

文章编号:1001-9081(2010)04-0865-03

基于小波包变换多载波调制通信系统的均衡算法

孙 懿,郝久玉

(天津大学 电子信息工程学院,天津 300072)

(sunyi80628@gmail.com)

摘 要:对于在复杂的移动传输环境中传送高速的数据流,小波包多载波调制通信系统在数据传输过程中仍然不可避免地存在着由于多径效应引起的符号间干扰。在对多径瑞利信道的建模基础上分析了小波包多载波调制系统在瑞利信道下的系统性能。同时,通过引入强迫归零方法,提出一种对时域信道冲激响应估计下的强迫归零均衡算法。该算法简单且易于实现,不增加任何系统复杂度。仿真结果表明系统在多径瑞利信道下的性能得到了有效提高,证明了该方案的可行性和在高速数据传输领域及未来移动通信中具有良好的应用前景。

关键词:小波包变换;多载波调制;均衡;信道估计;衰落信道

中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A

Equalization algorithm of wavelet packet transform-based multicarrier modulation communication system

SUN Yi, HAO Jiu-yu

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For transmitting high-speed data stream in complicated mobile transmission environment, intersymbol interference inevitably exists as a result of multipath effect in the course of the data transmission in wavelet packet transform-based multicarrier modulation communication system. On the basis of the establishment of multipath Rayleigh fading channel model, the authors analyzed the system performance in Rayleigh fading channels. At the same time, by introducing the zero-forcing method, an equalization algorithm of zero-forcing was proposed, which was based on time-domain channel estimation of wavelet packet transform-based multicarrier modulation. The proposed algorithm is simple and easy; moreover, the system complexity does not increase. The simulation result indicates that the performance of communication system is enhanced effectively in the multipath Rayleigh fading channel. The research validates the feasibility of the proposed scheme, which has a bright application prospect in the fields of high-speed data transmission and future mobile communication.

Key words: wavelet packet transform; multicarrier modulation; equalization; channel estimation; fading channel

0 引言

基于小波包变换的多载波调制是采用小波包函数作为子载波的一种新型多载波调制技术,以小波包函数作为基带信号波形具有优良的抗信道间干扰(Inter-Carrier Interference, ICI)能力和抗符号间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)能力^[1]。但对于在复杂的移动传输环境中传送高速的数据流来说,传输过程中仍然不可避免地存在着由于多径效应引起的符号间干扰。均衡是通信系统中常采用的消除或减少码间串扰的技术,在小波包多载波调制系统中均衡技术同样可以起到抗符号间干扰的作用。由于小波包多载波调制自身的优良特性和它在时域与频域的自对偶性,小波包多载波调制系统中的均衡技术可以更为简化,计算量也较小。

目前,很多理论研究是建立在加性高斯白噪声信道模型基础上的,虽然小波包多载波系统本身具有良好的抗相邻信道间干扰和符号间串扰的性能,且高斯信道又可考虑信道间干扰,这使得小波包多载波调制系统即使不采取均衡等抗

乘性噪声的措施也可以在高斯信道下具有较好的特性^[2],但是对于复杂的移动传输环境,在不采取任何抗干扰措施的情况下很难得到较好的系统性能。另外,对于已经得到广泛研究的另一种多载波系统——正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术,虽然它与小波包多载波调制系统有许多相似之处,但是在 OFDM 系统中采用的均衡方法或者利用了 OFDM 数据流的保护间隔和循环前缀,或者采用盲信道估计的均衡方法,这些算法较为复杂,且运算量大^[3-8],显然这些应用于 OFDM 系统的均衡算法不适合具有优良抗干扰特性的小波包多载波调制系统。

本文在分析了小波包多载波调制在瑞利(Rayleigh)信道下的系统性能的基础上,引入了强迫归零方法。通过系统仿真分析,该方法可以有效地移入小波包多载波调制系统中,并提出了一种对时域信道冲激响应估计下的强迫归零均衡算法。该算法有效地消除了多径效应引起的符号间干扰,抑制了由于复杂传输环境引起的噪声,同时其运算量小,易于实现。

收稿日期:2009-10-30;修回日期:2009-12-14。

基金项目:天津市科技攻关培育基金资助项目(043102911);天津市自然科学基金资助项目(043600611)。

作者简介:孙懿(1980-),男,天津人,博士研究生,主要研究方向:第四代移动通信新技术、神经网络;郝久玉(1945-),男,天津蓟县人,教授,博士生导师,主要研究方向:第四代移动通信新技术、模糊控制、智能控制。

1 系统在瑞利信道下的性能分析

基于小波包变换的多载波调制系统的基本结构如图1所示^[9]。

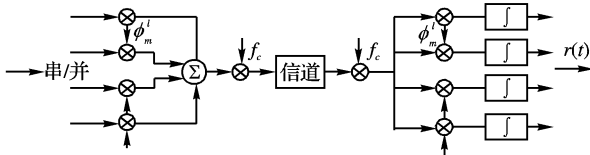


图1 小波包多载波调制系统结构

在移动无线信道中,信号经过时变多径信道传输,会产生时间选择性衰落和频率选择性衰落。对于小波包多载波调制系统,当子载波的路数较多,符号周期较大,与信道相比较可以将信道看成是平坦慢衰落的,这时可以看成信号经历的是满足 Rayleigh 分布的小尺度衰落。则接收信号可以表示为:

$$r(t) = s(t)ray(t) + n(t) \quad (1)$$

其中: $s(t)$ 代表传输; $n(t)$ 代表加性高斯噪声; $ray(t)$ 代表平坦慢衰落的 Rayleigh 信道引入的乘性噪声。

当信道的多径时延接近或超过系统的符号周期时,将会引起频率选择性衰落,这将导致传输信号之间产生码间串扰。在这里我们采用两径信道模型,对于频率选择性衰落信道,接收信号为:

$$r(t) = \alpha_0 ray_0(t)s(t) + \alpha_1 ray_1(t)s(t - \tau) + n(t) \quad (2)$$

为了比较在不同的传输环境中系统的性能,在 Matlab 环境中,分别仿真了系统在高斯信道(AWGN)、平坦慢衰落信道(Flat fading channel)和两径频率选择性信道(Multipath fading channel)的系统性能。图2为小波包多载波调制系统在不同的信道下的性能比较。如图2所示,即使在只有两径的情况下系统的性能也有降低,误码率达到0.1以上,这说明对于小波包多载波调制系统来说,当系统经历多径衰落的频率选择性信道时,必须采取一定的方法来克服由于多径衰落引起的符号间串扰才能保证系统的性能。

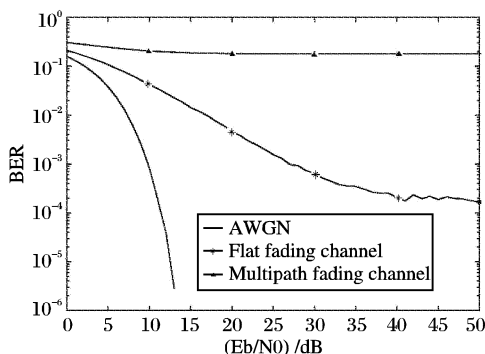


图2 不同信道中系统的性能比较

2 时域信道估计与均衡算法

对小波包多载波调制系统调制后的等效基带信号进行采样,假设采样后的信号为 $d_T = \{d_T[k]\}_k$,则: $d_T = \mathbf{W}^T \mathbf{c}$,其中 \mathbf{c} 为数据源经数据映射和串并变换后的 k 维符号,要经过 k 路子载波进行传输。 \mathbf{W} 为 $k \times k$ 阶的小波包变换矩阵, \mathbf{W}^T 为小波包逆变换矩阵,因此有 $\mathbf{W}\mathbf{W}^T = \mathbf{I}$ 其中, \mathbf{I} 为单位矩阵。为了讨论系统中因为多径效应引起的码间串扰问题,需要分析具有码间

干扰的带限信道,采用具有码间串扰和加性高斯白噪声的离散时间信道模型,如图3所示。

设 d_k 为输入信道的数据流, z_k 为加性高斯白噪声序列, y_k 为通过信道后的信号。则通过信道后的时域离散信号为:

$$y_T = d_T \otimes h_T + z_T \quad (3)$$

其中, $z_T \sim (0, \sigma^2 \mathbf{I})$ 对应加性噪声,服从协方差矩阵为 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 的复高斯过程。假设多径信道的衰落过程是慢变的, $h_T = [h_T[0], h_T[1], \dots, h_T[L-1], 0, 0, \dots, 0]$ 是 k 维有 L 个非零元素的向量,代表信道的时域冲激响应。

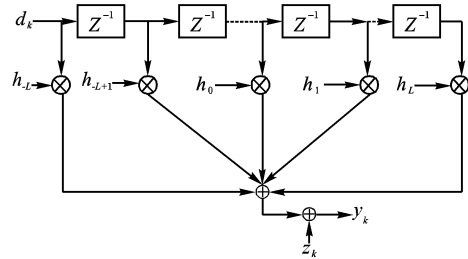


图3 码间串扰和高斯白噪声并存的离散时间信道模型

为了获得 h_T 以作为信道均衡的依据,在调制后的信号的每一帧中插入一种特殊结构的导频。假设只考虑导频的一个单元: $P_i = [1, 0, \dots, 0]$,当 P_i 与信道的冲激响应作卷积时,截取卷积后的前 L 个元素(L 个元素后都为零,可以不予考虑),则有: $\hat{h}_T = P_i \otimes h_T$,再将导频符号的各个单元的估计取平均就得到了较为准确的信道的时域冲激响应的估计值。即:

$$\hat{h}_T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{h}_{T_i} \quad (4)$$

在得到小波包多载波调制系统的离散时域信道的估计后就可以对系统进行均衡。

在均衡中最经常使用的滤波器是横向滤波器,其结构如图4所示。

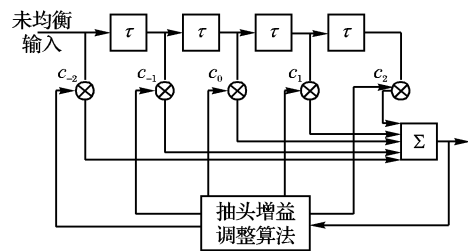


图4 滤波器结构

设均衡器的输入为如式(3)所示的序列 y_T ,假设均衡后的输出为 y_T' ,则第 k 个符号的估计可以写作:

$$\hat{y}_k' = \sum_{j=-K}^K c_j y_{k-j} \quad (5)$$

其中 $\{c_j\}$ 是滤波器的 $2K+1$ 个复值抽头权系数。估计值 \hat{y}_k' 量化到最接近的那个线性符号,并形成一决策量 \hat{y}_k ,若 \hat{y}_k 与发射的符号 d_T 不相等,则存在决策误差。为了使决策误差最小采用基于最大失真准则的线性均衡器,即强迫归零(Zero Forcing, ZF)均衡器。最大失真直接定义为均衡器输出端的最大码间干扰,这一性能指标的最小化叫作最大失真准则。首先考虑具有无穷多抽头的均衡器的情况。具有冲激响应 $\{h_k\}$ 的离散时间线性模型和具有冲激响应 $\{c_k\}$ 的均衡器的级联可

以用一个等效滤波器表示,该滤波器的冲激响应等于 $\{h_k\}$ 和 $\{c_k\}$ 的卷积,即: $q_n = \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j h_{n-j}$,均衡器也假定具有无穷多个抽头,为了方便,设 $q_0 = 1$ 。将式(3)和(5)代入上式,得到均衡器在采样时刻 k 的输出为:

$$\hat{d}_k = d_k + \sum_{n \neq k} d_n q_{k-n} + \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j z_{k-j} \quad (6)$$

其中,第一项表示期望检测的符号 d_k ,第二项为码间串扰。这一码间干扰的最大值叫作最大失真,即有:

$$D(c) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |q_k| = \sum_{n=-\infty, n \neq 0}^{\infty} \left| \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j h_{n-j} \right| \quad (7)$$

显然,在理想情况下,应该选择 $D(c) = 0$ 即 $q_0 = 1$,且 $q_n = 0$, $\forall n \neq 0$,即

$$q_n = \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j h_{n-j} = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

对上式Z变换有 $Q(z) = C(z)H(z) = 1$,即有:

$$C(z) = 1/(H(z))。$$

其中: $C(z)$ 表示 $\{c_j\}$ 的Z变换。这表明,具有传输函数 $C(z)$ 的均衡器直接是线性滤波器模型 $H(z)$ 的逆滤波。换言之,码间干扰的完全对消需要使用 $H(z)$ 的逆滤波器即均衡器 $C(z)$ 。由于这一条件是利用式(8)得到的,而式(8)为零条件,即迫使ISI在采样瞬间为零,从而有效地消除了多径效应引起的ISI。

3 仿真结果

仿真参数如下:子载波路数 $N = 64$;载波频率 $f_c = 900$ MHz;信道带宽 $W = 5$ MHz;子信道带宽 $\Delta f = W/N = 78.125$ KHz;符号宽度 $T_s = 1/\Delta f = 12.8 \mu s$;小波包基函数为db4;最大多普勒频移 $f_m = 60$ Hz。信道参数:径数 $L = 4$,等功率衰减幅度;延迟时间 $\tau_i = i/(K\Delta f)$, $i = 0, 1, 2, 3$ 。

仿真中所采用的信道模型是典型的clark模型,算法通过对估计得到的信道时域冲激响应对系统采取逆滤波,即假设得: $\hat{h}_T = [\hat{h}_0, \hat{h}_1, \hat{h}_2, \hat{h}_3]$,则 $H(z) = \hat{h}_0 + \hat{h}_1 z^{-1} + \hat{h}_2 z^{-2} + \hat{h}_3 z^{-3}$,所以均衡器的传输函数为: $C(z) = 1/(H(z)) = 1/(\hat{h}_0 + \hat{h}_1 z^{-1} + \hat{h}_2 z^{-2} + \hat{h}_3 z^{-3})$ 。采用多项式的长除法就可以得到ZF均衡器的各个抽头增益。图5是采用ZF均衡器对小波包多载波调制系统进行均衡的信噪比和误码率的性能图。

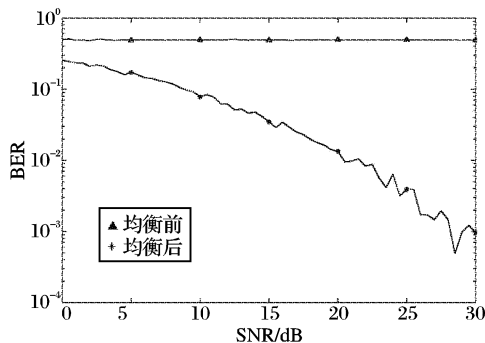


图5 系统均衡前后的性能比较

通过仿真实验可以看出,系统在均衡前由于多径引起的符号间干扰性能较差,误码率接近0.5,均衡后系统的性能得

到有效改善。由此可见均衡可以有效地克服多径效应引起的频率选择性衰落,使得小波包多载波调制系统的性能大大提高。同时系统采用的这种均衡算法并不复杂,这也正体现了小波包多载波调制系统本身的优越性。

4 结语

本文在对多径瑞利信道的建模基础上分析了小波包多载波调制系统在瑞利信道下的系统性能,同时通过引入强迫归零方法,提出一种对时域信道冲激响应估计下的强迫归零均衡算法,以提高小波包多载波调制系统在多径瑞利信道下的性能。结果表明,采用该方法有效地提高了小波包多载波调制系统的性能。该均衡算法计算量小,且易于实现,在高速数据传输领域及未来移动通信中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] LINDSEY A R. Wavelet packet modulation for orthogonally multiplexed communication [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(5): 1336 - 1339.
- [2] MANGLANI M J, BELL A E. Wavelet modulation performance in Gaussian and Rayleigh fading channels[C]// MILCOM 2001: Military Communications Conference. McLean: IEEE, 2001: 845 - 849.
- [3] 刘谦雷,杨绿溪. 单载波频域均衡与多载波 OFDM 误码性能的理论比较[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(3): 411 - 414.
- [4] QU DAI-MING, ZHU GUANG-XI, CHEN ZHONG-LIN. Low complexity LMMSE turbo equalization for linearly precoded OFDM[C]// The 14 th IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication Proceedings. Helsinki: IEEE, 2003: 819 - 823.
- [5] ZHOU S, WANG Z, BAPAT N, et al. Turbo decoding of error control coded and unitary precoded OFDM[C]// IEEE VTC 2002. Birmingham: Springer, 2002, 3: 1237 - 1241.
- [6] CHOI Y S, VOLTZ P J, CASSARA F A. 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.
- [7] CHEN SHAO-PING, DAI GUANG-FA, YEN TIAN-REN. Zero-forcing equalization for OFDM systems over doubly-selective fading channels using frequency domain redundancy[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(4): 1004 - 1008.
- [8] JEON W G, CHANG K H, CHO Y S. A equalization technique for orthogonal frequency-division multiplexing systems in time-variant multipath channel [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(1): 27 - 32.
- [9] 郝久玉,王可,王小梅,等. 基于小波包变换的多载波通信系统的实现[J]. 天津大学学报, 2007, 40(1): 24 - 27.
- [10] ZHOU L, LI J, LI F, et al. OWDM system based on ML algorithm and blind identification in multipath fading channel[J]. IEEE Electronics Letters, 2004, 40(2): 749 - 750.