

地空数据传输系统中单载波频域预均衡技术

王宁, 郭英, 张坤峰, 张波, 侯文林, 李红光

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 在频率选择性瑞利慢衰落信道条件下,提出了一种适用于地空传输系统上行链路的单载波频域预均衡方法。在此基础上设计了预均衡系统模型,地面端将下行链路中的导频信号与本地导频信号对比进行信道状态估计,利用获得的信道状态信息对上行链路信号进行预均衡处理,然后在机载接收端对上行链路信号进行再均衡。基于迫零准则和最小均方误差准则,分析了该方法的信号处理流程,计算得到预均衡系数。通过仿真实验,对比分析了不同均衡方案的误码性能,结果表明:单独在地面发送端进行预均衡,会出现误码率平台效应;而预均衡之后在机载接收端进行再均衡的方法,在误码率为 10^{-5} 的情况下,与采用线性均衡结构的传统单载波频域均衡方法相比有2~3 dB的性能增益。

关键词 单载波频域均衡;预均衡;地空信道

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.017

中图分类号 TN911.5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0066-05

A Method of Single Carrier Frequency Domain Pre-equalization in Ground-to-air Data Transmission System

WANG Ning, GUO Ying, ZHANG Kun-feng, ZHANG Bo, HOU Wen-lin, LI Hong-guang
(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In this paper, a method of single carrier frequency domain pre-equalization suitable for air-ground communication system uplink is brought forward under the condition of frequency-selective Rayleigh slow fading channel. A model of pre-equalization system is designed on the basis of this method. In the model, the downlink pilot signal is compared with the local one to perform channel condition estimation on ground station, and then the pre-equalization of uplink signal is processed by utilizing the acquired channel condition information. Finally, the uplink signal equalization is conducted on airborne receiver. The signal processing procedures of the method are analyzed and the coefficient of the pre-equalization are obtained based on zero-forcing criterion and minimum mean square criterion. By comparing the BER performance of different equalization schemes, the simulation results show that the error-floor effects will arise when pre-equalization is implemented only on ground transmitter; whereas, when bit error rate is 10^{-5} , a 2 to 3 dB gain in performance is expected by the equalization made again on airborne receiver after ground pre-equalization in comparison with the former single carrier frequency equalization method with a linear equalization structure.

收稿日期: 2014-02-27

基金项目: 通信网信息传输与分发技术重点实验室基金资助项目(ITD-U12003/K1260009)

作者简介: 王宁(1989-),男,陕西榆林人,硕士生,主要从事地空通信及其信号处理技术研究. E-mail: dwight-wang@163.com

引用格式: 王宁,郭英,张坤峰,等. 地空数据传输系统中单载波频域预均衡技术[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(5):66-70. WANG Ning, GUO Ying, ZHANG Kunfeng, et al. A method of single carrier frequency domain pre-equalization in ground-to-air data transmission system[J]. Journal of air force engineering university; natural science edition, 2014, 15(5): 66-70.

Key words: single carrier frequency domain equalization; pre-equalization; ground-air channel

随着地空通信系统对高速数传的需求日益迫切,具备较高的数据传输能力已经是必须的要求。单载波频域均衡技术(SC-FDE)采用常规的单载波传输方式以及多载波系统的信号处理方法,能够有效地提高传输速率,同时可避免多载波峰平比(PAPR)高、对频偏敏感等缺陷^[1],近年来已经受到了广泛关注。

文献[1~2]均是采用线性均衡的结构,其结构原理简单,计算复杂度较低,但其缺点是误码性能较差,对于数据传输系统而言该缺点是致命的;文献[3~4]中研究的盲均衡方法主要是利用接收信号的互相关以及繁琐的矩阵变换得到信道估计从而进行盲均衡,增加了收端处理的运算复杂度且误码性能也较差。文献[5~6]采用的是一种跨时、频域的判决反馈均衡结构,以此来消除频率选择性衰落信道噪声增强效应,其理论误码性能较与性均衡结构相比效果更好,但是实际上由于误差扩散的作用,最后方法本身对误码性能的提升又被误差扩散抵消^[7],而且其结构复杂,计算量较大,应用于机载设备并不合适。文献[8~10]介绍了预均衡技术,若信道为慢衰落信道,发送端利用已知的信道信息,在发送数据前对数据进行预处理,可在一定程度上消除信道畸变的影响。

基于此,本文针对慢衰落信道的地空数据传输系统上行链路,提出了采用单载波频域预均衡方法,该方法有 2 种方案:一种是单独在地面发送端进行预均衡,另一种是在地面发送端进行预均衡处理,机载接收端进行再均衡的处理。

1 SC-FDE 原理

基本的单载波频域均衡系统结构框图见图 1。信号处理流程:输入信号通过 QPSK 映射后插入长度为 N_g 的循环前缀,形成长度为 N 的符号(数据块),然后插入用于信道估计的导频,将其调制后送入信道;在接收端解调同步后,提取导频用于信道估计,对每个传输符号去掉循环前缀后将其变换到频域进行均衡,之后再恢复到时域进行解映射,判决后就得到了传输的信息。

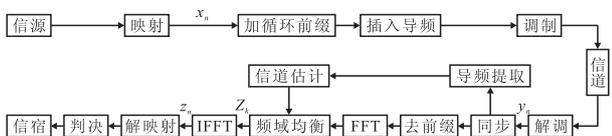


图 1 单载波频域均衡系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of SC-FDE system structure

数学描述:设每 N 个映射后的码元 x_n 组成一个传输符号,假设发送信号 x_n 的平均功率为 P ,信道冲击响应为 $h(n)$,接收到的信号为 y_n ,则:

$$y_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_n h(n-k) + v_n, n=0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

式中 v_n 是加性高斯白噪声,且 $E\{v_n\}=0, D\{v_n\}=\sigma^2$ 。经过 FFT 变换到频域后, Y_k 可表示为:

$$Y_k = X_k H_k + V_k, k=0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

其中, H_k 为信道频域响应, V_k 为噪声的频谱。频域均衡后得到 Z_k , 则:

$$Z_k = W_k X_k H_k + W_k V_k, k=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

式中 W_k 为频域均衡系数,经过 IFFT 变换后的信号为:

$$z_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W_k X_k H_k e^{j\frac{2\pi}{N}kn} + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W_k V_k e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, n=0,1,\dots,N-1 \quad (4)$$

若采用迫零(Zero Forcing, ZF) 准则进行均衡:

$$W_k = H_k^{-1} \quad (5)$$

采用最小均方误差准则 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 进行均衡:

$$W_k = \frac{H_k^*}{H_k H_k^* + \sigma^2/P} \quad (6)$$

2 SC - FDE 预均衡

在常规单载波频域均衡系统中,通常在发送的数据帧前加入导频用作信道估计,常用的导频是由 UW 序列构成的训练序列。如果插入 M 块长度为 L 的 UW 序列,假设数据长度为 D ,则系统开销为:

$$\frac{ML}{D + ML}$$

地空传输信道通常被认为是莱斯衰落信道,即由视距传播成分和多径散射成分组成,若信道是慢衰落信道^[11],则在地空数据传输系统采用单载波频域预均衡在原理上是可行的。

2.1 信道估计

在慢衰落信道中,连续发送的每一帧数据所对应的信道频率响应不变。假设导频信号 $\{u_n\}$ 长度为 L ,接收到的导频信号为 $\{r_n\}$,首先对 $\{u_n\}$ 和 $\{r_n\}$ 分别进行 L 点的 FFT 运算,得到 $\{U_l\}$ 和 $\{R_l\}$ 。信道的频率响应估计值 \hat{H}_l 可表示为:

$$\hat{H}_l = \frac{\{R_l\}}{\{U_l\}}, 1 < l < P \quad (7)$$

一般情况下,为了提高性能,可以使用多个导频

块进行信道估计,然后取平均值得到该信道的频率响应,对发送端发送的连续 M 个导频块进行信道估计,取平均值可得:

$$\hat{H}_l = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{R_l^{(n)}}{U_l} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{H}_l^n, 1 < l < N \quad (8)$$

2.2 频域预均衡模型

由于机载设备体积重量功耗的诸多限制,使其设计上力求简单,故复杂的处理尽量放在地面设备上完成,因此,对应用于地空数据传输系统中的基于单载波频域预均衡系统,本文给出的设计原则为:在机载发射信号中插入导频信号,地面接收端将接收

到的下行链路中的导频信号与本地导频信号对比进行信道状态估计,获得信道状态信息,实现单载波频域均衡信号处理流程。在上行链路中,利用地空数据传输系统中信道的对称性,地面发送端对发送数据先进行预均衡处理,之后将预校正数据信号发送出去,由于上行信号进行了预均衡,因此机载接收端接收到的数据是利用预均衡粗略消除信道畸变影响的数据,之后在机载接收端进行二次均衡,相当于做一次精确均衡,从而提高系统误码性能。系统模型见图 2。

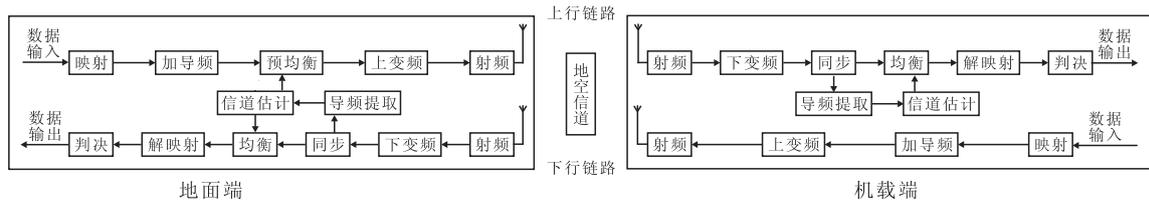


图 2 地空数据传输中基于单载波频域预均衡系统模型

Fig. 2 System model of air-ground communication based on single carrier frequency domain pre-equalization

根据均衡准则的不同,可分为基于 ZF 准则和 MMSE 准则的线性预均衡。基于 ZF 准则的线性预均衡基本原理是将信道畸变影响约束为零,实现的方法是以信道响应 H 的逆作为预均衡系数。基于 MMSE 准则的线性预均衡的目标则是使接收信号与发送信号的均方误差最小,由于预均衡矩阵引入了信噪比参量,性能相对稳定。

2.2.1 ZF 线性预均衡

在迫零准则下,若信道为慢衰落信道,只对其进行预均衡处理,设地面终端估计的信道估计值为 \hat{H}_l ,每 N 个映射后的码元 x_n 组成一个传输符号,假设发送信号 x_n 的平均功率为 P ,对 x_n 进行长度为 N 的 FFT 运算得到 $\{X_l\}$,若发送端所得到的信道估计值为 \hat{H}_l ,进行频域预均衡后得到地面发送的上行信号 $\{S_l\}$ 表示为:

$$\{S_l\} = \beta X_l \hat{H}_l^{-1}, 1 < l < N \quad (9)$$

式中 β 为功率缩放因子,作用是保持经过预均衡后发送信号的功率恒定。

$$\beta = \sqrt{\frac{K}{\text{tr}(\hat{H}_l^{-1} \hat{H}_l^{-H})}} \quad (10)$$

式中 K 为机载发送端发送的符号个数,变换到时域后得到 s_n ,则:

$$s_n = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \beta X_l \hat{H}_l^{-1} e^{j\frac{2\pi}{N}ln}, 1 < l < N \quad (11)$$

经过信道后机载端接收到的信号在频域可以表示为:

$$Y_l = \beta X_l \hat{H}_l^{-1} H_l + V_l, 1 < l < N \quad (12)$$

式中: H_l 为信道频域响应; V_l 为噪声频谱。再对其

进行频域均衡,可得到:

$$Y_l = \beta X_l W_l \hat{H}_l^{-1} H_l + W_l V_l, 1 < l < N \quad (13)$$

式中 W_l 为频域均衡系数,其表达式为:

$$W_l = H_l^{-1} \quad (14)$$

H_l 为信号经过预均衡,信道对信号产生的畸变影响项的频域表示为:

$$\mathbf{H} = \frac{R_{\text{pilot}}}{U_{\text{pilot}}} \quad (15)$$

式中: R_{pilot} 是接收端接收到的导频信号; U_{pilot} 是本地导频信号。经过 IFFT 变换后信号为:

$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \beta X_l W_l \hat{H}_l^{-1} H_l e^{j\frac{2\pi}{N}ln} + \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} W_l V_l e^{j\frac{2\pi}{N}ln}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (16)$$

2.2.2 MMSE 线性预均衡

在 MMSE 准则下,若信道为慢衰落信道,只对其进行预均衡处理,发送端经过频域预均衡后的信号为:

$$\{S_l\} = \tilde{H}_l X_l, 1 < l < N \quad (17)$$

式中 \tilde{H}_l 为预均衡系数。

$$\tilde{H} = \beta \bar{H} \quad (18)$$

β 为功率缩放因子,取值为:

$$\beta = \sqrt{\frac{K}{\text{tr}(\bar{H}_l \bar{H}_l^H)}} \quad (19)$$

而且

$$\hat{H}_l = \frac{\tilde{H}_l^H}{\tilde{H}_l \tilde{H}_l^H + (1/\text{SNR})} \quad (20)$$

发送端信号的时域表示为:

$$s_n = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} X_l \tilde{H}_l^{-1} e^{j\frac{2\pi}{N}ln}, 1 < l < N \quad (21)$$

经过信道后,机载接收端信号在频域表示为:

$$Y_l = X_l \tilde{H}_l^{-1} H_l + V_l, 1 < l < N \quad (22)$$

再对其进行频域均衡,得到:

$$Y_l = X_l W_l \tilde{H}_l^{-1} H_l + W_l V_l, 1 < l < N \quad (23)$$

式中 W_l 为频域均衡系数,其表达式为:

$$W_l = \frac{H_l^H}{H_l H_l^H + (1/\text{SNR})} \quad (24)$$

H_l 是信号经过预均衡,信道对信号产生的畸变影响项的频域表示为:

$$H = \frac{Y_{\text{pilot}}}{D_{\text{pilot}}} \quad (25)$$

式中: Y_{pilot} 为接收端接收到的导频信号; D_{pilot} 为本地导频信号。经过 IFFT 变换后信号为:

$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} X_l W_l \tilde{H}_l^{-1} H_l e^{j\frac{2\pi}{N}ln} + \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} W_l V_l e^{j\frac{2\pi}{N}ln}, n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (26)$$

3 仿真分析

借助 Matlab 仿真软件对采用线性均衡结构的常规单载波频域均衡方法及本文提出的单载波频域预均衡方法的误码性能进行仿真。

3.1 仿真条件

基于 IEEE802.16 推荐的帧结构:导频由 2 个长度为 32 的 UW(本文采用 Chu 序列)和两个长度为 96 的 UW 组成,每帧包含 10 个数据块,每个数据块包含 224 个信息码元和 1 个 32 长的 UW,其作用与循环前缀相同,目的是降低符号间串扰,FFT 运算点数为 256。码元速率为 6.4 MHz,采样频率为 25.6 MHz,调制方式为 QPSK 调制。信道模型为:1 条主径,3 条延迟径,噪声为加性高斯白噪声,各径时延及功率衰减见表 1。

表 1 多径分布

Tab.1 Multipath distributing

径编号	时延/us	平均相对功率/dB
1	0.000 0	0
2	0.625 0	-5
3	1.250 0	-10
4	2.500 0	-15

3.2 仿真结果

图 3 和图 4 分别是迫零准则和 MMSE 准则下不同均衡方案的误码率对信噪比仿真图。由图可以看出,在信噪比较低的时候,预均衡方案与常规均衡方案相比误码率性能有 2~3 dB 的改善,而当信噪比逐渐升高的时候,预均衡方案误码性能逐渐变差,且在误码率大约为 10^{-5} 时会出现平台效应,即误码率不随信噪比的增加而降低。原因在于造成系统误码的主要因素有信噪比和多径效应,不加导频的预均衡方案中用于预均衡的信道估计采用的是以前所估计出来的信道信息,因此信道估计误差会始终存在,当信噪比逐渐升高的时候,系统误码率将会趋于一个固定值,此时其误码性能相对于常规均衡方案会有所下降。

同时,将常规单载波频域均衡方案和本文提出的单载波频域预均衡一再均衡方案相比,可以看出本文提出的方案在误码率性能方面有 2~3 dB 的改善。这是由于在慢衰落信道中,假定在一个数据帧的时间内信道响应是基本不变的,那么在发送端的预均衡可以消除大部分信道畸变的影响,之后在接收端再进行均衡,相当于再做一次精确均衡,进一步消除信道畸变影响,即:

$$H_l \approx \tilde{H}_l W_l^{-1} \quad (27)$$

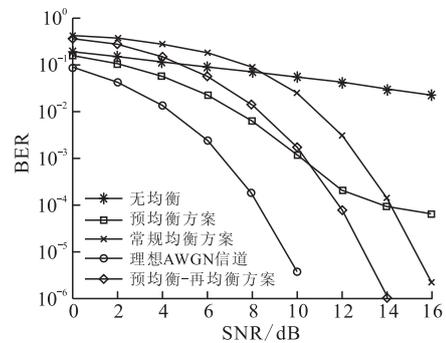


图 3 基于迫零准则的各均衡方案误码率
Fig.3 BER performance of different equalization schemes based on ZF criterion

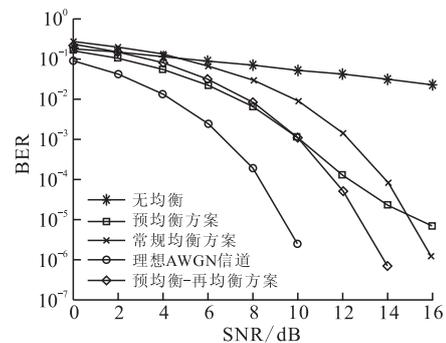


图 4 基于 MMSE 准则的各方案误码率
Fig.4 BER performance of different equalization schemes based on MMSE criterion

4 结语

本文提出了一种适用于慢衰落信道的地空传输系统上行链路的单载波频域预均衡方法,单独在地面发送端进行预均衡,可提高系统传输效率,减小机载接收端计算复杂度;若在地面发送端进行预均衡处理,机载接收端进行再均衡的处理,可改善系统的误码率性能。

参考文献(References):

- [1] 陈强,杨霄鹏,欧阳超,等. 基于 TD-NLMS 的航空移动通信 OFDM 系统载波频率偏移消除[J].空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(1):71-74.
CHEN Qiang, YANG Xiaopeng, OUYANG Chao, et al. Elimination of carrier frequency offset in aeronautical mobile communication OFDM system based on TD-NLMS algorithm[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2013, 14(1):71-74. (in Chinese)
- [2] Benjamin Ng, Chan-Tong Lam, David Falconer. Turbo frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2007, 6(2): 759-767.
- [3] Wu J Y, Lee T S. Blind channel estimation for single-carrier space-time block coded transmission with frequency-domain equalization: a diagonal precoding based approach[C]//IEEE 7th workshop on signal processing advances in wireless communications, Cannes: IEEE press, 2006:1-5.
- [4] Wu J Y, Lee T S. Nonredundant precoding-assisted blind channel estimation for single-carrier space-time block-coded transmission with frequency-domain equalization [J]. IEEE transactions on signal processing, 2007, 55(3): 1062-1080.
- [5] Nevio Benvenuto, Stefano Tomasin. On the comparison between OFDM and single carrier modulation with a DFE using a frequency-domain feedforward filter[J]. IEEE transactions on communications, 2002, 50(6): 947-955.
- [6] Nevio Benvenuto, Rui Dinis, David Falconer, et al. Single carrier modulation with nonlinear frequency domain equalization: an idea whose time has come-again[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(1): 69-96.
- [7] 陈晨,单载波频域均衡(SC-FDE)系统研究和实现[D].杭州:浙江大学,2006.
CHEN Chen. Research and implementation of SC-FDE system [D]. Hangzhou: Zhe jiang university, 2006. (in Chinese)
- [8] 刘大为,唐友喜.预均衡 OFDM 系统中定时误差的性能影响[J].电子科技大学学报,2003,32(5): 521-524.
LIU Dawei, TANG Youxi. Impact of timing error on performance in Pre-Equalization OFDM systems[J]. Journal of UEST of China, 2003, 32(5): 521-524. (in Chinese)
- [9] 高向川.多用户 MIMO 系统中关键技术研究[D].北京:北京邮电大学,2011.
GAO Xiangchuan. The key techniques research of the multi-user MIMO systems[D]. Beijing: University of posts and telecommunications, 2011. (in Chinese)
- [10] 杨霄鹏,史浩山.一种 MC-CDMA 中的预均衡处理算法[J].信号处理,2005,21(6):600-604,638.
YANG Xiaopeng, SHI Haoshan. A Feedback Pre-equalization Method in a MC-CDMA[J]. Signal Processing, 2005, 21(6): 600-604, 638. (in Chinese)
- [11] 杨霄鹏,姚昆,史浩山.航空信道仿真研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(3):16-19.
YANG Xiaopeng, YAO Kun, SHI Haoshan. Simulation study of aeronautical channel [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2006, 7(3):16-19. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)