

基于 TD-NLMS 的航空移动通信 OFDM 系统载波频率偏移消除

陈强¹, 杨霄鹏¹, 欧阳超¹, 杨栋², 余辉³

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077; 2. 空军工程设计研究局, 北京, 100086;

3. 95866 部队, 河北保定, 071051)

摘要 针对航空移动通信中时变的信道环境和多普勒频移造成的子载波间干扰(ICI), 提出了一种时域自适应归一化最小均方误差算法(TD-NLMS)来消除航空移动通信正交频分复用(OFDM)系统中载波频率偏移引起的干扰。该算法首先对接收的时域信号进行频偏预估计和预补偿, 然后对剩余载波频移进行消除。仿真结果表明: 在航空移动通信信道环境中, 新算法可以很好的对旋转相位进行补偿, 与最小二乘算法相比, 误码率性能有明显提高, 可以实现对载波频率偏移的消除。

关键词 航空移动通信; 正交频分复用; 归一化最小均方误差; 载波频率偏移

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.01.016

中图分类号 TN911.5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)01-0071-04

Elimination of Carrier Frequency Offset in Aeronautical Mobile Communication OFDM System Based on TD-NLMS Algorithm

CHEN Qiang¹, YANG Xiao-peng¹, OUYANG Chao¹, YANG Dong², YU Hui³

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Air Force Engineering Design and Research Institute, Beijing 100086, China; 3. Unit 95866, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: Towards the complex channel environment and the inter-carriers interference (ICI) caused by Doppler frequency offset, a time domain adaptive algorithm based on normalized least mean square (TD-NLMS) is proposed to eliminate the interference caused by the carrier frequency offset (CFO) in aeronautical mobile communication OFDM system. In this algorithm, the CFO in time domain is estimated and compensated, and then the residual CFO is eliminated with TD-NLMS method. The simulation results show that in the aeronautical mobile channel environment, the use of the proposed algorithm can not only compensate the phase rotation, but also reduce the bit error rate to improve the accuracy and eliminate the CFO compared with that of the least square (LS) algorithm.

Key words: aeronautical mobile channel; OFDM; normalized least mean square error; carrier frequency offset

收稿日期: 2012-07-15

基金项目: 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(201104Y06)

作者简介: 陈强(1987-), 男, 山东潍坊人, 硕士生, 主要从事航空通信与信号处理研究。

E-mail: sdchairman@163.com

正交频分复用(OFDM)技术作为一种多载波调制方式,具有频谱利用率高、抗多径干扰能力强^[1-2]等特点,已被广泛应用到宽带无线通信中,同时在航空移动通信中也具有广泛的应用前景。然而航空信道存在突出的时变特性和多普勒频移^[3-4],会造成载波频率偏移(CFO),破坏 OFDM 系统子载波间的正交性,导致严重的子载波之间干扰(ICI)并且使系统性能恶化。因此需要采取必要的措施解决载波频率偏移问题,有效地提高航空移动通信质量并降低系统误码率。

为了降低载波频率偏移的影响,近年来各国学者提出了多种 CFO 估计算法^[5-7]。本文在分析了具有载波频偏的 OFDM 系统信号模型基础上,针对航空移动通信中存在较大载波频率偏移的问题,提出了一种时域自适应归一化最小均方误差算法(TD-NLMS),首先对接收信号进行频偏预估计,然后根据估计量对载波频率预补偿,最后利用归一化最小均方误差算法在时域内对残留频率偏移进行补偿,从而实现 CFO 的消除。

1 系统模型

在 OFDM 系统中,发送端的一个数据帧信息为 $X(0), X(1), \dots, X(N-1)$,经逆傅里叶变换(IFFT)后得到时域信号。为了消除多径信道导致的符号间干扰,在每个 OFDM 符号前添加循环前缀(CP),CP 的长度需要大于信道的最大时延。则发送信号可以表示为:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp(j2\pi kn/N) \quad (1)$$

假设理想定时同步,则接收端接收到的时域信号为:

$$y(n) = \sum_{l=1}^L h(n, \tau_l) x(n - \tau_l) \exp(j2\pi \epsilon n/N) + v(n) \quad (2)$$

式中: L 为多径数目; $h(n, \tau_l)$ 为第 l 条路径的增益; τ_l 为多径时延; ϵ 为引入的载波频率偏移; $v(n)$ 为零均值高斯白噪声。

令 m 表示除载波 k 外的其他载波,将接收到的信号进行离散傅里叶变换(DFT)后得到:

$$Y(k) = \text{DFT}(y(n)) = S(k)A(k, k) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{N-1} S(m)A(m, k) + V(K) \quad (3)$$

式中:第 1 项表示接收的无载波干扰信号;第 2 项表示接收载波 k 外的其余载波干扰,即 ICI 干扰,第 3 项为加性高斯白噪声的频域表示。同时对 $S(k)$ 、

$A(m, k)$ 定义如下:

$$\begin{cases} S(k) = \text{DFT}(s(n)) = \text{DFT}(h(n)x(n)) \\ A(m, k) = \frac{\sin(\pi(m-k+\epsilon))}{N \sin(\frac{\pi(m-k+\epsilon)}{N})} e^{j\pi(1-\frac{1}{N})(m-k+\epsilon)} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $[*]$ 代表卷积运算。

2 OFDM 频偏干扰消除

航空信道是一个时变衰落信道,飞行器的高速运动与较高的载波频率会使接收信号产生较大的多普勒扩展^[3],将严重影响信号接收,使系统误码率升高。为实现地空通信链路载波频率干扰的消除,需要对较大的频偏进行时域预估计与补偿,然后通过 TD-NLMS 算法对剩余频偏进行消除,从而提高系统性能。

2.1 载波频偏时域预估计与预补偿

假设 $c(n)$ 为对应于接收信号,收发双端已知的训练序列。利用已知序列进行频率偏移粗估计及预补偿,同时也可以将已知序列作为参考序列来完成 TD-NLMS 算法的自适应学习。根据文献[7]鲁棒估计器的思想,频偏估计可以表示为:

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{\pi} \text{angle} \left[\frac{\sum_{n=1}^{N/2} \text{conj}(y(n)c^*(n))}{(y(n+N/2)c^*(n+N/2))} \right] \quad (5)$$

对接收信号 $y(n)$ 进行预消除的信号可以表示为:

$$z(n) = y(n) \exp(-j2\pi \hat{\epsilon} n/N) \quad (6)$$

将式(2)、(4)代入式(6)得到:

$$\begin{aligned} z(n) &= s(n) \exp(j2\pi \epsilon n/N) \exp(-j2\pi \hat{\epsilon} n/N) = \\ &= s(n) \exp(j2\pi(\epsilon - \hat{\epsilon})n/N) = \\ &= s(n) \exp(j2\pi \zeta n/N) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: ζ 为预补偿载波频偏后的残留频率偏移;

$c^*(n)$ 表示对 $c(n)$ 取共轭。

2.2 TD-NLMS 算法剩余频偏消除

经过预估计和补偿后,剩余载波频偏值 ζ 较小,因此考虑较为简单的 LMS 自适应滤波算法进行消除。文献[8]总结出导致 LMS 算法收敛速度慢的根本原因是步长无法取得更大,否则算法不收敛;高速收敛和小稳态误差不可兼得,要加速收敛就应该对输入信号去相关或进行步长控制。而在时域上实现去相关最直接的方法就是归一化最小均方(Normalized Least Mean Square, NLMS)误差算法。

因此,本文采用的 TD-NLMS 算法的消除过程如下:将带有剩余载波频偏的信号 $z(n)$ 作为滤波器

的输入, $c(n)$ 作为收发双端已知的参考信号, $r(n)$ 作为滤波器处理后的输出信号, 经自适应学习, TD-NLMS 算法达到收敛状态。

最小均方(LMS)算法所采用的准则是使均衡器的期望输出值和实际输出值之间的均方误差最小化的准则。即采用均方误差作时域代价函数:

$$J = E\{|e(n)|^2\} = E\{|c(n) - r(n)|^2\} = E\{|c(n) - w^H(n)z(n)|^2\} \quad (8)$$

利用梯度下降法, 可以得到 TD-NLMS 算法的权向量递推公式为:

$$w(n+1) = w(n) + \mu(n)e^H(n)z(n) \quad (9)$$

式中 $\mu(n)$ 为自适应步长定义 $\mu(n) = \frac{\alpha}{\beta + z^H(n)z(n)}$

$= \frac{\alpha}{\beta + s^H(n)s(n)}$, 通常 $\alpha \in (0, 2)$, $\beta \geq 0$ 。

将频率偏移干扰代入式(9), 则:

$$\begin{aligned} e^H(n)z(n) &= \\ & \left(c(n) \left[1 - \exp\left(\frac{j2\pi n \zeta}{N}\right) \right] w^H(n) \right)^H \\ z(n) &= \left(\exp\left(\frac{j2\pi n \zeta}{N}\right) - w(n) \right) c(n) c^H(n) \end{aligned} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 并对两端取极限可得:

$$\begin{aligned} w_\infty &= \lim_{n \rightarrow \infty} w(n) = \\ & \frac{c(n) c^H(n) \mu(n)}{\exp\left(\frac{j2\pi n \zeta}{N}\right) - (1 - c(n) c^H(n) \mu(n))} \\ & \exp\left(\frac{j2\pi n \zeta}{N}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

则输出信号可以表示为:

$$\begin{aligned} r(n) &= w_\infty^H z(n) = \\ & \frac{\mu^H(n) c^H(n) c(n)}{\exp\left(-\frac{j2\pi n \zeta}{N}\right) - (1 - \mu^H(n) c^H(n) c(n))} \\ & \exp\left(-\frac{j2\pi n \zeta}{N}\right) s(n) \exp\left(\frac{j2\pi n \zeta}{N}\right) = \\ & \frac{\mu^H(n) c^H(n) c(n)}{\exp\left(-\frac{j2\pi n \zeta}{N}\right) - (1 - \mu^H(n) c^H(n) c(n))} s(n) \end{aligned} \quad (12)$$

从上式可看出, TD-NLMS 算法能对预补偿信号 $z(n)$ 中的剩余载波频偏进一步消除, 并且可以获得理想信号 $s(n)$; 虽然 $s(n)$ 的系数会改变 TD-NLMS 算法输出信号的幅值以及产生固定相位旋转, 由于剩余载波频偏已经很小, 上述影响可忽略。

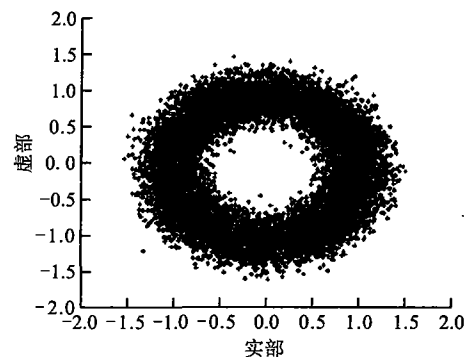
3 仿真实验及分析

仿真实验中, 航空信道采用假定的低空信道模型^[9-10], 信道的仿真参数为: 假定 OFDM 子载波总

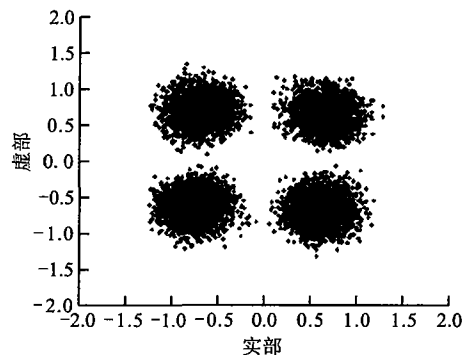
数为 256, 训练序列采用 PN 序列, 工作频率为 1 GHz, 数据传输速率为 5 Mbps, 多径数目为 20, 调制方式为 QPSK。最大多径时延为 33 μ s, 莱斯因子 $K=15$ dB, 天线波束宽度为 3.5°。

3.1 载波频偏消除能力分析

图 1 是 QPSK 调制信号在信噪比为 14 dB 情况下载波频偏消除前后的星座图。假设飞行器速度为 220 m/s, 此时频率偏移值为 0.1, 每帧 OFDM 数据符号为 1 000 个, 通过对星座图的观察可以发现, 采用 TD-NLMS 算法后, 能够有效消除频率偏移带来的影响, 对相位旋转进行了很好地补偿, 相位旋转得到完全恢复, 输出星座图紧凑集中、清晰明了。



(a) 带频率偏移的输入信号星座图



(b) TD-NLMS算法频偏消除后输出信号星座图

图 1 载波频偏消除前后的信号星座图

Fig. 1 Signal constellations with frequency offset and after frequency offset elimination

3.2 误码率分析

图 2 是 QPSK 信号在不同载波频率偏移下误码率性能曲线。其中自适应 TD-NLMS 算法的参数为 $\alpha=1$, $\beta=0.75$, 载波频率偏移 ϵ 分别为 0.1、0.2。以文献[2]中的 LS 修正算法做比较, 从图 2 的曲线可以看出, 存在载波频偏干扰时, 本文所提到自适应 TD-NLMS 算法性能优于 LS 算法, 尤其是在较大频偏情况下, LS 算法已失效, 产生较高的误码率平台效应, 而 TD-NLMS 算法对频率偏移消除的误码率性能效果明显。

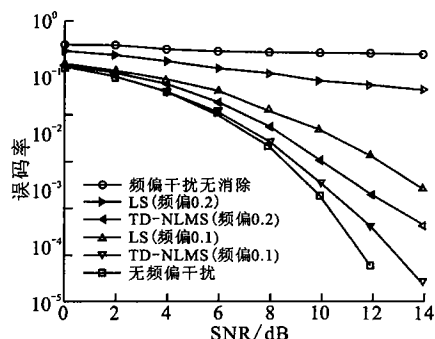


图2 不同载波频率偏移下误码率性能曲线

Fig.2 BER curves of different carrier frequency offset

4 结语

本文提出了一种适合于 QPSK 信号航空信道 OFDM 系统下时域自适应归一化最小均方误差算法,仿真结果表明,TD-NLMS 算法可以很好的补偿相位旋转,消除航空信道存在的较大载波频率偏移干扰,有效提高航空通信系统质量,对实现高可靠传输具有一定的应用价值。

参考文献(References):

- [1] Hwang S U, Lee J H, Seo J. Low-complexity iterative ICI cancellation and equalization for OFDM systems over doubly selective channels[J]. IEEE transactions on broadcasting, 2009, 55(1):132-139.
- [2] CAO Zhongren, Tureli U, YAO Yudong. Analysis of two receiver schemes for interleaved OFDMA uplink[C]//Signals, systems and computers, conference record of the thirty - sixth asilomar conference. Asilomar, IEEE press, 2002; 1818-1821.
- [3] Heque J, Erturk M C, Arslan H. Aeronautical ICI analysis and Doppler estimation[J]. IEEE communication letters, 2011, 15(9):906-908.
- [4] 刘解华,杨东凯,常青,等.航空移动通信中 OFDM 信道估计方法的研究[J].航空学报,2007,28(2):380-384.
LIU Jiehua, YANG Dongkai, CHANG Qing, et al. Research on channel estimation of OFDM systems in aviation mobile communications[J]. Acta aeronautica & astronautica sinica, 2007,28(2):380-384. (in Chinese)
- [5] 陈朝阳,邢海涛,杨光松,等.非参数似然率独立分量分析算法的 OFDM 系统载波频偏盲估计[J].仪器仪表学报,2011,32(9):1967-1972.
CHEN Zhaoyang, XING Haitao, YANG Guangsong, et al. Blind estimation of OFDM system carrier frequency offset using independent component analy-

sis algorithm with nonparametric likelihood ratio[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2011, 32(9):1967-1972. (in Chinese)

- [6] 关庆阳,赵洪林,郭庆.基于 TD-LMS 算法的 OFDMA 上行链路载波频率偏移消除[J].华南理工大学学报,2010,38(5):6-10.
GUAN Qingyang, ZHAO Honglin, GUO Qing. Elimination of carrier frequency offset in uplink OFDMA system based on TD-LMS algorithm[J]. Journal of south China university of technology, 2010, 38(5):6-10. (in Chinese)
- [7] Simon E P, Ros L, Hijazi H, et al. Joint carrier frequency offset and channel estimation for OFDM systems via the EM algorithm in the presence of very high mobility[J]. IEEE transactions on signal processing, 2012, 60(2):754-765.
- [8] 谷源涛. LMS 算法收敛性能研究及应用[D].北京:清华大学,2003.
GU Yuantao. Studies on the convergence performance of least mean square (LMS) algorithm and its applications[D]. Beijing: Tsinghua university, 2003. (in Chinese)
- [9] 杨霄鹏,姚琨,史浩山.航空信道仿真研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(3):16-19.
YANG Xiaopeng, YAO Kun, SHI Haoshan. Simulation study of aeronautical channel[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2006,7(3):16-19. (in Chinese)
- [10] 陈强,杨霄鹏,杨栋,等.低空无线信道建模及其均衡技术研究进展[J].电讯技术,2012,52(1):117-124.
CHEN Qiang, YANG Xiaopeng, YANG Dong, et al. Research on low-altitude wireless channel modeling and equalization technique [J]. Telecommunication engineering, 2012, 52(1):117-124. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)