

正交频分复用通信系统中减小ICI的分组共轭法

惠晓威, 陈雷, 胡廷星

(辽宁工程技术大学 信息与管理辽宁省重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125105)

(chen5051101@163.com)

摘要:以无线移动环境下的正交频分复用(OFDM)通信系统为研究对象,围绕载波间干扰(ICI)的消除进行研究。虽然一些传统的ICI消除算法能够达到一定的消除效果,但是还存在着精确性不足,缺少必要的数学分析等缺点。对比之前的ICI自消除算法,改进了系统模型,提出了一个新的有频率偏移误码率分析方法和降低OFDM数字通信系统中载波间干扰的方法,即分组共轭消除算法。分析了其得以实现的数学方法,仿真分析的结果展示了这种方法与其他方法的比特误码率(BER)性能对比。

关键词:正交频分复用;多径衰落;载波间干扰;载波频率偏移;载波间干扰消除

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A

Grouping of conjugate algorithm for ICI cancellation in OFDM

HUI Xiao-wei, CHEN Lei, HU Ting-xing

(Key Laboratory of Information and Management Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: Under the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) wireless mobile environment, the elimination of Inter-Carrier Interference (ICI) has been studied. Although some traditional ICI cancellation algorithms can achieve the elimination of certain effects, there is still a lack of accuracy and necessary mathematical analysis, etc. This paper, compared the former ICI self-cancellation algorithm, improved system model and proposed a new error rate analytical method with frequency offset and a lower ICI method in OFDM digital communication systems, which is group conjugate elimination algorithm. It also analyzed the realization of a mathematical method for this algorithm. Simulation results show the comparison of this method with other methods of Bit Error Ratio (BER) performance.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); multipath fading; Inter-Carrier Interference (ICI); carrier frequency offset; ICI cancellation

0 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术被认为是3G、4G及未来高速无线多媒体通信系统一种行之有效的方法。正交频分复用(OFDM)通信系统是将所传输的数据符号并行调制在若干个子载波上,而所有子载波间具有正交性,使之较传统的串行调制通信系统具有结构简单、频带利用率较高、抗多径衰落和脉冲噪声等很多优点。

然而所有的问题都具有两面性:正交频分复用建立在子载波之间严格正交的基础之上,任何传输过程中载波信号波形畸变均会影响子载波之间的正交性,会导致子载波之间产生干扰^[1]。多载波系统而言,频率偏差将会导致子载波之间产生干扰。OFDM系统中,要求各子载波间保持严格正交,载波的频率偏差会给系统带来非常严重的影响。因此,对频率偏差敏感是OFDM系统的主要缺点之一。

引起频率偏差的原因主要有:1)发射机和接收机之间频率同步误差引起的载波频率偏移;2)发射机或者接收机的频率不稳定引起的载波频率误差;3)接收机在高速移动过程中多普勒效应引起的接收信号频谱的扩展;4)接收机附近环境中信号反射物体的高速移动产生的多普勒效应引起的接收信号频谱的扩展等^[1-2]。

信号幅度的减小和ICI的引入是OFDM系统中载波频率偏移所造成的不利影响。如果不采取有效措施减小这种载波间干扰,将会对系统性能带来非常严重的地板效应,即无论如何增加信号的发射功率,也不能显著地改善系统的性能^[7-9]。因此,需要降低ICI。

1 改进的系统模型

对于一个具有 N 个子载波的OFDM系统,输入的二进制数据流采用适当的调制技术(M-QAM、BPSK、QPSK)进行编码,在每个OFDM周期内,由调制器得到 N 个频域符号,编码后的数据符号经过并串转换后,把接下来要进行变换的数据符号分成两组数据,见图1。第一组数据按传统的方法经过逆快速傅立叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)和插入循环前缀后,得到时域信号。对于第二组数据,我们对其在发送端进行快速傅立叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),然后插入循环前缀后,得到时域信号。这些时域信号经频率选择性衰落的无线信道送到接收端。在接收端去除循环前缀后,第一组数据经过FFT后得到频域信号,第二组数据则相对应地进行IFFT后得到频域信号,两组信号经解调后再经过多路复合器,最后经比特分配信息得到二进制比特流。

图1为本文所采用的改进的OFDM系统框图,此系统是基于加入了加性高斯白噪声的无限衰落信道进行讨论的。发

收稿日期:2010-06-21;修回日期:2010-08-17。

作者简介:惠晓威(1958-),男,辽宁沈阳人,教授,主要研究方向:现代通信、移动通信、软件无线电、图像识别、信息处理;陈雷(1984-),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向:OFDM、B3G移动通信;胡廷星(1987-),男,福建武夷山人,硕士研究生,主要研究方向:OFDM信道估计。

送端和接收端进行时频变换时分别对应地进行 IFFT 和 FFT。系统对输入比特按分配信息做串并变换映射成复信号,输入的比特决定各子信道星座图的规模。接收端根据分配信息做相应解调恢复出发送端的信息。

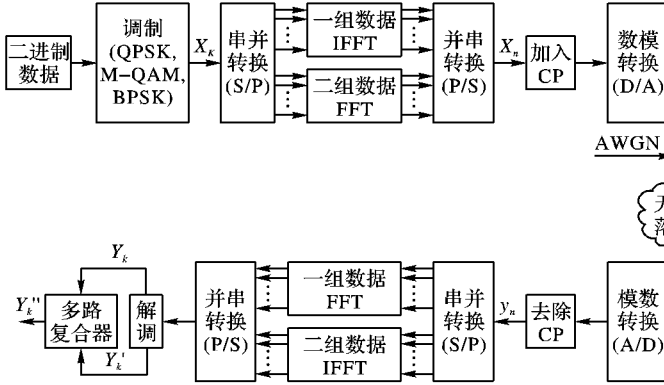


图 1 改进的 OFDM 系统框图

2 ICI 消除分组共轭算法

首先,ICI 自消除的方法是通过在发送端将一个数据符号调制到一组邻近的子载波上,各个子载波有各自的加权系数,优化加权系数使得 ICI 最小;而在接收端,用这些加权系数对这些子载波进行线性组合,使得接收信号中残余的 ICI 进一步减少^[3-6,10]。它具有不需要增加系统的其他信息和运算开销,并能够明显地降低系统 ICI 的特点;缺陷是会大大降低系统的带宽和效率。本文针对这种方法,在其基础上提出改进系统结构的新的 ICI 消除分组共轭算法。

2.1 改进算法原理及数学分析

发送端输入数据比特流采用适合的调制方式(如 QPSK, M-QAM 或 BPSK)进行编码调制,其输出数据用 x_k 表示。

而经过 IFFT 的数据 x_n 表示为:

$$x_n = \sum_{k=0}^{T-1} X_k e^{2\pi j n k / T}; n = 0, 1, 2, \dots, T-1 \quad (1)$$

其中 $T \geq 2k+1$, K 为子载波的数量, T 为 IFFT 的周期。发射端和接收端振荡器失配而产生频率偏移。通过信道接收序列 y_n 可表示为:

$$y_n = \frac{1}{T} \left[\sum_{k=0}^{T-1} X_k H_k e^{2\pi j n (k+\varepsilon)/T} \right] + W_n \quad (2)$$

其中: H_k 是 K 阶子载波信号传输函数, ε 是信道相对频率偏移, W_n 是加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN), 无线通信系统中大多数类型的噪声可用 AWGN 来表示。频率偏移在经过 IFFT 后是不变的, 而由其带来的不利影响是对于每一个子载波匹配滤波器输出信号强度的下降和给每个载体间带来了干扰, 由于 ICI, OFDM 系统的性能受到很大影响。FFT 解调后输出可表示为:

$$Y_k = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{T-1} \left\{ \sum_{k=0}^{T-1} H_k X_k e^{2\pi j n (k+\varepsilon)/T} \right\} + W_n e^{-2\pi j k n / T} \quad (3)$$

写成如下形式:

$$Y_k = (X_k H_k) \left\{ \frac{\sin \pi \varepsilon}{T \sin(\pi \varepsilon / T)} \right\} e^{j\pi(T-1)/T} + I_k \quad (4)$$

其中 X_k 受信道传输函数影响, 该过程由于频率偏移而经历振幅衰减和相位转移。 I_k 即为 ICI, 它是由发射机载波频率与接收机振荡器频率失配造成的。对比式 (3)、(4) 有:

$$I_k = \sum_{\mu=0, \mu \neq k}^{T-1} \frac{1}{T} X_\mu H_\mu \left[\frac{\sin \pi(\mu + \varepsilon - k)}{\sin \pi(\frac{\mu + \varepsilon - K}{T})} \right] e^{j\pi(T-1)(\frac{\mu + \varepsilon - K}{T})} \quad (5)$$

同上方法, 对于第二组数据我们有:

$$x'_k = \sum_{n=0}^{T-1} X_k e^{-(2\pi j n k / T)} \quad (6)$$

$$y'_k = \left[\sum_{n=0}^{T-1} X_k H_k e^{2\pi j n (-k+\varepsilon)/T} \right] + W'_n; \quad k = 0, 1, 2, \dots, T-1 \quad (7)$$

$$Y'_k = (X_k H_k) \left\{ \frac{\sin \pi \varepsilon}{T \sin(\pi \varepsilon / T)} \right\} e^{j\pi \varepsilon (T-1)/T} + I'_k \quad (8)$$

其中经过化简后的 I'_k 为:

$$I'_k = \sum_{\mu=0, \mu \neq k}^{T-1} \frac{1}{T} X_\mu H_\mu \left[\frac{\sin \pi(k + \varepsilon - \mu)}{\sin \pi(\frac{k + \varepsilon - \mu}{T})} \right] e^{j\pi(T-1)(\frac{k + \varepsilon - \mu}{T})} \quad (9)$$

W'_n 仍然是 AGWN, 一般认为无亏损。接收端输出的 ICI 为:

$$I''_k = \frac{1}{2} (I_k + I'_k) \quad (10)$$

$$I''_k = \frac{1}{2} \sum_{\mu=0}^{T-1} e^{j\pi(T-1)(\mu + \varepsilon - k)/T} X_\mu H_\mu \cdot \left\{ \left(\frac{\sin \pi(\mu + \varepsilon - k)}{\pi(\mu + \varepsilon - K)} \right) + \left(\frac{\sin \pi(k + \varepsilon - \mu)}{\pi(k + \varepsilon - \mu)} \right) \right\} \quad (11)$$

分两种情况讨论:

情况 1 假设 $\mu - k$ 为偶数, 则:

$$I''_k = -\frac{1}{2} \sum_{\mu=0}^{T-1} e^{j\pi(T-1)(\mu + \varepsilon - k)/T} X_\mu H_\mu \cdot \frac{\sin \pi \varepsilon}{\pi} \left\{ \frac{2\varepsilon}{(\mu - k)^2 - \varepsilon^2} \right\} \quad (12)$$

因为 $(\mu - k) > \varepsilon$, 上式中 ε^2 相对于 $(\mu - k)^2$ 可忽略。

$$= -\frac{1}{2} \sum_{\mu=1}^{T-1} e^{j\pi(T-1)(\mu + \varepsilon - k)/T} X_\mu H_\mu \frac{\sin \pi \varepsilon}{\pi} \left\{ \frac{\varepsilon}{\mu^2} \right\} \quad (12)$$

$$E[|I''_k|^2] = |X_\mu|^2 \sum_{\mu=1}^{T-1} E[|H_\mu|^2] \left\{ \frac{\sin \pi \varepsilon \times \varepsilon}{\pi} \right\}^2 \left\{ \frac{1}{(\mu)^2} \right\}^2 \leq |X_\mu|^2 |H_\mu|^2 \left\{ \frac{\sin \pi \varepsilon \times \varepsilon}{\pi} \right\}^2 2 \sum_{\mu=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(\mu)^2} \right\}^2 \quad (13)$$

ICI 的方差为:

$$\sigma^2 = |X_\mu|^2 |H_\mu|^2 (\sin \pi \varepsilon \times \varepsilon)^2 \times 0.2192 \quad (14)$$

情况 2 假设 $\mu - k$ 为奇数, 计算过程同情况 1, 同样有:

$$\sigma^2 = |X_\mu|^2 |H_\mu|^2 (\sin \pi \varepsilon \times \varepsilon)^2 \times 0.2192$$

经过 QPSK 调制的 OFDM 系统的误码率 (Bit Error Rate, BER) 为:

$$BER = 1/2 \times Q(x) \left(\sqrt{E_s/N_0} \right) \quad (15)$$

以上的 BER 经过 ICI 消除后的表达式为:

$$BER = 1/2 \times Q(x) \cdot$$

$$\sqrt{\frac{\frac{E_b}{N_0} \{ (\sin \pi \varepsilon) / \pi \varepsilon \}^2}{1 + \frac{E_b}{N_0} (\sin \pi \varepsilon \times \varepsilon)^2 \times 0.2192}} \quad (16)$$

2.2 仿真结果与分析

为验证所提算法的适应性, 本文采用计算机仿真的方法来分析本文算法的信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 和对整个系统 BER 性能的影响, 仿真中还会与传统的不进行 ICI 消除的 OFDM 系统和加入了 ICI 的消除算法的 OFDM 系统^[3-5] 的 BER 性能作对比。

仿真的 OFDM 系统具体条件如下: 信号带宽为 1 MHz; FFT 运算点数为 64; 子载波数为 64; 信道选择为带有常数频

偏的 AWGN 信道;分别考虑在 QPSK、16QAM、64QAM、BPSK 四种调制方式下 OFDM 系统的 BER 性能,并对比分析,以证明所提算法的有效性。

考虑加入 AWGN 的多径衰落信道下 OFDM 信号的 BER 性能曲线,图2给出了在 QPSK 调制方式下,当 $T = 64$,频率偏移 ε 分别为 0.2、0.3 时,传统的不加 ICI 消除算法,加入自消除算法及本文算法的 BER 性能对比,SNR 范围从 0 dB 到 10 dB。从图中可以看出,当频偏为 0.3 时,SNR 从 0 dB 到 10 dB 过程中,随着信号 SNR 的不断增加,OFDM 系统的 BER 性能逐渐减弱。本文所提算法明显优于 ICI 自消除算法和传统不加算法的 OFDM 系统。频偏为 0.2 时亦是如此,且相同条件下,频偏越小,BER 性能越好。

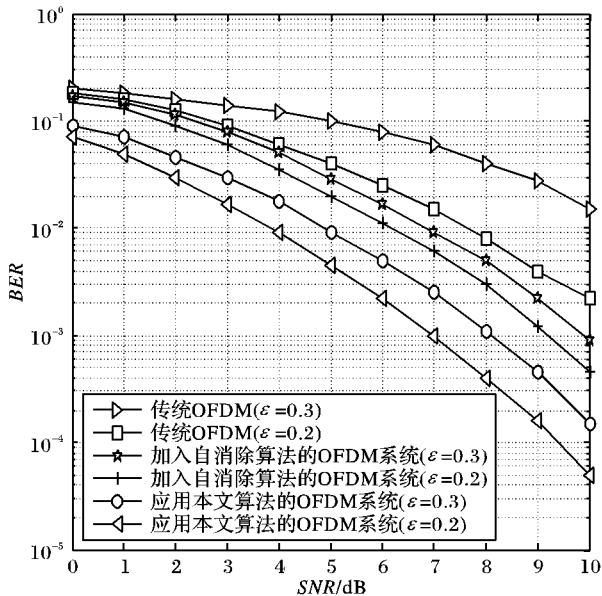


图2 QPSK 调制, ε 分别为 0.2、0.3 时,各方法的 BER 性能曲线

图3给出了在 16QAM 调制方式下,当 $T = 64$,频率偏移 ε 为 0.3 时,传统的不加 ICI 消除算法,加入自消除算法以及本文提出的消除 ICI 的分组共轭法的 BER 性能对比,SNR 范围从 0 dB 到 10 dB。从图中可以看出本文算法性能比传统的自消除算法性能优越。

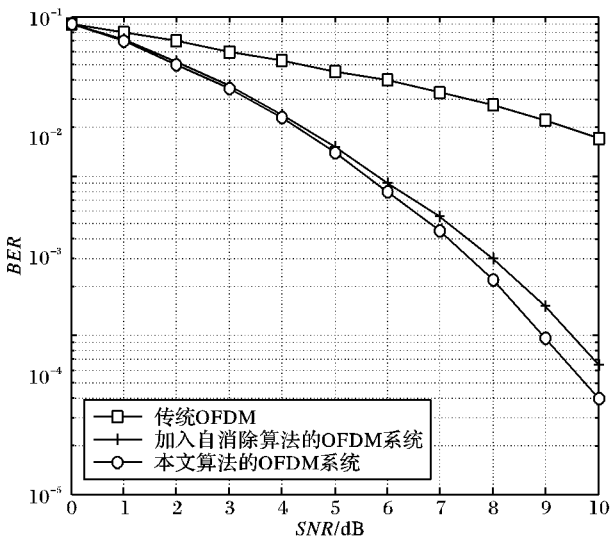


图3 16QAM 调制, ε 为 0.3 时的 BER 性能曲线

图4给出了分别在 QPSK、16QAM、64QAM、BPSK 四种调制方式下,当 $T = 64$,频率偏移 ε 为 0.3 时,本文所提算法的 OFDM 系统的 BER 性能的对比。为方便对比,同样 SNR 范围从 0 dB 到 10 dB。

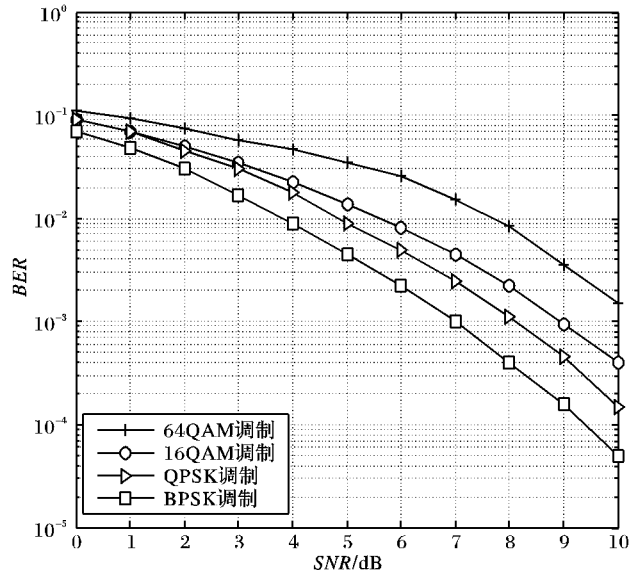


图4 ε 为 0.3 时,本文算法在四种调制方式下的 BER 性能曲线

综合以上实验场景进行分析,对比图2~4,可以得到本文算法在 16QAM 调制方式下的不同频偏时的适应性,进而通过图4中的比较关系可知本文算法在 64QAM、BPSK 调制方式下不同频偏等条件下也是适应的,从而表明了本文算法的良好适应性。

3 结语

本文针对 OFDM 信号如何更好地消除 ICI,提出了分组共轭消除的概念,主要针对之前的自消除算法进行优化与数学验证。即对发送端调制后的信号进行频域变换时在常规的 IFFT 基础上引入 FFT 数据块,接收端相应的进行 IFFT,在输出端将两组不同的数据进行组合,以形成新的 ICI 消除方案。仿真结果表明,本算法误码率性能明显优于之前的自消除算法,复杂性相当,适用于时变的无线通信系统中,有效地减小了频率偏移对 OFDM 系统性能的影响,提高了通信质量。

参考文献:

- [1] LI Y, CIMINI L J, Jr. Inter channel interference of OFDM in mobile radio channels [C]// GLOBECOM '00: Global Telecommunications Conference. Washington, DC: IEEE, 2000: 706-710.
- [2] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [3] ZHAO Y, HAGGMAN S G. Inter carrier interference self-cancellation scheme for OFDM mobile communication systems [J]. IEEE Transactions on Communication, 2001, 49(7): 1185-1190.
- [4] YU F, KO C C. Theoretical BER analysis of OFDM system with ICI self-cancellation [C]// The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Washington, DC: IEEE, 2002: 991-994.
- [5] YEH H G, CHANG Y K. A conjugate operation for mitigating inter-carrier interference of OFDM systems [C]// VTC2004-Fall: 2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference. Washington, DC: IEEE, 2004, 6: 3965-3969.
- [6] SALZ J, WEINSTEIN S B. Fourier transform communication system [C]// The ACM Conference on Computer and Communication. New York: ACM, 1999: 18-19.
- [7] 曹志刚, 钱亚生. 现代通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [8] JING YUAN, YIN FULIANG, CHEN ZHE. An H-infinity filter based approach to combat inter-carrier interference for OFDM systems [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(6): 453-455.
- [9] 李丰林. 用 FFT 实现 OFDM 的调制解调[J]. 淮海工学院学报, 2001, 10(3): 15-17.
- [10] 秦文, 彭启琮. OFDM 系统中基于符号变换的 ICI 自消除改进方法[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(5): 641-644.