变换的性质, 可以得到:

$$\sum_{k=0}^{N-1} z_k^e z_k^{o*} = N \sum_{n=0}^{N-1} r_n^e r_n^{o*} \quad (11)$$

在移动通信中, 随着微蜂窝和微微蜂窝的出现, 使得信道的传输特性发生了很大变化, 接收机和发射机之间通常具有很强的直达分量, 所以这里可以假设 $|H_k| \approx 1$, 各子载波的数据调制方式为 PSK 调制, 结合式(10)、(11), 可以得到载波偏差估计算法:

$$f_c = \frac{1}{T_{sub}} = \frac{N}{T_{sub}} \arg\left(\sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}k} \sum_{n=0}^{N-1} r_n^e r_n^{o*} \right) = \frac{f_s}{N} \arg\left(\sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}k} \sum_{n=0}^{N-1} r_n^e r_n^{o*} \right) \quad (12)$$

3 计算机仿真和算法性能分析

从前面的推导知道, 本算法将 OFDM 符号作为一个整体进行考虑, 通过时域的二倍钟采样来估计载波偏差, 同时消除调制信息的影响, 使得算法和调制信息无关, 为一种盲载波偏差估计算法. 根据式(10)、(11)和(12), 为了消除延时导致的频域信号相位旋转带来的影响, 在载波偏差计算的累加中我们采用准相干累加, 算法的性能有所损失.

根据 2.2 的论述, 显然可以得到载波偏差估计偏差:

$$f_c - f_c = \frac{f_s}{N} \arg\left(e^{-j\frac{2\pi}{N}i} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}k} \sum_{n=0}^{N-1} r_n^e r_n^{o*} \right) \quad (13)$$

这里采用变换域分析方法, 通过频域分析, 在大信噪比下可以得到算法估计方差的表达式:

$$E[(f_c - f_c)^2] = \frac{f_s^2}{2} N^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right) \frac{N \gg 1}{4N \cdot SNR} \quad (14)$$

为了验证算法性能和可行性, 这里对算法进行了计算机仿真, 图 1 给出了以系统载波频率范围 f_s 为归一化因子的算法性能曲线, 实线是本文提出的算法在载波数目分别为 16、128、1024 情况下得到的算法载波偏差估计性能曲线, 而虚线为文献[2]给出的采用循环前缀的算法在循环前缀为 128、载

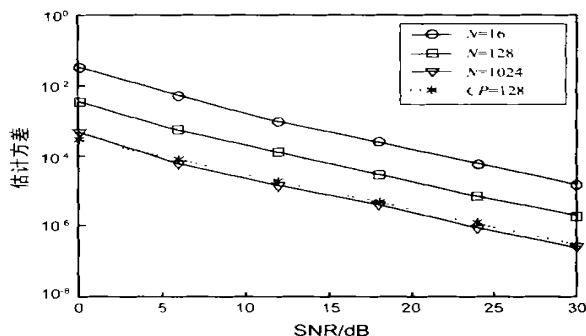


图 1 不同子载波数目下算法估计精度曲线

波数为 1024 情况下的性能曲线,显然在这种情况下两种算法的性能基本一致,也就是说与采用循环前缀实现定时同步的算法相比,本算法充分利用了信号的有效能量,在同等条件下,循环前缀采样数小于 1/4 有效符号采样数时,其估计精度要优于采用循环前缀的算法。

根据式(5)、(6),可以得到:

$$r_{n,n}^{o,*} = e^{-j\sqrt{N}} \prod_{k=0}^{N-1} a_k H_k e^{-j\sqrt{N}nk} \prod_{k=0}^{N-1} a_k^* H_k^* e^{-j\sqrt{N}(n+1/2)k} \quad (15)$$

显然,在式(15)中,通过奇、偶序列的复乘运算,一方面将载波偏差等效为载波偏差在奇、偶序列上的时延相位差,通过估计这个时延相位差来估计载波偏差;另一方面消除了载波偏差,从而消除了载波偏差引起的 ICI,克服了载波偏差对算法的影响,保证在不同的载波偏差下均满足式(9)的约束条件,使得算法估计精度在不同的载波偏差下一致。图 2 给出了载波偏差分别为 0、±3.5 个载波间隔情况下算法性能和信噪比关系的计算机仿真曲线,图中三种情况下算法的性能曲线重合,也说明算法的性能和载波偏差的大小无关。

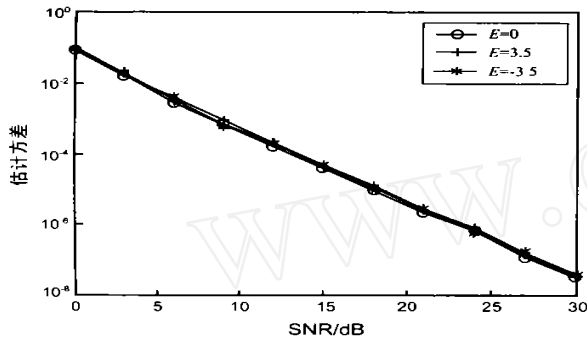


图 2 不同子载波偏差下算法估计精度曲线

算法的载波偏差估计范围是算法的另一个重要的参数,根据式(12),可知道受信号相位周期性的影响,算法的理论载波偏差估计范围为 $(-f_s, f_s)$,但由于噪声对信号相位的扰动,在实际情况下随着接收信号信噪比的降低,算法的估计范围降低。图 3 给出了信噪比为 18dB 和 5dB 两种情况下的载波偏差估计范围的计算机仿真曲线。显然,即使在较低的信噪比下,算法也可正确的估计在 $(-f_s/2, f_s/2)$ 范围内的载波偏差。

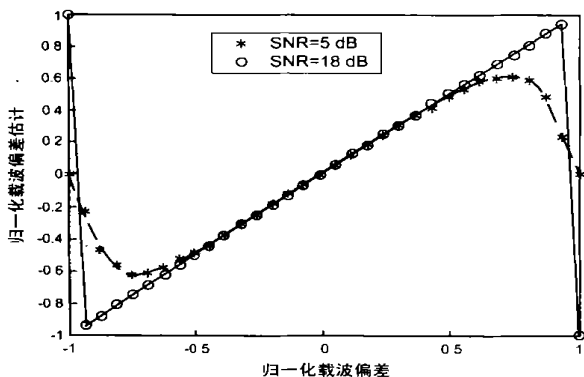


图 3 不同信噪比下载波偏差估计范围

4 结论

本文提出了一种时域实现的载波偏差估计算法,该算法充分利用了信号的有效能量,与采用循环前缀的信号相比,具有精度高等特点;该算法利用载波偏差在奇、偶序列上的时延相位差来估计载波偏差,载波偏差估计范围大,同时克服了载波偏差和调制数据的影响,计算机仿真结果也表明该算法估计精度不受载波偏差和调制数据的影响;算法直接利用信号采样进行计算,实现复杂度低。

参考文献:

- [1] K Sathanathan and C Tellambura. Probability of error calculation of OFDM systems with frequency offset [J]. IEEE Trans. Comm., Nov 2001, Vol. 49:1884 - 1888.
- [2] Daniel Landstrom, Julia Martinez Arenas, Jar-Jaap van de Beek, Per Ola Borjesson, Marie-Laure Boucheret, Per Odling: Time and frequency offset estimation in OFDM systems employing pulse shaping [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Universal Personal Communication (ICUPC '97) [C]. San Diego, USA, October 1997, Vol. 1: 279 - 283.
- [3] Dusan Matic, Ton A J R M. Coenen, Frits C. Schoute, Ranjee Prasad. OFDM timing synchronization: Possibilities and limits to the usage of the cyclic prefix for maximum likelihood estimation [A]. VTC '99 Fall [C]. Amsterdam, Sep 1999, Vol. 2: 668 - 672.
- [4] In ho Hwang, Hwang soo Lee and Keon woo Kang. Frequency and timing period offset estimation technique for OFDM systems [J]. Electronics letters, Mar 1998, Vol. 34: 520 - 521.
- [5] Giovanni Santella. A frequency and symbol synchronization system for OFDM signals: Architecture and simulation results [J]. IEEE Trans. VT Jan 2000, Vol. 49: 254 - 275.
- [6] Hui Liu and Ufuk Tureli. A high-efficiency carrier estimator for OFDM communications [J]. IEEE Communication Letters, Apr 1998, Vol. 2: 104 - 106.
- [7] Helmut Bolcskei. Blind estimation of symbol timing and carrier frequency offset in pulse shaping OFDM systems [A]. ICASSP '99 [C]. Arizona, USA, Mar 1999, vol. 5: 2749 - 2752.
- [8] Ji Sung Oh, Young Mo Chung, and Sang Uk Lee. A carrier synchronization technique for OFDM on the frequency-selective fading environment [A]. VTC '96 [C]. Atlanta, USA, May 1996, Vol. 46: 1574 - 1578.

作者简介:



边东明 男,1975 年出生于山东省郓城县,2000 年在解放军理工大学通信工程学院获硕士学位,现为解放军信息工程大学信息工程学院博士研究生,主要研究方向为移动通信系统、软件无线电和载波同步。

冉崇森 男,1939 年生于四川省万县,解放军信息工程大学教授,博士生导师,中国通信学会会员,河南省通信学会常务理事,1998 年评为全国优秀教师,在国内外重要期刊上发表论文二十余篇,主要研究方向为无线局域网、移动通信系统。