

一种低复杂度的消除相位噪声的方法

陈 赟 曾晓洋 陈 琛 潘 安

(复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433)

摘 要 正交频分复用(OFDM)易受相位噪声的干扰。本文介绍了一种低复杂度的、基于有限长度的 TPS 算法的相位噪声消除方法,在相位噪声的频带比较窄的假设下,分析了它的简便性和实用性。仿真结果表明,基于 TPS 的消除相位噪声的方法,不仅能同时消除公共相位噪声(CPE)和子载波间干扰(ICI),而且在多径信道下,性能损失不大的情况下,大大降低了硬件实现的复杂度。

关键词 正交频分复用(OFDM) 相位噪声 连续传输参数指令(TPS) 数字电视地面广播

中图法分类号: TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2009)10-2114-04

A Low-complexity Phase Noise Cancellation Scheme for OFDM System

CHEN Yun, ZENG Xiao-yang, CHEN Chen, PAN An

(State Key Laboratory of ASIC and System, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract To compensate for the performance degradation induced by phase noise, a low-complexity phase noise cancellation algorithm for OFDM systems is developed in this paper. This method utilizes Transmission Parameter Signaling (TPS), which are inserted in frames and then are used for signaling parameters. Based on an assumption that finite-length TPS sub-carriers can cover most energy of phase noise, the proposed scheme can remove phase noise effectively and achieve satisfying results of low complexity as well.

Keywords OFDM, phase noise, TPS, digital terrestrial broadcasting

1 引 言

OFDM 能有效抑制符号间干扰(ISI),但对相位噪声比较敏感。相位噪声可以通过采用性能较好的振荡器来抑制,但数量众多的数字电视接收机要求不能使用太昂贵的振荡器,因此需要研究消除的方法。相位噪声可分为公共相位噪声(CPE)和子载波间干扰(ICI)。CPE 可通过均衡来去除,但 ICI 的去除则比较困难。一些方法^[1-3]在算法上十分复杂,电路中实现的可操作性不大。而 OFDM 随着子载波的增加,ICI 变得越来越不可忽略。

针对 OFDM 系统研究了低复杂度的消除相位噪声的方法——确定点的 TPS 算法。这个算法使

用了 TPS 信息,在典型的相位噪声模型下,可以比已有的 LS 的算法有更好的效果,同时复杂度较低。

2 相位噪声分析

2.1 相位噪声模型

本地振荡器相位噪声的特性一般用功率谱密度 $S_{\phi}(f)$ 来表示,一种典型的相噪功率谱密度的模型^[4]为

$$S_{\phi}(f) = 10^{-c} + \begin{cases} 10^{-a} & |f| < f_1 \\ 10^{-(f-f_1)\frac{b}{f_2-f_1}-a} & f > f_1 \\ 10^{(f+f_1)\frac{b}{f_2-f_1}-a} & f < -f_1 \\ 0 & |f| > f_2 \end{cases} \quad (1)$$

基金项目:上海市科委项目(08700741100);国家重点实验室项目(20080202)

收稿日期:2009-06-20;改回日期:2009-07-07

第一作者简介:陈 赟(1979 ~),讲师。2007 年于复旦大学获微电子专业博士学位。研究方向为数字信号传输与处理的大规模集成电路实现。E-mail:chenyun@fudan.edu.cn

式中,参数 a 为从中心频率到 f_1 的噪声 PSD (power spectrum density)。参数 f_1 为相位噪声功率谱密度的 3 dB 带宽, b 为噪声频率从 f_1 到 f_2 的滚降因子。当频率大于 f_2 时的噪声由参数 c 表示。各参数的典型设置: $a = 6.5, b = 4, c = 10.5, f_1 = 1 \text{ kHz}, f_2 = 10 \text{ kHz}$ 。可知相位噪声的能量主要集中在相邻的几个子载波频带内。

2.2 相位噪声的影响

相位噪声可以以一个相位旋转 $e^{j\varphi(n)}$ 为模型,考虑信号经过信道 $h(n)$,经离散傅里叶逆变换 (IDFT) 调制后信号可以表示为

$$y(n) = e^{j\varphi(n)} \cdot (x(n) * h(n)) \quad (2)$$

既然相位噪声与信号相比非常小,所以可以近似

$$e^{j\varphi(n)} = 1 + j \cdot \varphi(n) \quad (3)$$

故式(2)经 DFT 后输出可表示为

$$Y(k) \approx H(k) \cdot X(k) + j \cdot [\varphi(k) * (H(k) \cdot X(k))] / 3780 \quad (4)$$

相位噪声可分为公共相位噪声和子载波间的干扰。CPE 引起当前所有接收到的数据符号的相位旋转,导致信号星座图的整体旋转。ICI 则会导致接收星座点的杂散。

考虑到 ICI 的消除十分复杂,一般情况下只消除 CPE,如 DVB-T/H 系统利用连续导频和上一个符号连续导频对应的信道估计值^[5]。虽然每一个连续导频子载波都含有 CPE 的信息,但是有可能某些导频子载波会受到较大的干扰,实际使用的算法中需要考虑子载波上的 CSI 信息。

3 低复杂度的相位噪声消除方法

随着子载波的增加,ICI 变得越来越不可忽略,需要把 CPE 和 ICI 当成一个整体消除。典型的相位噪声的带宽是 1 kHz 左右,所以相位噪声的能量基本集中在几个子载波范围内。根据这个原理,可以利用传输参数信令 (TPS) 子载波来消除相位噪声。

以 DTMB (terrestrial digital multimedia/television broadcasting) 系统为例,该系统的 OFDM 的子载波数为 3 780,使用其中 3 744 个子载波传送数据 $X(k)$,36 个子载波作为 TPS, TPS 子载波位于帧头,它的值对于接收端可视为已知的^[6-7]。

假设 DTMB 系统的帧体表示为

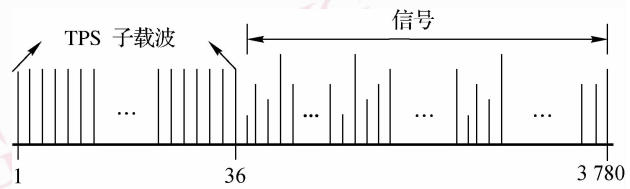


图 1 DTMB 系统中经过信道衰减的 TPS

Fig 1 TPS in DTMB system

$$x'(n) = IDFT(\{TPS(k), X(k)\}) \quad (5)$$

由图 1 可知,相位噪声 $\phi(k)$ 的能量主要集中在相邻的几个子载波频带内。如果 $H(k)$ 已知,在固定的传输模式情况下,36 个 TPS 子载波在所有的帧中都是确定的。所以可以将这些子载波的值作为已知,来估计对应的相位噪声 $\phi(k)$ 。

估计相位噪声时,可根据需要取一组连续的任意长度的 TPS。考虑到 TPS 子载波取的太少会造成相位噪声能量的过分泄漏,太多又会引入严重的加性高斯白噪声干扰,两种情况都会造成估计的不准,因此合适的 TPS 子载波数目非常重要。

根据以上分析,选择 1 到 36 的随机长度来估计相噪。在不考虑高斯白噪声 $N'(k)$ 的理想情况下,假设

$$V(k) = H(k) \cdot X'(k) \quad (6)$$

例如一组长度为 l 的 TPS 子载波可以表示为

$$Y(k) = V(k) + j[\phi(5)V(k) + \phi(6)V(k-1) + \phi(7)V(k-2) + \phi(3)V(k+2) + \phi(4)V(k+1)] / 3780 \quad (7)$$

$$k = 7, 8, 9, 10, 11$$

从上述分析可以看出,向量 $V(5)$ 到 $V(13)$ 已知,因此有 9 个公式,9 个未知的 $\phi(k)$ 。 k 表示子载波数 3,4,5,6,7。在完成 3 780 点 IDFT 之后, $\varphi(n)$ 可以被估计出来。完成相噪消除后的信号 $y'(n)$ 可以表示为

$$y'(n) = y(n) \cdot \exp(-j \cdot \varphi(n)) \quad (8)$$

在式(7)中,假设

$$AX = B$$

$$A = \begin{pmatrix} V(7) & V(6) & V(5) & V(9) & V(8) \\ V(8) & V(7) & V(6) & V(10) & V(9) \\ V(9) & V(8) & V(7) & V(11) & V(10) \\ V(10) & V(9) & V(8) & V(12) & V(11) \\ V(11) & V(10) & V(9) & V(13) & V(12) \end{pmatrix}$$

$$B = -j \cdot 3780 \cdot \begin{pmatrix} Y(7) - V(7) \\ Y(8) - V(8) \\ Y(9) - V(9) \\ Y(10) - V(10) \\ Y(11) - V(11) \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} \phi(5) \\ \phi(6) \\ \phi(7) \\ \phi(3) \\ \phi(4) \end{pmatrix} \quad (9)$$

基于硬件实现的考虑, 只有一个简单的矩阵和系数向量 X 需要计算, 通过 LS (least squared) 算法或者 LU 分解即可。这些运算只需要 $2l \times l$ 次乘法和 $2l \times (l-1)$ 次加法。整个算法的复杂度只有 $O(l \times l)$, 其中 $l \ll N$ 。算法复杂度比较低。

4 仿真结果及分析

在 COST 207 6-path typical hilly terrain channels^[8] 的多径条件下, 在 DTMB 标准的系统中仿真提出的低复杂度消除相位噪声的方法。算法仿真的各项参数如表 1 所示。

表 1 DTMB 系统仿真参数

Tab. 1 Parameters of the DTMB system

采样频率	7.56 Mbps
帧体数	3780
帧体周期	500 μ s
子载波间隔	2.0 kHz
调制方式	64 QAM
TPS 个数	36

25 dB 时, 使用低复杂度的基于 TPS 相位噪声算法估计出的相位噪声, 估计出的曲线比较好的反应出相位噪声的趋势。

图 3 是当 SNR 为 25 dB 时, 消除相位噪声和不消除时星座图的对比, 可以看到 CPE 和 ICI 都得到了补偿。

图 4 为在选择不同 TPS 值时的 SER 性能。与文献[8]中提出的自消除的算法进行了比较, 相位噪声自消除的算法的复杂度是 $O(N^3)$, 因此在性能损失不大的情况下, 大大降低了复杂度。

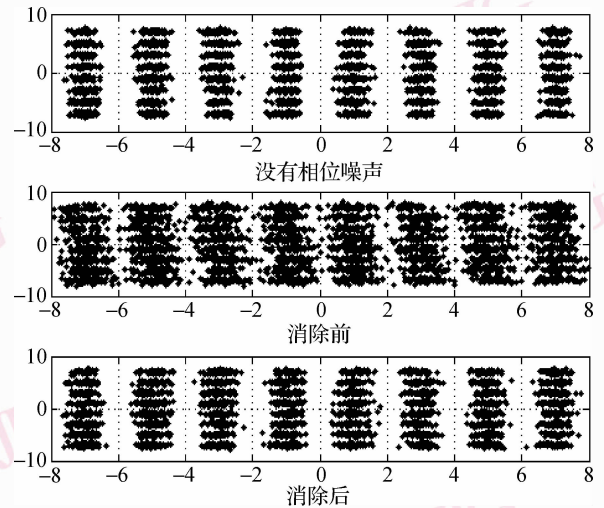


图 3 相噪消除前后星座图

Fig. 3 Constellation of both before and after phase noise compensation

图 2 是时域上的相位噪声估计, 在 SNR 为

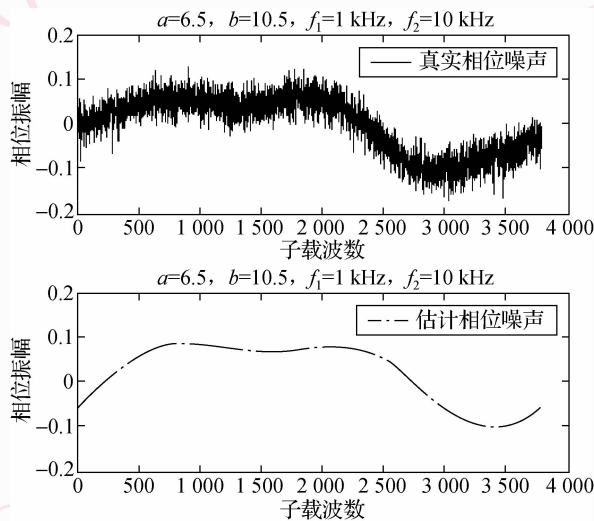


图 2 在时域上估计相位噪声

Fig. 2 Performance of five-point algorithm in time domain

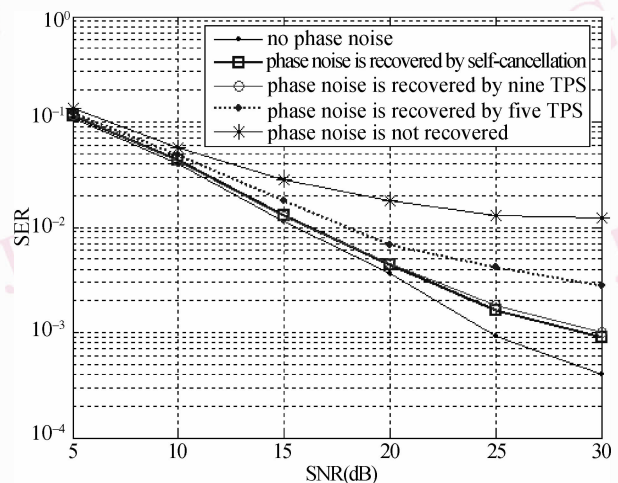


图 4 在 6 条多径条件下的 SER 性能曲线

Fig. 4 SER performance comparing in 6-path channel

5 结 论

提出了一种低复杂度的基于 TPS 的相位噪声消除算法,这种方法相比以前只主要补偿 CPE 的传统方法,能很好地对 CPE 和 ICI 同时进行补偿;和 LS,MMSE 算法的高复杂性,硬件难以实现相比,TPS 算法只需解一个不大的方程组,且常数都为 1 或 -1,乘法可以简化为符号判断,这样需要的硬件开销不大;这种方法可根据需要选择任意位置、任意长度的 TPS 进行估计,具有一定的灵活性,同时也具有了抗多径干扰的能力;由于使用了相位噪声补偿模块,能有效降低用户端振荡器的成本。

参考文献 (References)

- 1 Gholami M R, Nader-Esfahani S, Eftekhar A A. A new method of phase noise compensation in OFDM [A]. In: Proceedings of the 2003 Implicit Computational Complexity Workshop [C], Ottawa, Canada, 2003, 5:3443-3446.
- 2 Wu H C, Wu Y. A new ICI matrix estimation technique using padded m-sequences for wireless OFDM systems [A]. In: Proceedings of 2005 IEEE Global Telecommunications Conference[C], Saint Louis, Missouri, USA, 2005, 5:2917-2921.
- 3 El-Tanany M S, Wu Y, Hazy L. Analytical modeling and simulation of phase noise interference in OFDM-based digital television terrestrial broadcasting systems [J]. IEEE Transactions on Broadcast, 2001, 47(1):20-31.
- 4 Robertson P, Kaiser S. Analysis of the effects of phase-noise in orthogonal frequency division multiplex (OFDM) systems [J]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications [C], Seattle, USA, 1995, 3:1652-1657.
- 5 Armada A G. Understanding the effects of phase noise in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2001, 47(2):153-159.
- 6 Wang J, Yang Z X, Pan C Y. A combined code acquisition and symbol timing recovery method for TDS-OFDM [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2003, 49(3):304-308.
- 7 Fu J, Pan C Y, Yang Z X. Low-complexity equalization for TDS-OFDM systems over doubly selective channels [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2005, 51(3):401-407.
- 8 Wang H M, Chen X, Zhou S D, et al. A low-Complexity ICI cancellation scheme in frequency domain for OFDM in time-varying multipath channels [A]. In: Proceedings of IEEE 16th International Symposium on Personal indoor and Mobile Radio Communications [C], Berlin, Germany, 2005, 2:1234-1237.