

文章编号: 2095-4980(2014)01-0093-04

## 高速移动信道中的 ICI 消除算法

白金波<sup>1</sup>, 陈召兵<sup>2</sup>, 王劲涛<sup>3</sup>, 杨雷<sup>4</sup>, 艾渤<sup>1</sup>

(1.北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2.海军驻北京地区通信军事代表室, 北京 100841;  
3.清华大学 电子工程系, 北京 100084; 4.东莞理工学院 电子工程学院, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 针对当前研究中的子载波干扰(ICI)消除算法不支持高速移动环境的缺点, 提出一种基于线性时变模型的 ICI 迭代消除算法。使用相邻 3 个正交频分复用(OFDM)信号帧对信道进行近似处理, 将时变的无线信道建模为基于每条信号径的线性时变信道, 信道线性时变斜率可通过相邻的导频符号获得, 这样就可以预先构造频域干扰矩阵, 然后通过循环迭代的方法将接收符号中的干扰消除。仿真结果表明, 本文提出的 ICI 迭代消除算法可有效消除高速移动信道中的 ICI。在多普勒偏移小的条件下, 此算法带来的性能提升更大。

**关键词:** 子载波干扰; 多普勒频移; 线性时变; 迭代; 高速移动

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201401.0093

## ICI cancellation algorithm for high-speed mobile channel

BAI Jin-bo<sup>1</sup>, CHEN Zhao-bing<sup>2</sup>, WANG Jin-tao<sup>3</sup>, YANG Lei<sup>4</sup>, AI Bo<sup>1</sup>

(1.School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2.Navy Military Representative Office in Beijing Area Communication, Beijing 100841, China; 3.Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4.School of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan Guangdong 523808, China)

**Abstract:** Aiming at the current Inter-Carrier Interference(ICI) cancellation algorithm cannot be applied in high-speed mobile scenario, a linear time-varying model based ICI iterative cancellation algorithm is proposed. The proposed algorithm approximately processes the channel by using three adjacent Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) signal frames. The time-varying wireless channel is modeled as a channel that every path of it is linear and time-varying, and the slope of each path can be derived from the adjacent pilot symbols. Thus the frequency-distracting matrix can be pre-constructed, and then the interference in received symbols is cancelled by loop iteration method. Simulation results show that the proposed ICI iteration algorithm can effectively eliminate the ICI in high-speed mobile channel and the performance outperforms especially under the condition of low Doppler shift.

**Key words:** Inter-Carrier Interference; Doppler shift; linear time-variable; iteration; high-speed mobile

正交频分复用(OFDM)技术能有效消除频率选择性衰落<sup>[1]</sup>, 已广泛应用于无线通信领域<sup>[2]</sup>。实际的 OFDM<sup>[3]</sup>系统, 尤其是高速移动的通信系统, 很难保证一个信号帧对应时间内的信道条件不发生变化。时变信道导致的子载波干扰(ICI), 对信号的有效传输有着不可忽略的影响<sup>[4]</sup>。为消除 ICI, 文献[5-6]提出了线性最小均方误差算法(Minimum Mean Square Error, MMSE); 文献[7]提出了部分最小均方误差算法(Partial Minimum Mean Square Error, PMMSE); 文献[8]提出了复杂度为  $O(N^3)$  的最小二成(Least Square, LS)以及串行检测(Successive Detection, SD)算法; 文献[9]基于信道在一个 OFDM 内线性变化的假设, 提出了 2 种消除 ICI 的信道估计方法。但在实际应用中, 通常子载波数  $N$  非常大, 此类方法的计算量很大。文献[10]综述了单载波和 OFDM 的均衡算法, 但没有提出适合快时变信道的算法。文献[11]提出了一种新颖的 ICI 自消除方法, 但其频谱利用率较低。本文通过迭代的方法来逐步消除 ICI, 一般通过二次迭代就能获得很好的性能, 具有复杂度低, 收敛快的特点, 在提高信道估计精确度的同时, 提高了均衡算法的性能。经仿真验证, 该算法适用于终端高速移动场景。

收稿日期: 2012-12-27; 修回日期: 2013-01-04

基金项目: 中兴通讯-北京交通大学产学研项目、北京市科技新星合作基金资助项目(xxhz201201)

## 1 系统模型

OFDM 系统中的信号帧, 由长度为  $G$  的循环前缀和长度为  $N$  的数据组成<sup>[12]</sup>, 如图 1 所示。第  $n$  个 OFDM 符号的第  $m$  个采样点的取值可表示为:

$$x_n(m) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_n(k) e^{-j\frac{2\pi km}{N}}, & m \in [-G, N-1] \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $X_n(k)$  是第  $n$  个 OFDM 符号第  $k$  个子载波上发送的信息。

经过冲击响应为  $h_n(l, m)$  的时变信道, 接收信号可以表示为:

$$y_n(m) = \sum_{l=0}^{L-1} h_n(l, m) x_n(m-l) + w_n(m) \quad (2)$$

式中:  $h_n(l, m)$  是第  $m$  个采样点处的信道冲激响应;  $w_n(m)$  是第  $m$  个采样点处的加性高斯白噪声。

经过 DFT 变换转换到频域, 接收信号表示为:

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{X}_n + \mathbf{W}_n \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{H}_n \in \mathbf{C}^{N \times N}$  表示信道的频域响应;  $\mathbf{W}_n$  是频域噪声。

由于时变信道中存在 ICI 干扰,  $\mathbf{H}_n$  不为对角阵, 可表示为:

$$\mathbf{H}_n = \mathbf{H}_n^{\text{ave}} + \mathbf{H}_n^{\text{ICI}} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{H}_n^{\text{ave}}$  是由  $\mathbf{H}_n$  对角线元素组成的对角矩阵;  $\mathbf{H}_n^{\text{ICI}}$  由  $\mathbf{H}_n$  中除对角线元素之外的其他元素组成的矩阵。

## 2 ICI 消除原理

假设 OFDM 系统的时变信道, 满足线性时变 (Linearly Time-Varying, LTV) 模型<sup>[13]</sup>, 即:

$$h_n(l, m) = h_n(l, m_0) + a_n(l)(m - m_0) \quad (5)$$

使用相邻 3 个 OFDM 信号帧对信道进行近似处理。ICI 信道估计可表示为:

$$\hat{\mathbf{H}}_n^{\text{ICI}} = \mathbf{C}_p \hat{\mathbf{A}}_{n,p} + \mathbf{C}_f \hat{\mathbf{A}}_{n,f} \quad (6)$$

式中  $\mathbf{A}_{n,p}$  和  $\mathbf{A}_{n,f}$  表征信道的时变特性, 分别为:

$$\hat{\mathbf{A}}_{n,p}(k) = \frac{\hat{\mathbf{H}}_n^{\text{ave}}(k) - \hat{\mathbf{H}}_{n-1}^{\text{ave}}(k)}{N_{\text{tot}}} \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_{n,f}(k) = \frac{\hat{\mathbf{H}}_{n+1}^{\text{ave}}(k) - \hat{\mathbf{H}}_n^{\text{ave}}(k)}{N_{\text{tot}}} \quad (8)$$

$$\mathbf{C}_p(m, n) = \begin{cases} \frac{0.5}{1 - e^{-j\frac{2\pi(n-m)}{N}}} + \frac{1 - (-1)^{n-m}}{N \left(1 - e^{-j\frac{2\pi(n-m)}{N}}\right)^2}, & m \neq n \\ \frac{1}{4} - \frac{N}{8}, & m = n \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{C}_f(m, n) = \begin{cases} \frac{0.5}{1 - e^{-j\frac{2\pi(n-m)}{N}}} - \frac{1 - (-1)^{n-m}}{N \left(1 - e^{-j\frac{2\pi(n-m)}{N}}\right)^2}, & m \neq n \\ \frac{1}{4} + \frac{N}{8}, & m = n \end{cases} \quad (10)$$

因此, 消除 ICI 后的信号可表示为:  $\mathbf{Y}_n^{\text{ICI}} = \mathbf{Y}_n - (\mathbf{C}_p \hat{\mathbf{A}}_{n,p} + \mathbf{C}_f \hat{\mathbf{A}}_{n,f}) \mathbf{X}_n$ 。

## 3 ICI 迭代消除算法

根据第 2 节介绍的 ICI 消除原理, 设计出 ICI 迭代消除算法, 如图 2 所示。该迭代算法包括下面 5 部分:

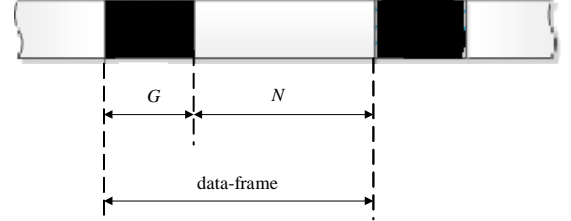


Fig.1 OFDM signal frame structure  
图 1 OFDM 信号帧结构

1) 信道估计。信道估计算法分高速算法和普通算法。普通算法复杂度较低,而高速算法适用于高速情况下,可以更好地抵制多普勒频移带来的性能损失。

2) 数据检测。使用信道估计结果对数据进行检测,判决出调制在每个子载波上的数据。

3) 迭代条件判断。若迭代终止,转 5), 否则重新组帧。

4) ICI 消除, 转 1)重新迭代。

5) 解映射, 解码等后续模块。

### 4 仿真性能

对本文提出的 ICI 迭代消除算法进行仿真验证。使用经典 Jakes 模型和 EPA 信道<sup>[14]</sup>, 观察系统在不同多普勒频率条件下的误码率情况。载波频率为 2.6 GHz, 采样速率为 30.72 MHz, 每个子帧有 30 720 个样点。

当最大多普勒频率分别为 600 Hz, 50 Hz 时, 对使用 ICI 迭代消除算法与不进行 ICI 消除的系统误码率性能进行比较, 结果如图 3 和图 4 所示。可以看出, 无论是在高多普勒频率条件还是低多普勒条件下, 本文所提 ICI 消除算法均能有效提升系统的误码率性能。使用 ICI 消除算法后, 误码率曲线斜率明显变大。特别地, 在误块率(Block Error Ratio, BLER)=0.1 点处, 采用 16QAM 或 QPSK 调制, 在最大多普勒频率为 600 Hz 时, 系统信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)增益约为 0.5 dB; 采用 16QAM 调制, 在最大多普勒频率为 50 Hz 时, 系统 SNR 增益约为 1.5 dB。

需要说明的是, 如图 3 中所示, 相比高多普勒条件, 在低多普勒频率条件下, ICI 消除算法带来的提升反而更大, 这是因为 ICI 消除的性能对信道估计的偏差非常敏感。长期演进(Long Term Evolution, LTE)系统的导频插入性质, 导致信道估计在高多普勒条件下的偏差比低多普勒条件下大, 所以 ICI 消除的效果就会变差。同样地, 在图 4 中的低信噪比环境下, 加 ICI 消除后效果稍差也是因为低信噪比时信道估计结果稍差。

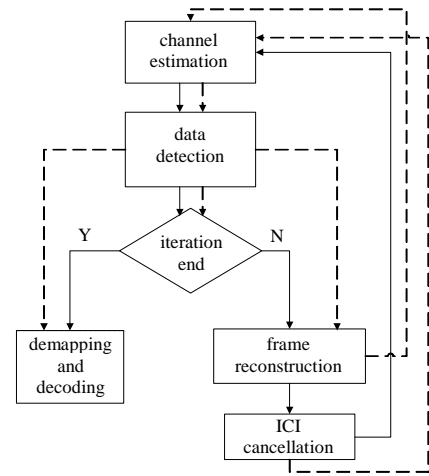


Fig.2 Flow chart of ICI iterative cancellation algorithm  
图 2 ICI 迭代消除算法流程图

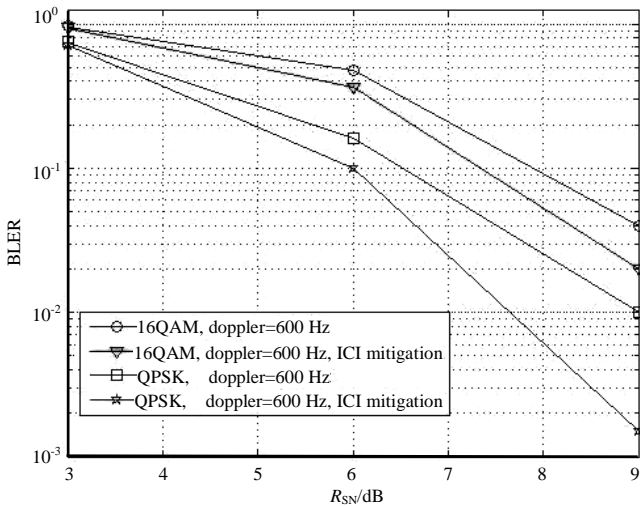


Fig.3 Maximum doppler frequency of 600 Hz  
图 3 最大多普勒频率为 600 Hz

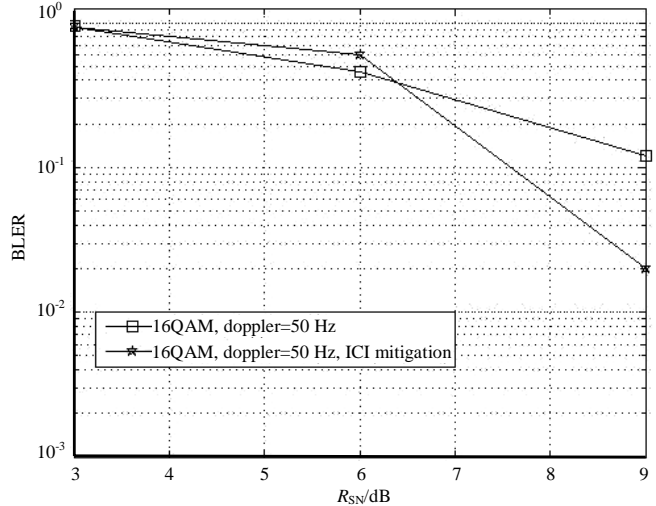


Fig.4 Maximum doppler frequency of 50 Hz  
图 4 最大多普勒频率为 50 Hz

另外, 在仿真中, 未考虑混合自动重传请求(Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ)的影响, 这是因为不同重传策略对其性能影响很大(如重传时间等), 不能从本质上反映传输系统抗信道快速时变的特性。因此, 分析仅针对基本的传输层信号处理, 考虑信道估计与均衡处理模块在高速移动环境中的表现。

### 5 结论

本文提出基于线性时变模型<sup>[9]</sup>的 ICI 迭代消除算法。根据线性时变模型, 使用相邻 3 个 OFDM 信号帧对信道

进行近似处理,设计出 ICI 迭代消除算法。对提出的算法进行仿真验证,在多普勒频移较小的条件下, BLER=0.1 点处,采用 16QAM 调制,ICI 消除算法带来的性能提升明显,系统 SNR 增益约为 1.5 dB;在多普勒频移较大的条件下,采用 16QAM 或 QPSK 调制,系统 SNR 增益约为 0.5 dB,可有效消除高速移动信道中的 ICI。

#### 参考文献:

- [1] 胡强,林飞飞,覃团发. 正交频分复用技术在协作通信下的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(2):143-147. (HU Qiang,LIN Feifei,TAN Tuanfa. Orthogonal Frequency Division Multiplexing application in collaborative communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(2):143-147.)
- [2] Taewon Hwang,Yang Chenyang,Wu Gang,et.al. OFDM and Its Wireless Application:A Survey[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009,58(4):1673-1694.
- [3] 赵海龙,张健,周劫. 下一代无线通信关键技术及其在遥测中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(1):1-6. (ZHAO Hailong,ZHANG Jian,ZHOU Jie. The Key Technology of Next Generation Wireless Communication and its Applications in the Telemetry[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(1):1-6.)
- [4] Russel M,Stuber G. Inter-channel Interference Analysis of OFDM in A Mobile Environment[C]// Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. Chicago,USA:[s.n.], 1995:820-824.
- [5] Kim S,Pottie G J. Robust OFDM in Fast Fading Channel[C]// Proceeding of IEEE Global Telecommunications Conference. San Francisco,USA:[s.n.], 2003,11:1074-1078.
- [6] 尼俊红,刘泽民. 基于 MMSE 准则的改进型并行迭代 ICI 消除算法[J]. 电路与系统学报, 2011,16(1):74-78. (NI Junhong,LIU Zemin. ParallelIterative ICI Cancellation Algorithm Based on the MMSE Criteria of Improved[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011,16(1):74-78.)
- [7] Kim Kwanghoon,Park Hyuncheol. A Low Complexity ICI Cancellation Method for High Mobility OFDM Systems[C]// Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. Melbourne,Vic:[s.n.], 2006,5:2528-2532.
- [8] Choi Y,Voltz P,Cassura F. On Channel Estimation and Detection for Multicarrier Signals in Fast and Selective Rayleigh Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2001,49(8):1375-1387.
- [9] Mostofi Y,Cox D. ICI Mitigation for Pilot-Aided OFDM Mobile Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005,4(2):765-774.
- [10] Pancaldi F,Vitetta G,Kalbasi R,et al. Single-Carrier Frequency Domain Equalization[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008,25(5):37-56.
- [11] Wen Miaowen,Cheng Xiang,Xing Wei,et al. A Novel Effective ICI Self-Cancellation Method[C]// Proceeding of IEEE Globe Communications Conference. Houston,TX,USA:[s.n.], 2011:1-5.
- [12] 汪裕民. OFDM 关键技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2007. (WANG Yumin. The Key Technology and Application for OFDM[M]. Beijing:China Machine Press, 2007.)
- [13] Kyungchul Kwak,Sungeun Lee,Hyunkee Min,et al. New OFDM Channel Estimation with Dual-ICI Cancellation in Highly Mobile Channel[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010,9(10):3155-3165.
- [14] Rappaport T S. Wireless Communications:Principles and Practice[M]. [S.l.]:Prentice Hall PTR, 1996.

#### 作者简介:



白金波(1990-),男,山东省临沂市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无线通信.  
email:baijinbovip@163.com.

陈召兵(1978-),男,湖北省天门市人,工程师,主要研究方向为综合通信系统.

王劲涛(1978-),男,河北省邯郸市人,博士生导师,从事宽带无线传输技术的研究.

杨雷(1964-),男,河南省邓州市人,教授,从事电子技术应用、测控系统方向研究.

艾渤(1974-),男,西安市人,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带无线移动通信, GSM-R,LTE-R.