

一种 OFDM 系统中的同频干扰消除算法

赵婷婷* 赵玉萍

(北京大学信息科学技术学院电子学系 北京 100871)

摘要: 该文研究正交频分复用(OFDM)系统中的同频干扰(CCI)问题。基于正弦信号模型, 该文提出一种基于最小均方误差(MMSE)准则的干扰时域估计与消除算法, 并进行仿真实验。仿真结果表明: 与现有算法相比, 该文提出的方法可以更为有效地抑制单频模型的 CCI。同时, 该文提出的方法对干扰进行时域估计与消除, 减小了时频变换后的干扰能量泄漏, 并具有不依赖于信道估计, 避免直接清零造成的有用信息损失等优点。

关键词: 正交频分复用; 同频干扰; 最小均方误差; 幅度/相位估计

中图分类号: TN 911.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)08-1993-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01294

A Co-channel Interference Suppression Scheme in OFDM Systems

Zhao Ting-ting Zhao Yu-ping

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The issue of Co-Channel Interference (CCI) in the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems is studied in this paper. A time-domain estimation and elimination scheme of sinusoidal-modeled CCI is proposed based on the Minimum Mean Square Error (MMSE) criterion. It is proved by simulation that the proposed algorithm can suppress the CCI effectively. Compared with the existing scheme, the proposed time-domain method can avoid the interference leakage because of the time-to-frequency transformation, the dependence on channel estimation and the loss of useful data caused by directly erasing.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Co-Channel Interference (CCI); Minimum Mean Square Error (MMSE); Amplitude/phase estimation

1 引言

正交频分复用(OFDM)技术以其频谱效率高、带宽扩展和资源分配方式灵活、抗衰落能力强以及易于与多天线技术相结合等优势, 已经成为新一代无线通信的核心技术。由于频谱资源紧缺与需求快速增长之间的矛盾, 多个系统共享同一频带、相互干扰的情景不可避免, 特别是在宽带通信系统中, 常常会出现窄带宽、高功率的同频干扰(CCI), 影响系统性能。

OFDM 系统接收端对 CCI 的有效检测、估计和去除是提高系统性能的一个重要环节, 可以在时域或频域进行。其中, 时域技术主要包括窗函数加权的干扰抑制以及自适应预测滤波, 文献[1,2]给出时域的加窗策略, 通过设计低旁瓣的窗函数抑制干扰在频域的能量泄漏, 但无法消除干扰; 文献[3]采用滤波预测的方式估计干扰并予以消除, 但需要付出滤波系数收敛的时间代价。频域方法主要包括基于

槽型滤波的干扰抑制以及与信道估计、编解码结合的方法。文献[4-6]给出利用槽型滤波器对特定频点的干扰进行抑制的方法; 文献[7]采用基于门限判决的频域自适应滤波算法; 文献[8]利用相邻符号的信道估计差异对 CCI 进行检测、修正解调软信息以提高系统性能; 文献[9]利用相邻导频的信道估计差异检测受干扰导频并对信道估计进行修正, 同时利用相邻子载波信号幅度的差异检测并擦除受干扰数据。上述几种频域方法在一定程度上都受到信道估计的影响, 并由于对受干扰子载波信号的直接清零而损失了有用数据。

本文考虑一种简单的 CCI 模型, 即频点已知的单频正弦信号。单频建模的干扰信号常常被用于系统抗窄带干扰性能的验证, 并且在实际系统中也确实可能存在可近似为单频信号的干扰。如地面数字视频广播(DVB-T)系统中, 按照现行逐行倒相制式(PAL)标准的模拟广播电视信号就可以近似看作是固定频点的单频干扰^[10]。本文提出一种基于最小均方误差(MMSE)准则的单频干扰时域估计方法, 给出仿真结果和相应的分析。

2010-11-22 收到, 2011-04-09 改回

国家科技重大专项(2010ZX03005-003)资助课题

*通信作者: 赵婷婷 tingtingzhaopku@gmail.com

2 OFDM 系统中的同频干扰

在一般的 OFDM 系统中,接收信号(不考虑循环前缀)经串并(P/S)变换后进行 FFT,在频域完成信道估计与均衡、解调得到软信息,最后译码输出,如图 1 中实线模块所示。

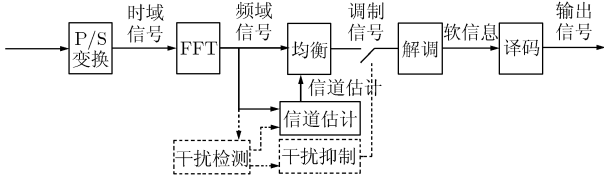


图 1 OFDM 接收机与频域干扰抑制

若系统中存在较强的 CCI,则接收端需要对窄带干扰进行有效检测和抑制。文献[9]基于 DVB-T 系统平台提出一种 CCI 频域检测与去除算法(如图 1 的虚线模块所示),利用信道频域响应的连续性对受干扰导频进行检测并对信道响应进行修正,同时对信号子载波所在频点的干扰进行门限检测和清零处理。此方法存在的问题是:(1)干扰检测均基于门限判决的思想,门限的设置必然依赖于信号功率、噪声功率、信道衰落等状况,很难确定;(2)受干扰子载波上的接收信号直接清零,在消除干扰的同时也损失了有用信号。

此外,频域干扰抑制算法的潜在问题是 OFDM 接收端的 FFT 会造成干扰能量的频域扩散。以单频干扰为例,假设干扰幅度为 A_0 ,相位为 θ_0 ,频点为 f_i ,可表示为

$$i(t) = A_0 \sin(2\pi f_i t + \theta_0) \quad (1)$$

记 OFDM 子载波个数为 N 、子载波间隔为 Δf ,归一化的干扰频点记作 $f_i / \Delta f = M + m$,其中 M 和 m 分别为整数和小数部分,接收端采样间隔为 $T_s = 1/(N\Delta f)$,则干扰信号第 n 个样点为

$$\begin{aligned} i_n &= A_0 \sin(2\pi f_i n T_s + \theta_0) \\ &= A_0 \sin(2\pi(M + m)n / N + \theta_0) \end{aligned} \quad (2)$$

经推导可以得到 OFDM 接收端 FFT 操作之后、落在第 k 个子载波上的干扰能量为

$$\begin{aligned} |I_k|^2 &= \frac{A_0^2}{4} \frac{[\sin(\pi m)]^2}{\left[\sin\left(\frac{\pi(M + m - k)}{N}\right) \right]^2} \\ &+ \frac{A_0^2}{4} \frac{[\sin(\pi m)]^2}{\left[\sin\left(\frac{\pi(M + m + k)}{N}\right) \right]^2} \\ &- \frac{A_0^2}{2} \frac{[\sin(\pi m)]^2 \cos\left(2\pi\left(m - \frac{M + m}{N}\right) + 2\theta_0\right)}{\sin\left(\frac{\pi(M + m - k)}{N}\right) \sin\left(\frac{\pi(M + m + k)}{N}\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

从式(3)可以看出:如果 $m \neq 0$,则在 $k \neq M$ 的频点

上也有 $|I_k|^2 \neq 0$,即有干扰能量扩散。采用频域的门限检测,很难有效处理干扰能量泄漏所影响的子载波。

3 基于 MMSE 准则的同频干扰去除

本文提出一种正弦建模的 CCI 时域估计与去除方法。如图 2 所示,接收机前端对干扰进行估计和重构,将本地估计结果从输入信号中减去,从而消除对系统性能的影响。

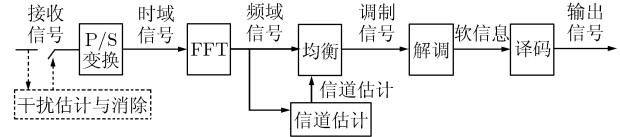


图 2 OFDM 接收机与时域干扰抑制

3.1 基本原理

以单个频点的干扰去除为例。接收信号包括 OFDM 信号 $s(t)$ 、干扰信号 $i(t)$ 和高斯噪声 $w(t)$,并且三者相互独立,记作

$$r(t) = s(t) + i(t) + w(t) \quad (4)$$

对干扰信号估计来说,OFDM 信号与高斯噪声均可以看作是背景噪声,记作

$$w_i(t) = s(t) + w(t) \quad (5)$$

则式(4)中的接收信号可以写成

$$r(t) = i(t) + w_i(t) \quad (6)$$

由接收信号构造的本地单频正弦干扰记作

$$\hat{i}(t) = \hat{A} \sin(2\pi f_i t + \hat{\theta}) \quad (7)$$

其中 \hat{A} 为幅度估计, $\hat{\theta}$ 为相位估计。可得干扰估计值与理想值的均方误差(MSE)为

$$\begin{aligned} E\left[(i(t) - \hat{i}(t))^2\right] &= E\left[i^2(t)\right] + E\left[\hat{i}^2(t)\right] - 2E\left[i(t)\hat{i}(t)\right] \\ &= E\left[A_0^2 \sin^2(2\pi f_i t + \theta_0) + \hat{A}^2 \sin^2(2\pi f_i t + \hat{\theta})\right] \\ &\quad - 2E\left[A_0 \hat{A} \sin(2\pi f_i t + \theta_0) \sin(2\pi f_i t + \hat{\theta})\right] \\ &= A_0^2 / 2 + \hat{A}^2 / 2 - A_0 \hat{A} \cos(\hat{\theta} - \theta_0) \end{aligned} \quad (8)$$

另外,输入信号与本地干扰估计值的 MSE 可以写作

$$\begin{aligned} E\left[(r(t) - \hat{i}(t))^2\right] &= E\left[i(t)^2\right] + 2E\left[i(t)w_i(t)\right] + E\left[w_i^2(t)\right] \\ &\quad - 2E\left[i(t)\hat{i}(t)\right] - 2E\left[w_i(t)\hat{i}(t)\right] + E\left[\hat{i}^2(t)\right] \\ &\approx E\left[A_0^2 \sin^2(2\pi f_i t + \theta_0)\right] + E\left[w_i^2(t)\right] \\ &\quad - 2E\left[A_0 \hat{A} \sin(2\pi f_i t + \theta_0) \sin(2\pi f_i t + \hat{\theta})\right] \\ &\quad + E\left[\hat{A}^2 \sin^2(2\pi f_i t + \hat{\theta})\right] \\ &= A_0^2 / 2 + \hat{A}^2 / 2 - A_0 \hat{A} \cos(\hat{\theta} - \theta_0) + E\left[w_i^2(t)\right] \end{aligned} \quad (9)$$

上述推导利用了 $i(t)$ 和 $w_i(t)$ 之间的独立性，同时假设 $\hat{i}(t)$ 和 $w_i(t)$ 也近似独立。由于 $s(t)$ 和 $w(t)$ 都可以看作是零均值、固定方差的高斯分布，则 $E[w_i^2(t)]$ 可以记作常数 A_{cons} ，有

$$E[(r(t) - \hat{i}(t))^2] = A_0^2 / 2 + \hat{A}^2 / 2 - A_0 \hat{A} \cos(\hat{\theta} - \theta_0) + A_{\text{cons}} \quad (10)$$

综上所述，由式(8)和式(10)，以 MSE 最小化为目标的干扰信号幅度和相位的估计可表示为

$$\{\hat{A}, \hat{\theta}\} = \min_{\{A, \theta\}} E[(i(t) - \hat{i}(t))^2] = \min_{\{A, \theta\}} E[(r(t) - \hat{i}(t))^2] \quad (11)$$

由 $\frac{\partial E[(r(t) - \hat{i}(t))^2]}{\partial A} = 0$ 和 $\frac{\partial E[(r(t) - \hat{i}(t))^2]}{\partial \theta} = 0$ 分别可得使 MSE 最小的 A_0 和 θ_0 的估计值如下：

$$\hat{\theta} = \theta_0 + 2k\pi, \quad k \in \mathbf{Z} \quad (12)$$

$$\hat{A} = A_0 \cos(\hat{\theta} - \theta_0) \quad (13)$$

可以看出：(1)相位差为 2π 的整数倍时 MSE 会有极小值，与幅度估计无关；(2)使得 MSE 极小的幅度估计值 \hat{A} 与相位估计偏差 $(\hat{\theta} - \theta_0)$ 有关，只有当相位估计无偏差时才会有 $\hat{A} = A_0$ 时 MSE 最小。基于以上分析可以得到如下结论：可以根据 MSE 最小准则估计不同频点干扰的幅度和相位；估计过程中要先进行相位估计，锁定后再进行幅度估计。

3.2 实现方法

实际系统中对离散的采样信号进行分析和处理，式(11)中的期望值可以通过有限个数的样点统计平均得到。每次估计取 L 个采样点作为样本，首先利用除当前被估计频点之外的已锁定频点的幅度和相位信息构造干扰，从输入信号中减去后再进行当前频点的干扰估计。

以第 l 次相位估计为例说明单次估计的具体流程(幅度估计的流程与之类似)，如图 3 所示。 \hat{A}_l 和 $\hat{\theta}_l$ 分别表示第 l 次幅度和相位的估计结果； $d_{\theta,l}$ 为第 l 次相位调整的步长； E_l 表示第 l 次估计的均方差； T_0 为判断收敛的门限。具体地，算法的几个关键步骤如下：

(1)通过粗调和精调逐步收敛 估计过程中调整本地信号相位 $\hat{\theta}$ ，使得均方差逐步收敛。每步计算输入信号与本地构造的干扰信号的均方差 E_l ，并与前次估计误差 E_{l-1} 比较，以调整本地相位的增减方向：若误差继续减小(即 $E_l < E_{l-1}$)说明调整方向正确，步长 $d_{\theta,l}$ 不变，否则改变调整方向(即 $d_{\theta,l} = -d_{\theta,l}$)。为了在初始估计时加快收敛速度并保证一定的稳态精度，估计过程分为粗调和精调两个阶段，两个阶段调整步长不同，分别取 $d_{\theta,0}$ 和 $d_{\theta,1}$ ，满足 $d_{\theta,0} > d_{\theta,1}$ 。

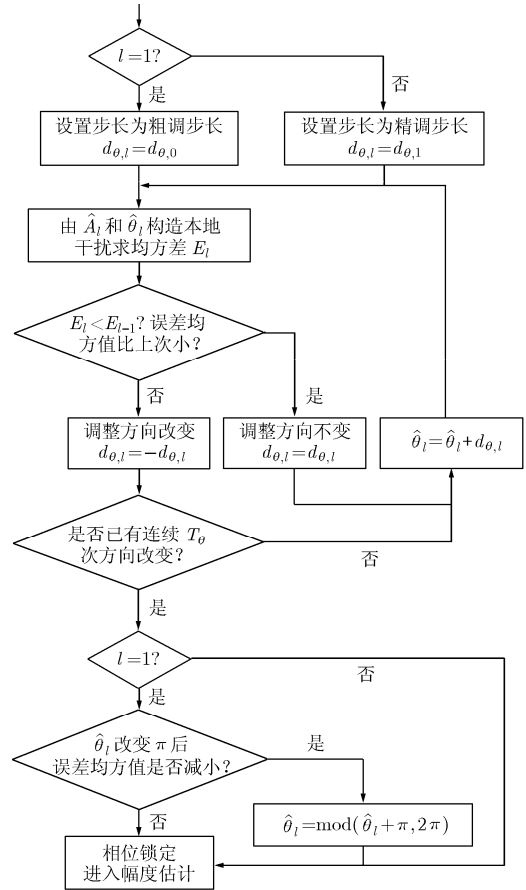


图 3 单频干扰的相位估计流程

(2)基于均方差振荡特征判断锁定 对锁定的判断，最直观的方法是利用门限比较确定均方差 E_l 是否足够小，但实际系统中门限设置通常比较复杂。观察估计过程：未收敛阶段 MSE 连续减小，调整方向也基本保持不变；在锁定附近，由于背景噪声的影响，MSE 不可能达到 0 而是在一个很小的正实数附近摆动，调整方向也会随之连续改变。本文依据 MSE 在收敛点附近的振荡来判断是否已经达到锁定：相位估计过程中若连续 T_0 次连续改变调整方向则认为相位已锁定。

(3)消除 π 的相位模糊度 在通过观察振荡次数来判断是否锁定时，由于无法保证振荡中心是在误差极大点还是误差极小点，很可能会使相位锁定在误差近似为 π 的误差最大点。因此，本文给出的方法在判断锁定后对 π 的相位模糊度进行检测：将锁定值 $\hat{\theta}$ 改变 π 后再计算 MSE，若 MSE 变小，则说明有 π 的相位误差，需要对估计结果进行修正。

4 仿真与分析

本文给出的算法在 DVB-T 系统的 Matlab 仿真平台中进行验证，选择 8 MHz 带宽，2 K 模式，1/4 循环前缀，QPSK 调制，3/4 卷积编码，发射功率归一化。考虑距中心频点 15.625 kHz 处的单个干扰，

随机相位。仿真中,每次用于干扰幅度和相位估计的采样点个数为 $L = 5000$ 。相位估计和幅度估计中的各个参数(即初始值、粗调和精调步长、判断锁定的振荡次数的门限)分别为 $\{\hat{\theta}_0 = 0, d_{\theta,0} = \pi/5, d_{\theta,1} = \pi/40, T_\theta = 4\}$ 和 $\{\hat{A}_0 = 3, d_{A,0} = 0.3, d_{A,1} = 0.1, T_A = 4\}$ 。

图 4(a)和图 4(b)分别给出加性高斯白噪声(AWGN)信道和多径信道下,单频 CCI 去除算法在固定信干比(SIR)为 0 dB、不同信噪比(SNR)条件下的比特错误概率(BER)。为了比较公平,文献[9]中给出的频域方法和本文提出的时域方法都假设干扰频点已知。仿真中,多径信道模型为 6 径瑞利衰落,时延参数为 $[0.1, 0.2, 0.5, 1.6, 2.3, 5.0]$ μs , 功率参数为 $[-3, 0, -2, -6, -8, -10]$ dB, 接收端通过基于导频的插值进行信道估计。为了验证窄带干扰对信道估计的影响,图 4(b)分别给出了干扰频点处于和不处于导频位置时的仿真结果。可以看出:即便采用文献[9]所述的方法进行信道估计修正,频域算法的

性能增益也还是较小。在给定的仿真条件下,本文提出的时域算法能够更为有效地抑制 CCI。原因在于较强的单频干扰经过 FFT 之后在频域的能量扩散严重、影响过多的子载波,对子载波信号的直接清零也造成了有用信号的损失,而时域方法可以避免上述问题的出现。

5 结束语

同频干扰(CCI)的检测与去除是宽带 OFDM 系统接收机需要解决的一个重要问题。本文针对单频模型的窄带干扰提出一种基于最小均方误差准则的 CCI 时域估计和去除方法,并在 DVB-T 系统中进行了仿真验证。这种 CCI 检测和去除方法可有效减小干扰的影响,提高系统性能。与已有方法相比,本文提出的时域干扰抑制方法能有效避免时频变换后的干扰能量泄漏,不依赖于信道估计,也减小了对子载波信息直接清零造成的损失。

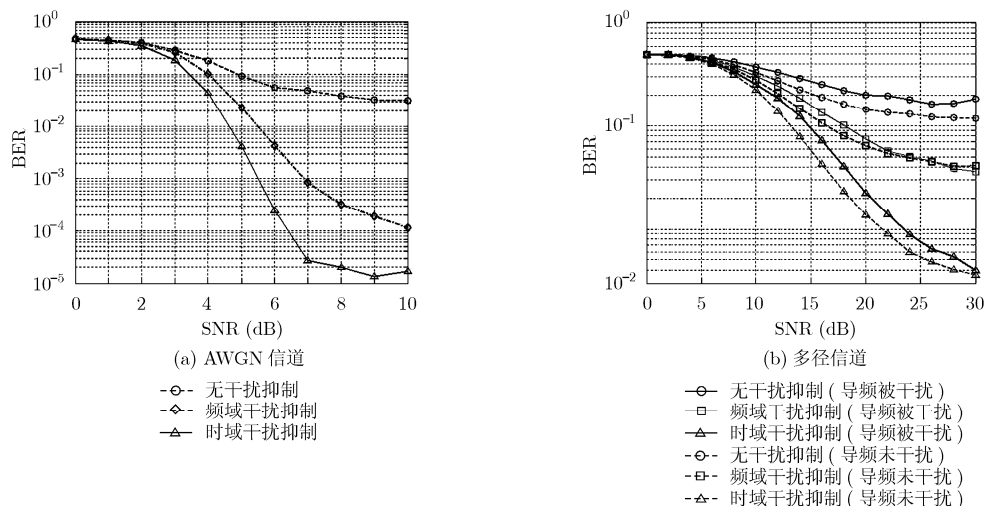


图 4 不同 SNR 下的 BER 性能

参考文献

- [1] Redfern A. Receiver window design for multicarrier communication systems [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(5): 1029-1036.
- [2] Song R F and Leung S H. A novel OFDM receiver with second order polynomial Nyquist window function [J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(5): 391-393.
- [3] Batra A and Zeidler J. Narrowband interference mitigation in OFDM systems [C]. *IEEE Military Communications Conference*, Boston, Jan. 2009: 1-7.
- [4] Combelles P, Del Toso C, Hepper D, et al. A receiver architecture conforming to the OFDM based digital video broadcasting standard for terrestrial transmission (DVB-T) [C]. *IEEE International Conference on Communications*, Atlanta, Jun. 1998: 780-785.
- [5] 张春海, 薛丽君, 张尔扬. 基于自适应多门限算法的变换域窄带干扰抑制[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(3): 461-465.
Zhang C H, Xue L J, and Zhang E Y. Narrow-band interference suppression in transform domain based on adaptive multi-threshold algorithm [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(3): 461-465.
- [6] 张爱民, 胡艳芳, 韩方景. 低信噪比下基于自适应门限的窄带干扰抑制研究[J]. *电子信息对抗技术*, 2009, 24(1): 51-54.
Zhang A M, Hu Y F, and Han F J. Research on narrowband interference suppression based on adaptive threshold under low SNR. *Electronic Information Warfare Technology*, 2009, 24(1): 51-54.

- [7] 张爱民, 龚广伟, 韩方景. 一种基于门限判决的窄带干扰抑制频域自适应算法[J]. 电子信息对抗技术, 2009, 24(4): 48-53.
Zhang A M, Gong G W, and Han F J. The adaptive algorithm of narrowband interference suppression based on threshold decision in frequency-domain [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2009, 24(4): 48-53.
- [8] Wang Y, Ge J H, Ai B, *et al.*. A soft decision decoding scheme for wireless COFDM with application to DVB-T[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 50(1): 84-88.
- [9] Zhang X X, Guo H B, and Zhao Y P. A low-complexity adaptive co-channel interference removal scheme for COFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(2): 353-358.
- [10] Velez M M, Angueira P, De La Vega D, *et al.*. DVB-T BER measurements in the presence of adjacent channel and co-channel analogue television interference [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2001, 47(1): 80-84.
- 赵婷婷: 女, 1984年生, 博士生, 研究方向为认知无线电技术、窄带干扰消除技术.
- 赵玉萍: 女, 1957年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字通信与信息系统.