

突发分组 OFDM 系统中载波同步算法的改进^①

丁 晨

(武警工程大学 信息工程系, 西安 710086)

摘 要: 针对采用 OFDM 技术的通信系统对载波同步敏感; 普通算法不适合突发分组传输模式下数据传输的问题, 设计基于训练序列的载波同步改进算法和度量函数. 该算法利用训练序列在时域的重复性, 在时域完成载波同步. 仿真结果表明, 该改进算法在信噪比较高时, 可保持 10^{-6} 数量级的均方误差, 且无需频域反馈, 同步时间短, 适合突发分组传输模式的特点.

关键词: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); 载波同步; 突发分组传输; 训练序列

Improved Carrier Synchronization Method in OFDM Systems Based on Training Sequence

DING Chen

(School of the Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: Aiming at the carrier synchronization sensitiveness in OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) systems and the common synchronization method's being not suitable for data transmission in burst packet transmission mode, an improved method and a new measuring function are given. The method uses the repeatability of the training sequence to achieve carrier synchronization in time-domain. The simulation results show that, the improved method with high SNR can keep the MSE (mean square error) with the order of magnitude of 10^{-6} , and suits for burst packet transmission mode without the feedback of frequency domain.

Key words: OFDM; carrier synchronization; burst packet transmission; training sequence

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术以其在频率利用率和抗干扰性方面突出的优势, 在众多领域得到广泛的应用, 是未来移动通信技术中主要的候选传输技术^[1]. 但 OFDM 也存在几个突出的难题, 其中最为重要的是其对同步的敏感性. OFDM 系统对同步要求高, 微小的同步偏差将影响系统的整体性能.

由于 OFDM 符号插入了保护间隔, 微小的符号同步误差不足以引起符号间干扰 (Inter-Symbol Interference, ISI) 和载波间干扰 (Inter-Carrier Interference, ICI), 但在 OFDM 系统的调制、解调过程中, 无线信道的非线性, 收发两端的本地振荡器不完全匹配或多普勒频移产生的载波频率偏移, 都会减小信号幅度、产生相位畸变并破坏 OFDM 子载波间的正交性从而引起 ICI, 导致信噪比的损失^[2].

本文针对 OFDM 系统同步技术中载波频率同步的问题, 研究在突发分组传输模式下的载波同步算法.

1 系统模型和载波频率偏移分析

1.1 系统模型

根据 OFDM 原理, 发射端将 IFFT 输出的时间离散信号经数模转换器 (digital-analog converter, DAC) 后, 上变频成射频模拟信号后发射, 其中心频率为 f_0 ; 接收端收到射频模拟信号后经混频器下变频成中心频率为 $f_0 - f_i$ 的中频信号, 经滤波和模数转换器 (analog-digital converter, ADC) 变为数字信号, 再用中频 f_i 进行数字解调使其成为基带信号, 接收端的压控晶体振荡器产生 ADC 的采样频率 F_0' 和中频 f_i' . 当 $f_0' \neq f_0$ 时就产生了载波频率偏移 $\Delta F = f_0' - f_0$. 这种载波频率偏移的影响主要体现在两个方面: 衰减信号

^① 收稿时间: 2015-03-24; 收到修改稿时间: 2015-05-04

幅度;引入载波间干扰^[3-7].

在无载波频偏的 OFDM 系统中,每个子载波在所有其他子载波频率处的频率响应为零,即各子信道之间互不干扰.而由于 OFDM 系统是多载波系统,当出现载波偏移后,子载波的正交性被破坏,产生 ICI.如图 1 所示:

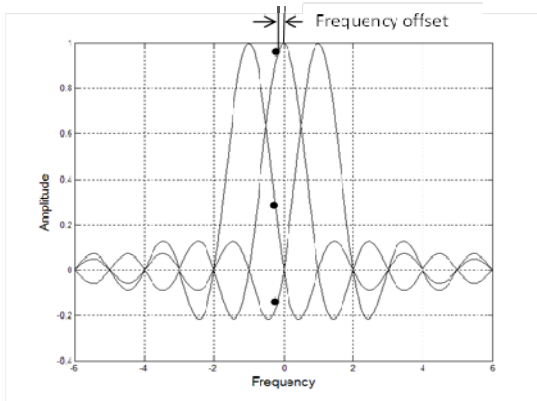


图 1 载波偏移的影响

1.2 载波频偏数学分析

下面就载波偏移对系统性能的影响进行数学上的分析.

接收信号模型(对接收信号做 FFT 变换后):

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} y_n \exp\left(\frac{-j2\pi k}{N}\right) \quad (1)$$

当存在公共相位噪声 θ_0 和载波频偏 ΔF 时,接收序列 y_n 的 FFT 为:

$$Y_k = e^{j[(N-1)\pi\Delta F T_s + \theta_0]} \frac{\sin(\pi N \Delta F T_s)}{N \sin(\pi \Delta F T_s)} X_k + \mu_k + \frac{e^{j\theta_0}}{N} \sum_{n=0, n \neq m}^{N-1} X_n \frac{1 - \exp\left\{j2\pi N \left[\frac{n}{NT_s} - \left(\frac{k}{NT_s} - \Delta F\right)\right] T_s\right\}}{1 - \exp\left\{j2\pi N \left[\frac{m}{NT_s} - \left(\frac{k}{NT_s} - \Delta F\right)\right] T_s\right\}} \quad (2)$$

$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$

其中 Y_k 是接收序列的 FFT, X_k 是发送端调制到子载波上的数据, T_s 为系统采样频率, N 为一个 OFDM 符号的子载波数目, ΔF 为载波频偏, μ_k 是加性高斯白噪声经 FFT 变换后第 K 个子载波上的数值.从式(2)的第一项可以看出调制数据 X_k 的幅度和相位因载波偏移的影响而出现信号幅度的衰落和子载波的相位偏移;式(2)第三项是由载波频率偏移而导致的子载波间干扰.幅度衰减和相位偏移比较容易消除,但子载波间

干扰的影响很难去除,因此载波频率的同步和恢复相当重要.参考文献[8]给出了子载波偏移对系统误比特率性能的影响:

$$D(\text{dB}) \approx \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(\pi N \cdot \Delta F \cdot \frac{1}{R} \right) \frac{E_s}{N_0} \quad (3)$$

其中, $R = N/T$ 表示符号速率, N 为一个 OFDM 符号的子载波数目, T 和 NT_s 分别表示有用符号持续期和 SNR.载波频偏 ΔF 会使接收到的信号产生附加的相位旋转 $e^{j2\pi\Delta F t}$, 用子载波间隔 f_u 对 ΔF 进行归一化,则:

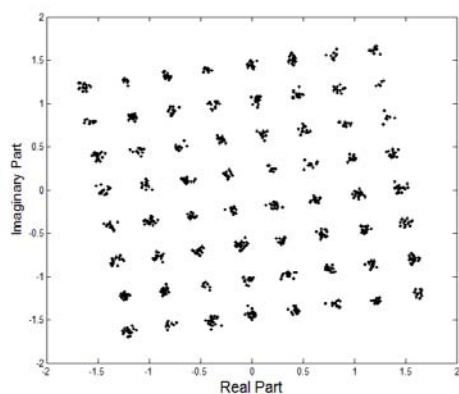
$$e^{j2\pi\Delta F t} \Big|_{t=NT_s} = e^{j2\pi \frac{NF}{N}} \quad (4)$$

其中 F 为归一化后的载波频偏, $F = \Delta F / f_u = \Delta F \cdot T_u$, 而 $T_u = NT_s$, 式(4)成立.可将载波频偏 F 分为整数倍频偏 F_i 和小数倍频率偏移 F_d .

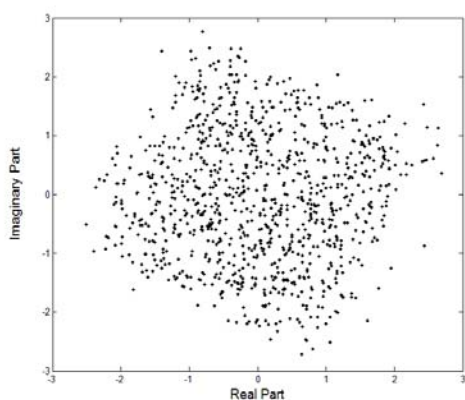
本文将小数部分进一步分为: 时域小数倍粗载波频偏和频域小数倍细载波频偏.小数倍粗频偏的估计和校正可以将载波频偏降低到小于子载波间隔的 1%, 剩余的小数部分频偏估计需在频域完成.整数倍频偏会使子载波发生移动,但由于偏移值的大小为整数倍的子载波间隔,因此它本身不会引起 ICI; 小数倍频偏小于子载波间隔的一半,引起 ICI 并使得每个子载波发生幅度衰减和相位旋转,导致信号能量的损失,从而使系统 SNR 降低,增高误比特率.图 2 的 a 和 b 分别为子载波频偏 0.1 和 0.35 时系统的同步情况.

2 突发分组传输模式下载波频率同步改进算法

对于采用诸如 DAB、DVB-T^[9]等连续传输模式的系统,对捕获时间的要求不是很高,因此可以采用平均或滤波的方法来提高估计精度,如时域上相邻的多个 OFDM 符号间进行平均或频域上相邻子载波进行平均,在这种系统中更适合采用基于 CP 和导频的时域同步方法.但在突发分组传输模式中,可利用的导频信息少且要求快速建立同步,因此上述方法不适合分组传输模式.由于突发分组的传输模式时间短,对同步捕获时间的要求更高,通常要求在单个训练符号内实现同步捕获,所以除保证算法能达到一定的估计精度外,还必须具有快的收敛速度.因此在这种系统中通常利用时域上的重复性结构,比如训练序列的相关性来进行视频同步.



(a) 载波频偏=0.1



(b) 载波频偏=0.35

图 2 载波频偏的影响

在连续传输模式中的载波频率同步解决方案中, 小数倍粗频率估计在时域完成, 整数倍和小数倍细频率偏移都要在频域完成并且需要反馈回路, 这无疑都增加了同步捕获时间. 本文利用训练符号将整数倍和小数倍载波频率偏移都放在时域来实现以期缩短捕获时间, 因此提出下述算法:

建立一个简单的模型

$$y_n = x_n \cdot e^{j2\pi n F/N} + w_n \quad (5)$$

y_n 表示时域上的接收数据、 x_n 表示发送数据、 w_n 为加性高斯噪声、 F 为归一化的载波频偏, N 为 FFT 点数或者说是一个 OFDM 符号中所含子载波的数目. 利用训练序列(定义为 S_n), 根据式(5)可得:

$$R = \sum_{n=1}^Q S_n^* \cdot y_n = \sum_{n=1}^Q |x_n|^2 \cdot e^{j2\pi n F/N} + N_w \quad (6)$$

其中 N_w 表示噪声干扰项. 求和上限 Q 可根据实际应用的信道衰落情况, 子载波采取的调制方式, 信息的传输模式进行调整, 不同的 Q 针对的不同的情况, 取得

不同的频偏估计范围和估计精度. 本算法以 IEEE802.11a 标准为例进行分析, 估计的载波频偏为:

$$CR \approx \left(\frac{N}{2\pi Q} \right)^2 \times \frac{1}{Q \times \gamma} \quad (7)$$

在式(7)的估计结果中, 可使整数倍的载波频偏估计范围扩大到 $N/2Q$, 其中 $N=64$.

此外还可以计算该改进算法的 Cramer-Rao 上限, 近似为

$$CR \approx \left(\frac{N}{2\pi Q} \right)^2 \times \frac{1}{Q \times \gamma} \quad (8)$$

其中 γ 为信噪比, 由式(8)不难看出, 改进算法的载波频偏估计范围是原来的 $(N/4Q)$ 倍.

关于 Q 的分析, 如上所述, 在求和一项中求和上限 Q 的选择原则要兼顾到两个方面: 一方面是为扩大整数倍载波频偏的估计范围, 另一方面是为使估计更为准确. 通过分析得到改进算法的频偏估计范围是原来的 $(N/4Q)$ 倍, 又考虑到精度因素, 故暂取 $Q=6$, $Q=5$ 的情况将在仿真中给出结果, 以证明 $Q=6$ 的合理性.

3 改进算法仿真

仿真参数设置如下表 1. 采用高斯白噪声和多径衰落叠加的信道模型来模拟突发分组传输模式下的信道情况. 用估计均方误差来衡量同步定时算法的性能.

表 1 仿真参数

参数名称	数值
子载波数 N	64
信道模型	多径衰落信道
载波频偏	3.389
SNR 范围	0-50dB
累加和因子 Q	6

在高斯白噪声和多径衰落叠加的信道模型下, 利用蒙特卡洛方法分别对上述的载波同步改进算法进行性能分析. 信噪比范围 0-50dB, 每个信噪比下进行 5000 次蒙特卡洛仿真.

图 4 所示为改进算法中在累加因子 $Q=6$ 和 $Q=5$ 时的载波频偏估计的性能表现.

在累加因子 $Q=6$, 其他条件不变的情况下, 对文献[9]中 DVB-T 系统的载波同步算法(算法 1)和突发分组模式的载波同步原算法(算法 2)进行仿真, 并与改进后的算法进行比较, 如图 5 所示:

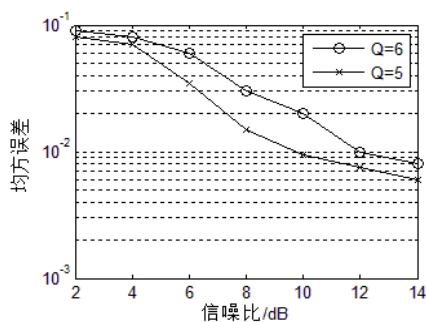
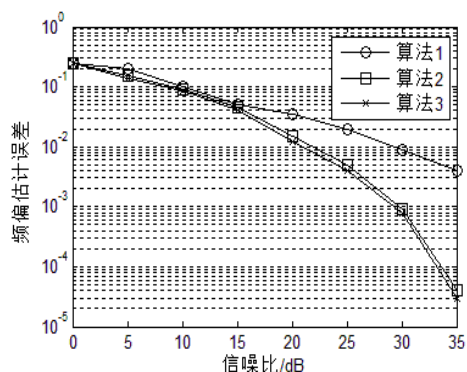
图 4 Q 的取值对频偏估计效果的影响

图 5 算法的性能比较

分析上述仿真结果, 图 4 可以看出关于累加因子 Q , 当 $Q=5$ 时, 估计范围扩大, 但在信噪比高于 12dB 前, 难以达到将载波频偏降低到小于子载波间的 1% 的精度要求. 当取 $Q=6$ 时, 估计范围得到扩大的同时达到精度要求, 故选择 $Q=6$. 图 5 中的结果显示, 适用于 DVB-T 等连续传输模式的同步算法在信噪比较低情况下, 同步性能表现较差, 不适合在多径衰落较为严重的信道中使用. 改进算法与原算法相比, 同步性能有一定的提升, 在满足精度要求的同时扩大了载波频偏的估计范围. 综上所述, 本文的改进算法相比未改进算法, 载波同步定时效果有提高, 性能更好.

4 结论

理论分析和仿真结果表明, 本文针对普通载波频率偏移估计算法同步捕捉时间长的问题, 改进基于训练序列的载波频偏估计算法, 且在精度允许条件下, 可适当减小累加和因子 Q , 扩大载波频偏的估计范围,

使载波频率偏移的估计在时域就可以完成, 无需频域反馈, 适合突发分组传输模式的特点.

总之, 对于在突发分组传输模式下的 OFDM 系统载波频率同步, 因其对同步捕捉时间的高要求, 需要设计在移动通信情况, 无线信道条件恶劣的情况下, 能够实现快速同步捕获, 估计精度较高的载波频率偏移估计算法, 在接下来的研究中设计更合理的训练符号结构也是另一种解决途径.

参考文献

- 1 艾渤, 王劲涛, 钟章队. 宽带无线通信 OFDM 系统同步技术. 北京: 北京邮电出版社, 2013.
- 2 Moose PH. A technique for orthogonal frequency-division multiplexing frequency offset correction. IEEE Trans. on communications, 1994, 42(10): 2908–2914.
- 3 Ai B, Yang ZX, Pan CG, et al. On the synchronization techniques for wireless OFDM systems. IEEE Trans. on Broadcasting, 2006, 52(2): 236–244.
- 4 Thomas K, Lorenzo P, Paolo M, et al. Orthogonal frequency division multiplex synchronization techniques for frequency-selective fading channels. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(6): 999–1007.
- 5 罗仁泽, 杨娇, 李芮, 等. MIMO-OFDM 系统同步技术研究进展. 电讯技术, 2014, 54(8): 1171–1176.
- 6 Guo Y, Liu G, Ge JH. A novel time and frequency synchronization scheme for OFDM systems. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2008, 54(2): 321–325.
- 7 赵勇洙, 等. MIMO-OFDM 无线通信技术及 MATLAB 实现. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- 8 Pollet T, Van Bladel M, Moeneclaey M. BER sensitivity of OFDM system to carrier frequency offset and Wiener phase noise. IEEE Trans. on Commun, 1995, 43(2/3/4): 191–193.
- 9 European Telecommunication Standard ETS 300 744. Digital broadcasting system for television, sound and data services; Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. May 1996.