

文章编号:1001-893X(2011)04-0102-04

基于梳状导频分布的 OFDM 信道估计改进算法^{*}

龚 钢,雷维嘉,谢显中

(重庆邮电大学 个人通信研究所,重庆 400065)

摘 要:提出了基于梳状导频分布的 OFDM 信道估计的改进算法,分别在基于频域(DFT)和时域(IDFT)的迫零内插算法的基础上运用了数据翻转的思想。该算法可以大大地减少 DFT/IDFT 变换时所产生的边缘效应,并且通过优化边缘位置的估计性能来提升整个 OFDM 信道估计的精确度。仿真结果表明,该算法相比经典算法在性能上有较大提升。

关键词:OFDM;信道估计;梳状导频;数据翻转;DFT/IDFT

中图分类号:TN911;TN92 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.04.022

An Improved Channel Estimation Algorithm Based on Comb-type Pilot in OFDM Systems

GONG Gang, LEI Wei-jia, XIE Xian-zhong

(Institute of Personal Communication, Chongqing University of Posts and Telecommunications,
Chongqing 400065, China)

Abstract: A new channel estimation algorithm is proposed based on comb-type pilot in OFDM systems, which employs data-flipping in the frequency or time domain interpolation based on zero-padding and DFT/IDFT. This algorithm can significantly reduce the Gibbs phenomenon caused by DFT/IDFT, so that it can improve the OFDM estimation accuracy by optimizing the interpolation accuracy of periphery. Simulation result shows that this algorithm has a better performance compared with other classic methods.

Key words: OFDM; channel estimation; comb pilot; data-flipping; DFT/IDFT

1 引 言

正交频分复用(OFDM)技术由于其高效的频谱利用率、能够有效地对抗多径干扰等多个优点近来被广泛地应用到无线通信系统中。由于在无线移动通信系统中,无线信道总是受着多径特性、时变特性和频率选择特性的影响^[1]。为了降低多径和衰落效应对系统性能的影响,就需要在接收端利用信道估计技术来跟踪信道响应的变化。因此,对 OFDM 信

道估计算法的研究已经成为了无线通信研究者们研究的热点。

信道估计的目的就是估计出信道的时域和频域响应,对接收到的数据进行校正和恢复,从而提升系统性能。就目前来说,OFDM 系统中最常用的就是基于导频辅助的信道估计算法。该类算法是利用在数据流中插入一定数量的时域和频域已知数据(导频)来进行信道估计,这样就可以通过已知点上的信道响应值来估计出整个信道的完整响应^[2]。并且根据最优导频信号的设计思想,在单天线条件下应该

^{*} 收稿日期:2011-01-10;修回日期:2011-03-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872037);国家航天“十一五”预研项目

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.60872037);The National Space 11th Five-year Plan Pre-research Project

采用等功率和等间隔的导频信号。目前,使用比较普遍的频域导频图案主要有梅花状导频和梳状导频^[1]。本文选用梳状导频图案。

目前对 DFT/IDFT 变换的迫零内插算法的研究主要有:在文献[1]给出的时域(IDFT/DFT)迫零内插算法中,提出了通过加窗的方法来补偿边缘处的误差,可是由于在频带边缘的导频数目相对比较少,仍然存在着较大的边缘误差;而文献[3]和[4]中分别提出的时域(IDFT/DFT)迫零内插算法以及频域(DFT/IDFT)迫零内插算法均没有对边缘效应进行处理。因此,本文的研究侧重点正是基于这样的基础上提出的。

本文首先对 OFDM 符号结构和梳状导频图案进行介绍,然后在此基础上对频域(DFT/IDFT)和时域(IDFT/DFT)迫零内插算法分别进行了改进,并对提出的改进算法进行了性能仿真。

2 OFDM 符号结构

在一个 OFDM 系统中,信道的冲激响应可以用下式描述^[3]:

$$h(n) = \sum_{r=0}^{R-1} h_r \exp\left(j \frac{2\pi}{N} f_{Dr} T_s n\right) \delta(\tau - \tau_r) \quad (1)$$

式中, $0 \leq n \leq N-1$, R 是总多径数, h_r 是第 r 径的复冲激响应, f_{Dr} 是第 r 径的多普勒频移, τ 为延迟变量, τ_r 是第 r 径的归一化延迟。经过信道后,接收端在 FFT 之后的信号可以用下式表示^[3]:

$$Y(k) = X(k)H(k) + I(k) + W(k) \quad (2)$$

式中, $W(k)$ 是 AWGN 时域信号的频域序列; $H(k)$ 是第 k 个子载波上的传输函数,它独立于发送信息 $X(k)$; $I(k)$ 是接收信号在第 k 个子载波上的子载波间干扰(ICI)分量,它是由多普勒频移产生的。

在假设系统已经获得了较好的同步的条件下,我们可以忽略 ICI 的影响,即 $I(k)$ 为零^[2],那么可以将 $Y(k)$ 变为

$$Y(k) = X(k)H(k) + W(k) \quad (3)$$

其等效信道模型如图 1 所示。因此,信道估计的目标就是用 Y 和已知发送的训练序列 X 估计出 H ^[3]。

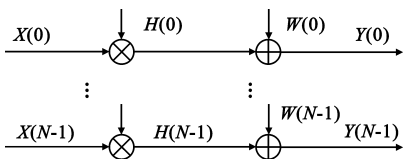


图 1 OFDM 系统的等效信道模型

Fig.1 The equivalent channel model of OFDM system

图 2 是 OFDM 符号的梳状导频分布示意图。

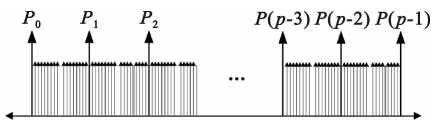


图 2 OFDM 符号的梳状导频分布示意图

Fig.2 Illustration of comb-type pilot arrangement in OFDM

如图 2 所示,我们可以很直接地看到一个基于梳状导频图案的 OFDM 符号结构。假设这个 OFDM 符号的子载波总数为 N 。在基于梳状导频分布的 OFDM 信道估计中,我们把 P 个导频信号均匀地插入到序列 $X(k)$ 中^[4],由下面等式可得出:

$$X(k) = X(mL + l) = \begin{cases} x_p(m), & l = 0 \\ \text{used data}, & l = 1, 2, \dots, L-1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $x_p(m)$ 为第 m 个导频处的导频符号; L 是导频间隔,即 $L = N/P$ 。

在本文中, P 、 p 分别代表导频符号个数、导频数目索引值, N 和 n 分别代表时域子载波总数和索引值, k 代表频域子载波索引值。我们也把 $H_p(k)$ 定义为 OFDM 符号中在导频子载波处对应的信道频域响应值,其中 $k = 0, 1, 2, \dots, P$ 。此外,下面各节的内插算法均是在基于 LS 估计算法的基础上提出的。LS 算法的表达式为

$$H_p(k) = Y_p(k)/X_p(k) \quad (5)$$

式中, $X_p(k)$ 和 $Y_p(k)$ 分别代表第 k 个子载波处的频域输入信息序列和输出信息序列。

3 基于数据翻转的 OFDM 信道估计改进算法

3.1 数据翻转处理

文献[5]中指出,DFT/IDFT 变换存在着固有的吉布斯现象,有的文献称之为边缘效应(End Effect),这种特性会严重影响 DFT/IDFT 变换的准确性。解决吉布斯现象的传统方法是采用加窗的方法,它迫使频谱图形的尾端迅速趋于零,但这种方法的缺点是会改变原来的频谱图形。而文献[5]给出的数据翻转可以在不改变频谱图形的情况下去除边缘效应。其原理很简单,就是把长度为 N 的原序列对折翻转为长度为 $2N$ 的新序列,这个翻转过程可由下式给出:

$$r_e(n) = \begin{cases} r(n), & n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ r(2N-1-n), & n = N, N+1, \dots, 2N-1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $r(n)$ 为原始序列, $r_e(n)$ 为翻转后的新序列。这种方法实际上是对原序列的对称延拓, 它等效于用于子带图像编码的对称延长方法。

3.2 对频域和时域的迫零内插算法的改进

基于 DFT 变换的时域或频域迫零内插算法实质上是利用了数字信号处理中的 DFT/IDFT 变换的一个重要性质^[6], 即分别在时域或频域序列中间补零相当于分别在对应于频域或时域序列中进行线性内插。为了减小 DFT/IDFT 变换所产生的边缘效应, 我们分别在基于时域和频域的迫零内插算法的基础上加入了数据翻转思想, 其中时域和频域 DFT/IDFT 迫零内插算法可参照文献^[2]和文献^[4], 这里只给出它们的改进算法。基于 DFT 变换的频域迫零内插算法具体处理过程如下:

(1) 首先对 $H_p(k)$ 进行数据翻转, 即:

$$\bar{H}_p(k) = \begin{cases} H_p(k), & k = PL + 1, p = 0, \dots, P - 1 \\ H_p((2P - 1)L - k + 2), & k = PL + 1, p = P, \dots, 2P - 1 \end{cases} \quad (7)$$

(2) 数据翻转得到 $2P$ 点 $\bar{H}_p(k)$ 序列, 再对其进行 $2P$ 点 DFT 变换, 即:

$$\bar{\bar{H}}_p(f) = \text{DFT}_p(\bar{H}_p(k)), f = k = 0, 1, 2, \dots, 2P - 1 \quad (8)$$

(3) 在变换域中, 先将 $\bar{\bar{H}}_p(f)$ 扩大 L 倍, 再在其中内插 $2(N - P)$ 个零, 即:

$$H_{2N}(n) = [L \times \bar{\bar{H}}_p(0 : (P - 1)) \underbrace{00 \cdots 00}_{2(N - P)} L \times \bar{\bar{H}}_p(P : 2P)] \quad (9)$$

然后再对序列 $H_{2N}(n)$ 做 $2N$ 点 IDFT 变成 $H_{2N}(k)$ 序列, 这里的 $k = 2N$ 。最后截取 $H_{2N}(k)$ 的前 N 点序列完成整个 OFDM 符号的信道估计。

另外, 对基于时域迫零内插的改进算法与上述处理过程相反, 即先进行 IDFT 变换, 插零后再进行 DFT 变换。这里面不同之处也是不需要对 IDFT 变换 $\bar{\bar{H}}_p(f)$ 序列扩大 L , 而是直接内插 $2(N - P)$ 个零。

4 仿真

本算法用 Matlab 进行仿真, 选用 M.1225 中规定的 VA 车载信道^[7]。接收端只考虑信道估计的性能, 不计其它纠错编码的影响, 因为这样更能反映出单纯由信道估计带来的改善。选择载波中心频率为 3.5 GHz、带宽为 3.5 MHz 的 16QAM - OFDM 调制系统, 采样频率为 4 MHz。

图 3 为基于 DFT 时域和频域内插算法在加数据翻转前后的不同 SNR 下的信道估计误码率性能

对比图, 图 4 为其对应的信道估计均方误差性能对比图。从两图中可以看出两种改进型算法的性能相当, 都比单纯基于频域 DFT 内插算法的性能好。在低 SNR 时, 由于 P 点 IDFT 变换滤除了 P 长度外的噪声, 传统的 DFT 内插算法仍能获得一定的性能增益; 但是在高信噪比条件下, 加性噪声已经不再是限制 OFDM 系统信道估计性能的主要原因, 这时引起信道估计误差的主要因素是有限点 DFT/IDFT 变换所带来的边缘效应, 因此当在系统的 SNR 大于 15 dB 的情况下, 两种改进算法的性能提升才变得非常明显。此外, 从仿真图中, 我们还可以看出基于数据翻转的 DFT 时域内插算法相比基于数据翻转的 DFT 频域内插算法性能提升略大一些。

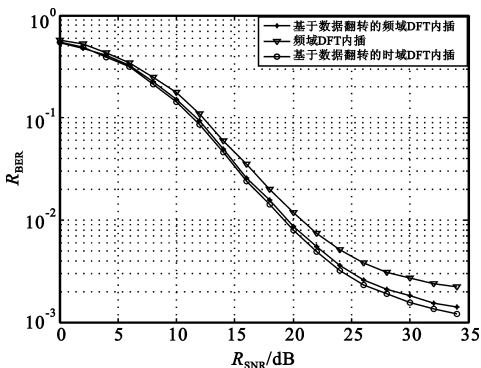


图 3 基于 DFT 时域和频域内插算法加数据翻转前后 SNR - BER 对比图
Fig.3 BER comparison of data before and after flipping

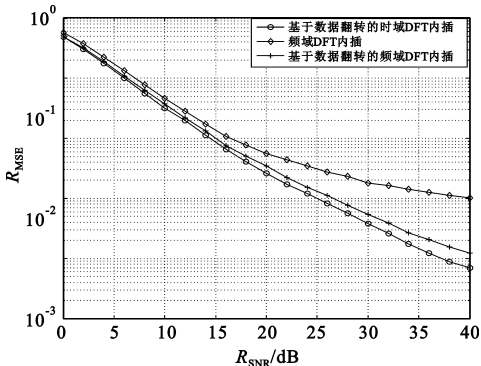


图 4 基于 DFT 时域和频域内插算法加数据翻转前后 SNR - MSE 对比图
Fig.4 MSE comparison of data before and after flipping

图 5 表示基于数据翻转的 DFT 时域内插法与理想信道估计的 SNR - BER 对比图, 从该仿真图中可以看出此种改进型算法的信道估计算法性能比较接近理想信道估计情况, 其中理想信道估计是指直接用 VA 车载信道的频域响应来做均衡。

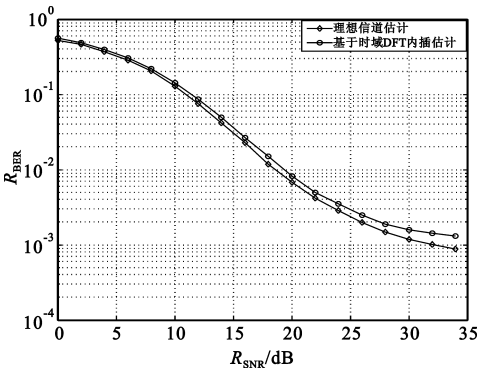


图 5 基于数据翻转的 DFT 时域内插法与理想信道估计的 SNR - BER 对比图
Fig.5 BER comparison between improved algorithm and the ideal channel estimation

图 3~5 均是对固定信道加入信噪比不同的噪声来进行算法性能对比的,即在相同的信道环境下,加入数据翻转的算法可以大大减少边缘效应,起到对边缘处的误差进行补偿的目的。

5 结 论

通过 Matlab 仿真可以看出,相比较原算法本文提出的改进算法有较大的性能改善。另外,相比较传统的线性内插、高斯内插和拉格朗日等内插算法均表现出一定的优越性。此算法更适用于时变和频率选择性衰落信道,而且复杂度不高,容易实现,因此是一种更加高效的算法。具体实现过程是:首先对非零导频子载波进行信道估计,然后再通过本文改进的插值算法获得所有数据子载波上的信道信息,从而完成整个信道估计。为了提高运算速度,上述过程中所有的 DFT/IDFT 变换都可以用 FFT/IFFT 变换来替代。在实际工程应用中,如果通信系统的导频结构是等间隔分布的,则可以直接运用本算法,大大提升其性能;如果系统的导频结构是非均匀分布的,如 WiMAX 系统,则不能直接采用本文的算法。但是由于频域上相邻子载波间的信道响应系数的强相关性,因此可以通过采用虚拟子载波的方法以及充分利用频域上相邻子载波上的信道系数可以进行线性保持处理的理论来对导频进行近似均匀的处理。通过这种简单的处理,就可以把本算法运用到该类通信系统中了。

参考文献:

[1] 王文博,郑侃. 宽带无线通信 OFDM 技术[M]. 北京:人

民邮电出版社,2003.
WANG Wen-bo, ZHENG Kan. OFDM technology for broadband wireless communications[M]. Beijing: People's Posts & Telecom Press, 2003. (in Chinese)
[2] 佟学俭,罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2003:40-70.
TONG Xue-jian, LUO Tao. The principle and application of OFDM mobile communication technology[M]. Beijing: People's Posts & Telecom Press, 2003:40-70. (in Chinese)
[3] Sinem Coleri, Mustafa Eustafa Ergen, Anuj Puri, et al. A study of channel estimation in OFDM systems[C]//Proceedings of IEEE 56th Vehicular Technology Conference. [S.l.]: IEEE, 2002:894-898.
[4] Zhao Y, Huang A. A Novel Channel Estimation Method for OFDM Mobile Communications Systems based on Pilot Signals and Transform Domain Processing[C]//Proceedings of IEEE 47th Vehicular Technology Conference. [S.l.]: IEEE, 1997: 2089-2093.
[5] Cheh Pan. Gibbs phenomenon removal and digital filtering directly through the fast Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(2):444-448.
[6] 丁玉美,高西全. 数字信号处理[M]. 2 版. 西安:西安电子科技大学出版社,2000.
DING Yu-mei, GAO Xi-quan. Digital signal processing[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2000. (in Chinese)
[7] Recommendation ITU-R M.1225, Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for MT-2000[S].

作者简介:

龚 钢(1984—),男,四川内江人,重庆邮电大学研究生,主要研究方向为无线通信技术;
GONG Gang was born in Neijiang, Sichuan Province, in 1984. He is now a graduate student. His research direction is wireless communications technology.

Email: gonggang112@126.com

雷维嘉(1965—),男,云南元谋人,博士,重庆邮电大学教授,主要从事无线通信技术、嵌入式系统的研究及开发;

LEI Wei-jia was born in Yuanmou, Yunnan Province, in 1965. He is now a professor with the Ph.D. degree. His research interests include wireless communications technology and embedded system.

谢显中(1966—),男,四川通江人,博士,重庆邮电大学教授,主要从事移动通信技术、通信信号处理和通信应用软件方面的研究、开发与教学工作。

XIE Xian-zhong was born in Tongjiang, Sichuan Province, in 1966. He is now a professor with the Ph.D. degree. His research interests include wireless communications technology and signal processing.