



OFDM 系统中一种实用的干扰抑制信道估计算法

赖晓阳¹, 朵琳^{1,2}

(1. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083;

2. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051)

摘要:针对 OFDM 系统中 LS 信道估计在噪声消除和干扰抑制上的不足, 提出一种干扰抑制信道估计算法。算法利用 OFDM 信号的时频二维特性, 在 LS 信道估计基础上通过 3 次 FFT/IFFT 实现信道噪声消除和窄带干扰抑制, 算法复杂度低, 具有较好的工程可行性。算法仿真结果表明, 这种干扰抑制的信道估计性能比传统 LS 信道估计在多径信道下的性能提升 3 dB 以上, 在有窄带干扰的场景下系统性能损失在 1.5 dB 以内。

关键词: OFDM; 信道估计; 干扰抑制

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016013

Utility channel estimation algorithm with interference suppression in OFDM system

LAI Xiaoyang¹, DUO Lin^{1,2}

1. School of Computer & Communication, Beijing University of Science & Technology, Beijing 100083, China

2. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China

Abstract: In OFDM system, the least square (LS) algorithm has the shortage of noise cancelling and interference suppressing. An utility channel estimation algorithm which took advantage of the time frequency characteristic in OFDM system was proposed. The new channel estimation algorithm realized noise cancelling and interference suppressing through time-frequency transform by three times. In view of time-frequency transform could be achieved by FFT/IFFT, the new channel estimation algorithm complexity was low. In the TU channel simulation, the new channel estimation algorithm has the high performance, which was 3 dB better than the LS algorithm. In the TU channel simulation with interference suppression, the new channel estimation algorithm has only 1.5 dB reduction in performance.

Key words: OFDM, channel estimation, interference suppression

1 引言

OFDM(正交频分复用)是一种多载波传输技术,它的主要思想是将整个信道分成若干个正交的子信道,在每个子信道上进行信号的调制和传输,从而提高频带利用率^[1]。

OFDM 已在多种无线通信系统中得到广泛应用,如数字音频广播(DAB)系统、数字视频广播(DVB)系统^[2]、无线局域网(WLAN)^[3]以及第四代移动通信系统(LTE)^[4]等。在大多数 OFDM 系统中,为了获得较好的接收性能,都采取了基于频域的训练序列进行信道估计^[5]。根据参考文献[5],频域

收稿日期:2015-12-10;修回日期:2016-01-07

训练序列最简单的信道估计算法是最小二乘(least square, LS)准则。

典型的基于频域训练序列的信道估计原理如图1所示^[6]。

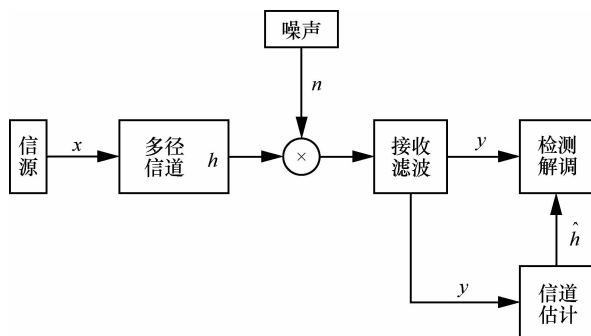


图1 信道估计原理

根据信道估计原理,接收到的信号 y 可以表示为^[9]:

$$Y(k,l)=H(k,l)X(k,l)+N \quad (1)$$

其中, $Y(k,l)$ 是接收信号的频域数据, $H(k,l)$ 是信道频域冲击响应, $X(k,l)$ 是发射信号的频域数据, N 是信道白噪声的频域数据。

所谓 LS 信道估计就是:

$$\hat{H}_{ls}(k,l)=\frac{Y(k,l)}{X(k,l)} \quad (2)$$

其中, $\hat{H}_{ls}(k,l)$ 即信道估计的频域数据。

但实际上:

$$\hat{H}_{ls}(k,l)=\frac{Y(k,l)}{X(k,l)}=H(k,l)+\frac{N}{X(k,l)} \quad (3)$$

由式(3)可以看到,LS 信道估计的结果 $\hat{H}_{ls}(k,l)$ 相对于实际信道 $H(k,l)$ 来讲,忽略了噪声 N 对信道的影响。为了提升 LS 信道估计的性能, Jang J H 等人^[7]对 LS 信道估计中忽略的噪声进行研究,提出将 LS 频域信道估计的结果通过 DFT 变换到时域进行噪声消除的算法,取得了逼近理想信道估计的性能。

然而,在宽带 OFDM 系统中,传输信道除了受多径和噪声影响外,还可能遇到带内的突发窄带干扰,意即:

$$Y(k,l)=H(k,l)X(k,l)+H(k_1,l)I(k_1,l)+N \quad (4)$$

其中, $I(k_1,l)$ 是 OFDM 无线传输信道内的窄带干扰,如果采用 LS 信道估计,有:

$$\begin{aligned} \hat{H}_{ls}(k,l) &= \frac{Y(k,l)}{X(k,l)} = H(k,l) + \frac{N}{X(k,l)} + \frac{H(k_1,l)I(k_1,l)}{X(k,l)} = \hat{H}_{ls}(k,l) + \\ & \frac{H(k_1,l)I(k_1,l)}{X(k_1,l)} \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可以看到,噪声和干扰都会影响 LS 信道估计的结果。当信道中存在窄带干扰时,如果仅进行噪声消除,OFDM 系统的传输性能会大大降低,对系统的工程应用范围也有负面影响。为了提升 OFDM 系统在工程应用中的性能,本文在保证算法复杂度可实现的基础上,提出一种实用的干扰抑制信道估计算法,有效弥补了 LS 信道估计在噪声消除和干扰抑制方面的不足,并通过仿真验证了算法的性能。

2 基于 DFT 的信道估计算法

通过时域信道估计进行降噪的算法思想如图2所示^[7]。

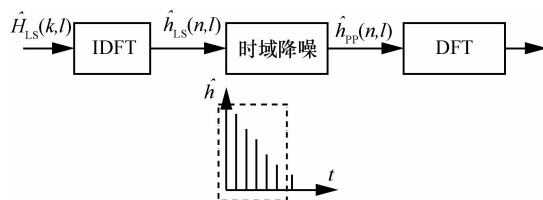


图2 基于 DFT 的信道估计算法思想

根据参考文献[7],有:

$$\hat{h}_{ls}(n,l)=IDFT[\hat{H}_{ls}(k,l)]=\sum_{i=0}^{L-1}\alpha_i\delta(n-\tau_i), 0\leq n\leq N-1 \quad (6)$$

其中, α_i 代表不同多径上的增益, L 代表最大多径时延, $\hat{h}_{ls}(n,l)$ 代表信道的时域冲击响应。由于信道的多径传播,对于时域信道估计,可以认为在多径时延内的抽头是信号、干扰和热噪声共同作用的结果,而其他位置的抽头就是干扰和热噪声共同作用的结果,意即:

$$\hat{h}_{ls}(n,l)=\begin{cases} h(n,l)+n(n,l), & 0\leq n\leq N-1 \\ n(n,l), & L< n\leq N-1 \end{cases} \quad (7)$$

从而,可以通过对多径时延外的信号进行噪声估计,实现时域信道估计的降噪。不过,由于实际信道的多径时延不可能恰好是 OFDM 最小采样间隔的整数倍,时域信道冲击响应在多径时延外存在功率泄露,所以工程实现的方案是通过比对噪声门限来消除 LS 信道估计结果中的噪声。

基于 DFT 的信道估计算法过程如下。

(1)对 LS 信道估计结果进行 IDFT 得到时域信道冲击响应为:

$$\hat{h}_{ls}(n,l)=IDFT[\hat{H}_{ls}(k,l)] \quad (8)$$

(2)提取时域冲击响应的多径抽头,并进行降噪处理:

$$\hat{h}_{pp}(n,l)=\begin{cases} \hat{h}_{ls}(n,l), & |\hat{h}_{ls}(n,l)|^2>\Gamma \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\hat{h}_{\text{eff}}(n, l)$ 为降噪处理后的时域信道冲击响应, Γ 为降噪门限, 可以通过仿真来辅助制定, 实际通信系统中还可以通过对信道环境的实测结果进行动态配置。

(3)求取噪声消除后的频域信道估计

$$\hat{H}_{pp}(k,l)=FFT[\hat{h}_{pp}(n,l)] \quad (10)$$

其中, $\hat{H}_{pp}(k, l)$ 为降噪处理后的频域信道冲击响应。

基于 DFT 的信道估计算法的核心思想是对频域的 LS 信道估计进行一次时频变换,在时频进行噪声估计和消除,从而提高 LS 信道估计的性能。

3 干扰抑制信道估计方法

由于窄带干扰的时域特性体现为噪底抬高,当信道中存在窄带干扰时,如果直接基于 DFT 的信道估计算法会引起信道噪声估计偏大,降噪后的信道估计不准确,并且随着信噪比的提升,信道估计的误差会越大,导致最终的接收性能在降噪后反而更加恶化。

对比式(8),叠加干扰之后的 LS 时域信道估计 $\hat{h}'_{\text{LS}}(n,l)$ 应表示为:

$$\hat{h}'_{\text{IS}}(n,l)=\begin{cases} h(n,l)+h_1(n,l)+n(n,l), & 0 \leq n \leq L-1 \\ h_1(n,l)+n(n,l), & L-1 < n \leq L \end{cases} \quad (11)$$

其中, $h_l(n, l)$ 是对干扰信号进行 LS 信道估计后的时域波形。

因为噪声具有带内随机性, 而干扰存在于特定频段, 因此对于式(11)进行降噪操作不会改变信号和干扰的频域特性, 即:

$$\hat{H}'_{\text{pp}}(k,l)=FFT[\hat{h}'_{\text{pp}}(n,l)]=\hat{H}_{\text{pp}}(k,l)+\frac{H(k,l)I(k,l)}{X(k,l)} \quad (12)$$

从而:

$$\frac{H(k_1, l)I(k_1, l)}{X(k_1, l)} = \hat{H}'_{\text{PP}}(k, l) - \hat{H}_{\text{PP}}(k, l) \quad (13)$$

根据式(13),在受到干扰的频段 k_l 存在 $\frac{H(k_l, l)I(k_l, l)}{X(k_l, l)}$ 分量,由此可以设置判决门限识别出受到干扰的频段,通过邻频段的信道估计对干扰频段的信道进行插值估计,以达到抑制干扰影响信道估计性能的效果。实际工程应用中,干扰无法事先消除,因此 $\hat{H}_{\text{rr}}(k, l)$ 不可得,只能用 $\hat{H}_{\text{ls}}(k, l)$ 近似代替。

干扰抑制信道估计的实现过程如图 3 所示。

干扰抑制算法的核心思想是通过比对降噪前后频域信道估计结果,识别出被干扰的频段,用邻频段的信道估计结果进行插值,在此基础上再进行噪声消除,从而得到更为准确的信道估计结果。在实现上,干扰抑制信道估计算法只需要对 LS 信道估计结果进行 3 次 FFT/IFFT,即可完成噪声消除和干扰抑制,算法的工程可实现性非常高。

干扰抑制算法过程如下。

(1)对 LS 信道估计结果进行 IFFT 得到时域信道冲激响应:

$$\hat{h}'_{\text{IS}}(n,l)=IDFT[\hat{H}'_{\text{IS}}(k,l)] \quad (14)$$

(2)提取时域冲激响应的多径抽头,并进行降噪处理;

$$\hat{h}'_{\text{pp}}(n,l)=\begin{cases} \hat{h}'_{\text{ls}}(n,l), & |\hat{h}'_{\text{ls}}(n,l)|^2 > \Gamma \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

其中, Γ 为降噪门限。

(3)求取噪声消除后的频域信道估计 $\hat{H}'_{pp}(k,l)=FFT[\hat{h}'_{pp}(n,l)]$ 。

(4)判断并识别干扰频段:

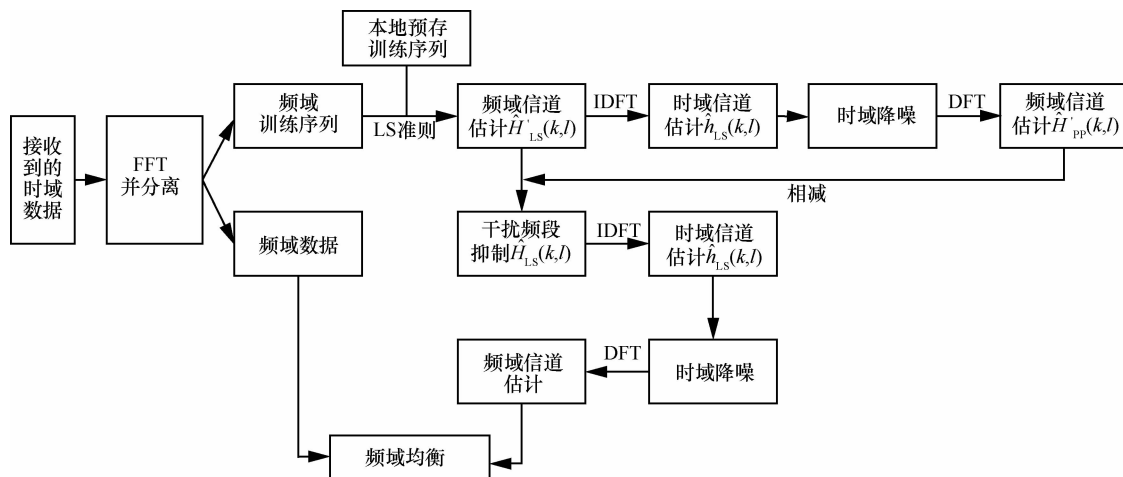


图 3 干扰抑制的信道估计流程

$$k_1 \in \{k | [\hat{H}_{PP}(k, l) - \hat{H}_{LS}(k, l)] > \Gamma\}$$

其中, Γ 为干扰门限。

(5) 对受到干扰的 $\hat{H}_{LS}(k, l)$ 用邻频段 $\hat{H}_{LS}(k', l)$ 插值, 得到新的 $\hat{H}_{LS}(k, l)$ 。

(6) 对新的 $\hat{H}_{LS}(k, l)$ 重新执行一次步骤(1)~(3), 得到最终的 $\hat{H}_{PP}(k, l)$ 。

值得注意的是, 干扰抑制算法只是抑制了干扰对信道估计性能的影响, 并不能消除信道上的干扰, 频域数据在均衡之后还应将对应干扰频段的软符号采取置 0 操作, 通过信道译码完整恢复原始发送信号。

4 仿真结果和分析

为了验证本文所提出的 OFDM 系统干扰抑制信道估计算法的性能, 主要针对多径信道和叠加窄带干扰的多径信道进行算法仿真, 通过对比系统解调性能说明算法的性能。仿真的 OFDM 系统共有 512 个子载波, 块状安置导频, 原始比特采用 Turbo 编码, 调制方式为 QPSK。仿真中假定系统已精确同步, 从而排除同步误差引起的性能差异。

仿真采用的多径信道为 3GPP 建议的 TU 信道模型^[4], 相关参数的设置见表 1。

表 1 TU 信道参数

传播路径	功率/dBm	时延/ns
0	-3	0
1	0	200
2	-2	600
3	-6	1 600
4	-8	2 400
5	-10	5 000

图 4 是在标准多径信道下的仿真结果。可以看到, LS 信道估计的性能受噪声影响比较大, 基于本文所提出的干扰抑制信道估计算法的系统接收性能可以提升 3 dB 以上, 说明本文提出的干扰抑制信道估计算法在城市通信环境下具有良好的性能。

当信道中存在一个信号强度 2 倍于 OFDM 符号的单音干扰时, 如果只进行噪声消除而不采取干扰抑制措施, 基于 DFT 的降噪算法会将窄带干扰误判为噪声, 导致信道估计出现错误, 采用降噪信道估计的系统会产生如图 5 所示的瓶底效应。由于窄带干扰只对部分频段带来影响, 采用 LS 信道估计的 OFDM 系统反而能够随着信噪比的增加而改善系统性能。

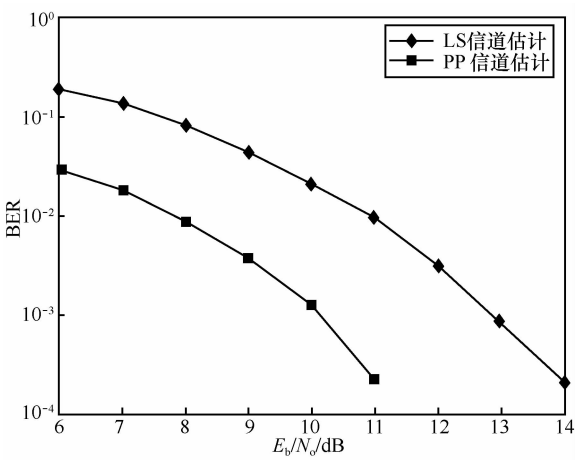


图 4 标准多径信道下的仿真性能

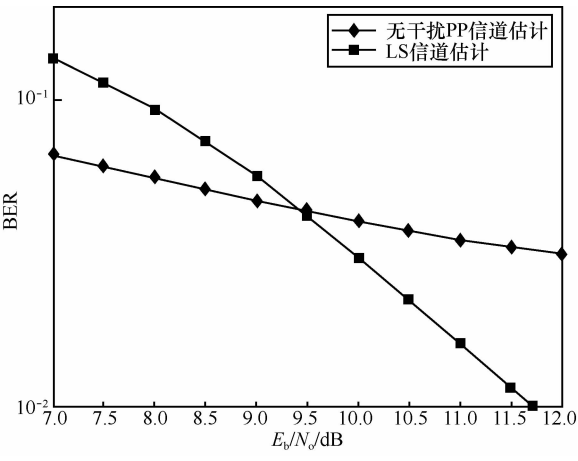


图 5 不采取干扰抑制的仿真性能 (TU 模型)

采用本文的干扰抑制算法后, OFDM 系统性能将发生质的改变, 如图 6 所示, 相对于没有干扰的信道场景, 系统性能降低在 1.5 dB 以内。

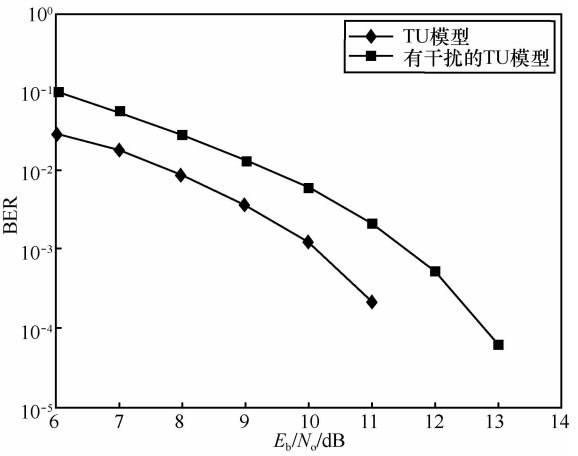


图 6 采取干扰抑制的仿真性能 (PP 信道估计)



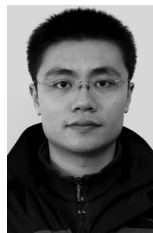
5 结束语

本文着眼于 OFDM 关键技术之一的信道估计,在传统 LS 信道估计结果基础上通过 3 次 IFFT/FFT 完成噪声消除和干扰抑制,保持了 LS 信道估计实现简单的优势,提升了信道估计的准确度,扩大了 OFDM 系统的工程应用场景。仿真结果表明,采取干扰抑制信道估计方法相对于传统 LS 信道估计解调性能在高斯信道下解调性能提升 3 dB,在 多径信道下提升 2 dB 以上;在信道存在窄带干扰的情况下,干扰抑制算法发挥作用,性能只有 1 dB 的恶化。目前这种干扰抑制的信道估计方法已经在 Freescale MSC8157 处理器上开发实现,系统集成测试性能与仿真结果基本吻合,正在进行实际环境应用测试。

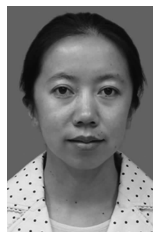
参考文献:

- [1] CIMINI L J. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing [J]. IEEE Transactions on Communications, 1985, 33(7): 665-675.
- [2] BINGHAM J. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come [J]. IEEE Communications Magazine, 1990, 28(5): 5-14.
- [3] CLASSON B, BLANKENSHIP K, DESAI V. Channel coding for 4G systems with adaptive modulation and coding [J]. IEEE Wireless Common, 2002, 9(2): 8-13.
- [4] Technical specification group radio access network, spatial channel model for multiple input multiple output(MIMO) simulations: 3GPP TR 25.996 V6.1.0 [S/OL]. [2016-01-06]. <http://www.docin.com/p-473498830.html>.
- [5] VDB J J, EDFORS O. On channel estimation in OFDM systems [C]//Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference, July 25-28, 1995, Chicago, IL, USA. New York: IEEE Vehicular Technology Conference, 1995(2): 815-819.
- [6] CHANG R W. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission [J]. Bell Labs Technical Journal, 1966, 45(10): 1775-1796.
- [7] JANG J H, IM S B, PARK J S, et al. DFT-based decision directed channel estimation for OFDM systems in very large delay spread channels [C]//Proceedings of APCC 2008, October 14-16, 2008, Akihabara, Tokyo, Japan. New Jersey: IEEE Press, c2008: 1-5.
- [8] MIGNONE V, MORRELLO A. CD3-OFDM: a novel demodulation scheme for fixed and mobile receivers [J]. IEEE Transactions on Communication, 1996, 44(9): 1144-1151.
- [9] 宋伯伟. OFDM 无线宽带移动通信系统中信道估计和均衡技术研究[D].上海:上海交通大学, 2006: 25-35.
- SONG B W. Study on channel estimation and equalization technique for OFDM based wireless broadband mobile communication systems [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006: 25-35.
- [10] 唐恬, 张治, 张平. 一种基于频域加窗的 OFDM 信道估计算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(12): 2930-2933.
- TANG T, ZHANG Z, ZHANG P. A channel estimation algorithm for OFDM based on frequency domain windowing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(12): 2930-2933.
- [11] 王军, 李少谦, 龚树平, 等. 变换域通信系统中的信道估计技术[J]. 电子科技大学学报, 2009(1): 40-42.
- WANG J, LI S Q, GONG S P, et al. Channel estimation applied to transform domain communication system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009(1): 40-42.
- [12] LEE Y S, KIM H N. Noise reduction for channel estimation based on pilot-block averaging in DVB-T receivers [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2006, 52(1): 51-58.
- [13] RAGHAVENDRA M R, GIRIDHAR K. Improving channel estimation in OFDM systems for sparse multipath channels[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(1): 52-55.
- [14] LI Y, CIMINI L J, SOLLENBERGE N R. Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 3(7): 902-915.
- [15] TOLOCHKO I, FAULKNER M. Real time LMMSE channel estimation for wireless OFDM systems with transmitter diversity[C]//Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, May 6-9, 2002, Birmingham, AL, USA. New York: VTC Spring, c2002: 1555-1559.
- [16] QIAO Y T, YU S Y, SU P C, et al. Research on an iterative algorithm of LS channel estimation in MIMO OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2004, 2(1): 729-732.

[作者简介]



赖晓阳(1982-),男,北京科技大学博士生,主要研究方向为宽带移动通信系统信号处理及网络协议关键技术。



朵琳(1974-),女,北京科技大学博士生,昆明理工大学讲师,主要研究方向为下一代网络技术。