



浙江工业大学

通信原理课程

技术调研报告

题目： 通信系统中的预均衡技术

作者姓名 凌智城

专业班级 通信工程 1803 班

学 院 信息工程学院

提交日期 2020 年 12 月 26 日

通信系统中的预均衡技术

摘要：当发送信号通过非理想信道时，通常会产生码间干扰。采用均衡技术可以有效地进行补偿。均衡能够有效地克服传输中的多径干扰和消除码间串扰，是无线通信系统中的一项重要技术，并且在许多相关领域都有非常广泛的应用，目前已广泛用于通信、雷达、声纳、控制和生物医学工程等诸多领域。介绍和分析时域均衡研究背景及意义，国内外研究现状以及通信系统中的均衡技术，主要介绍零点消除算法自适应的均衡技术。

关键词：时域均衡，预均衡，自适应均衡

1 研究背景与发展前景

1.1 时域均衡的研究背景

截至 2019 年底，中国移动互联网用户规模达 13.19 亿，占全球网民总规模的 32.17%；4G 基站总规模达到 544 万个，占据全球 4G 基站总量的一半以上；电子商务交易规模、移动支付、全国数字经济增加值规模等都稳居世界前列。移动通信技术向着广覆盖、热点容量高、低功耗大连接和低时延和高可靠发展。然而随着智能移动终端飞速发展及其日益增长的应用需求，视频下载已经在整个网络数据传输中占据主导地位，极大加剧了下行链路到上行链路的不对称性，为通信链路的设计带来挑战。解决上述困难的有效措施是在通信系统中采用时分双工(Time Division Duplexing, TDD)模式。TD-LTE 的发展证明了 TDD 所独有的技术优势，根据 TDD 具备的信道互易性，基站可以快速根据上行链路信道估计准确获得下行链路信道状态信息(Channel State Information, CSI)。预均衡技术正是利用 TDD 模式的这一特性，在发射端预先消除干扰，在简化接收机设计的同时极大增强了下行链路传输容量。此外，在有限的频谱资源中最大化通信系统的传输效率是未来通信的首要设计目标，使 TDD 成为 5G 时代 2GHz 以上新频率的优选划分方式。

预均衡技术是一种重要的发射端均衡技术^[1]。以预均衡 OFDM 系统为例，OFDM 预均衡技术继承了传统的 OFDM 技术，在信道相干延时不大的情况下，发

射端可以通过参考链路的信道状态信息提前预均衡发射符号,进而弥补下行传播信道对发射信号造成的幅度衰落和相位畸变,终端接收机不再需要作复杂的信道估计和频域均衡就可以恢复原数据符号,在降低系统导频开销的同时极大降低了接收机的设计复杂度,有效解决了复杂的移动终端设计和日益增长的网络速率需求之间的矛盾。

为了有效抑制多径响应导致的符号间干扰(Inter Symbol Interference, ISI),预均衡 OFDM 系统通常需要确保循环前缀(Cyclic prefix, CP)的长度完全大于信道的最大时延长度,严重降低了系统的频谱利用率。目前,预均衡技术大都是理论研究,没有考虑信道的复杂时变性。

1.2 预均衡技术研究现状

预均衡技术能降低终端接收机的复杂度^[2]。在存在严重 ISI 的通信系统中以 OFDM 为例^[3],通常在接收终端采用时域均衡技术缩短信道长度,但这样会导致终端的设计复杂度提高。如果在发射端预先对 ISI 进行消除,终端就不再需要涉及复杂的均衡系统,大大简化接收机的设计,降低设备的成本,简介提高终端设备的使用寿命。

在均衡技术的算法研究中,基于决策星座分割算法的预均衡算法,有效提高了均衡系统的比特误码率(Bit Error Rate, BER)性能;基于时间反转的空时预均衡算法在降低设备复杂度的情况下,避免了信道噪声的影响,其整体均衡性能得到了提升,例如在单载波 OFDM 系统中,传输信道可以等效成一个慢衰弱的瑞利信道,为了降低信道衰弱对传输信号的影响,Keller T 和 Lajos H 提出了基于信号与干扰加噪声比的预均衡算法。其中首次在与均衡系统中引入了判决门限,通过判决门限识别子载波是否处于深衰弱,再将处于深衰弱的子载波屏蔽,避免发射机的功率发生突变,一定程度上提高了预均衡性能,但其仍然无法保证发射功率稳定,并导致了子载波利用率降低,造成频谱的浪费。诸多预均衡算法都是假设参考链路处的信道估计是理想的,但无线信道具备复杂的时变性,预均衡系统很难保证预均衡链路的信道信息和参考链路的星岛信息一直,文献^[4]通过理论推导与仿真分析,指出时序误差是影响系统性能的主要原因,但没有给出具体的解决方案。

1.3 自适应均衡发展概况

自适应信号处理^[5]研究工作始于二十世纪中叶。在 1957 至 1960 年间，meiguo 通用电气公司的豪厄尔斯（P.Howells）和阿普尔鲍姆（P.Applebaum），与他们的同事研究和使用了简单的自适应滤波器以消除混杂在有用信号中的噪声与干扰。二结构更加复杂的自适应滤波器的研究工作，则由美国斯坦福大学的维得罗（B.Widrow）和霍夫（M.Hoff）始于 1959 年。此间，他们在自适应理论方面做出了巨大的贡献，发明了最小均方（LMS）自适应算法，并提出了一种采用被称之为“自适应线性门限逻辑单元”的模式识别方案。同时，英国的布加尔与其助手们则研制出了自适应滤波器。原苏联莫斯科自动化和遥控力学研究所的艾日曼（D.Gabor）及其同事们，也研究出一种自动梯度搜索机器。

而从自适应滤波理论发展起来后，很快在信道均衡技术中得到了应用，提供了更加有效的均衡方法。60 年代，自适应信道均衡技术主要集中在线性均衡器，有最小均方误差（MMSE）准则下的最佳发送滤波器和接收滤波器和在均衡器采用时刻无码间干扰的约束条件的破零算法（ZF）。这种算法在最大后验概率（MAP）系统中得到应用。不久后，人们开始研究 LMS 自适应均衡器，而自适应均衡器的结构也从线性横向滤波器转向性能更好的判决反馈均衡器（DFE）以及具有分数间隔的线性横向滤波器和判决反馈均衡器。判决反馈均衡器一般有前馈滤波器和反馈滤波器两部分组成。前馈部分是输入信号的加权和，以符号发送间隔 T 采样或以符号发送的分数间隔 τ 采样。反馈部分是判决时刻以后符号的加权和，用来抵消以前发送符号对当前符号判决产生的码间干扰。在理想情况下，只有判决时刻以后的发送符号才能对当前符号的判决产生影响，所以 DFE 的性能要优于线性横向滤波器。

到 70 年代，D.Godard 把 Kalman 滤波理论引入到自适应信号均衡器中。这种算法通常称为 Kalman/Godard 算法，也称作 RLS 算法。Kalman/Godard 算法最主要的优点就是它是一种收敛速度很快的自适应算法。但是它存在着两个不足，其一是运算量太大，其二是算法不稳定。针对 Kalman/Godard 算法的第一个缺点，D.D.falconer 和 L.Ljung 提出了快速 Kalman 算法。而针对 Kalman/Godard 算法的第二个缺点，M.Hsu 又提出了平方根 Kalman 算法。同时也在研究新的结构和简化算法。1979 年，E.H.Satorius 提出了自适应格型算法，它是建立在对接收信号取样值进行正交化处理基础上，在对接收信号进行正交化处理基础上，利用 Gram-

Schmidt 正交方程对接收信号进行递推运算。J.G.Proakis 和 F.Ling 又在高频信道均衡器的最小二乘格型算法上进行了研究。

目前自适应均衡器应用十分广泛^[6]，以判决反馈式均衡器为主体的调制解调器是人们研究较多的一种。其中 LMS 算法构成的判决反馈式自适应均衡器有许多突出的优点：运算量比较少，稳定性较好。但是它的收敛速度比较慢。所以人们又开始研究其它收敛速度快，均衡精度高和稳定性好，算法运算量较小的算法的自适应均衡器结构。

2 预均衡技术简介

2.1 预均衡原理

以 OFDM 系统为例，无线通信系统几乎都是通过插入导频符号以辅助接收机获得准确的信道估计，再通过导频处的信道估计恢复原始数据信号。虽然这样可以解调出原始数据，但是牺牲了一定的子载波开销，降低了系统的频带利用率。其次，复杂的信道估计会导致接收端的信号检测变得异常复杂，降低了系统的吞吐量。

发送端可以通过参考链路的信道信息提前对即将发送的信号进行预处理，将信道的幅度增益和相位旋转提前进行纠正，可以认为发送信号不会受到无线信道的影响，终端只需要进行简单的频域均衡即可恢复出原始信号，OFDM 时域均衡原理如图 1 所示^[7,8]

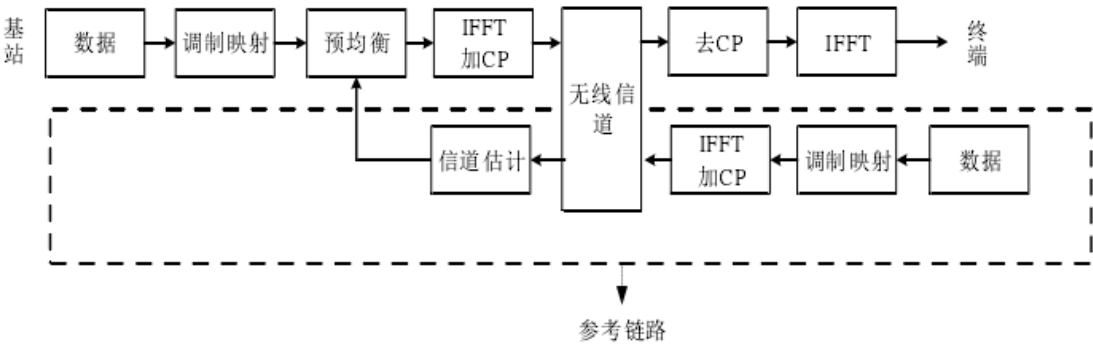


图 1 OFDM 预均衡原理

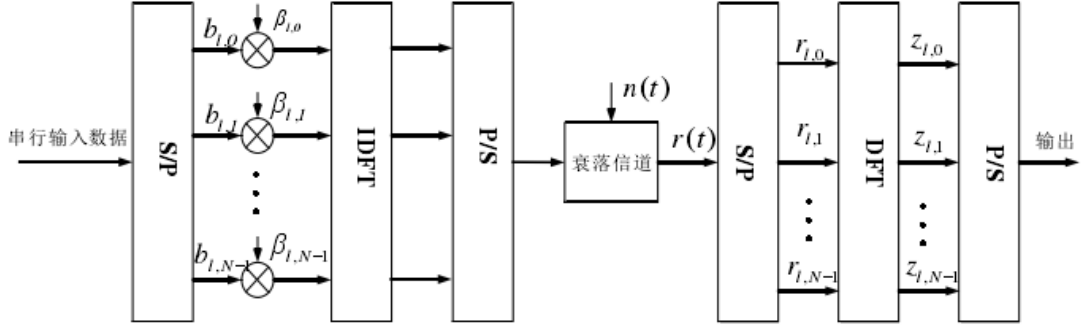


图 2 OFDM 预均衡链路

图 1 中，下半部分为上行链路，也叫参考链路，上半部分为下行链路，也是所谓的预均衡链路，其中预均衡链路的处理流程图如图 2 所示。在预均衡链路中， $b_{l,i}$ 表示第 1 个发送符号的第 i 个子载波数据， $\beta_{l,i}$ 表示预均衡链路对第 1 个符号的第 i 个子载波的预均衡因子。预均衡 OFDM 系统的数据传输过程可以描述为^[9]：

$$r(t) = \left(\sum_{k=0}^{n-1} h_k(t) \cdot \delta(\tau - \tau_k) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{T_u}} \sum_{t=-\infty}^{+\infty} \sum_{i=0}^{N-1} b_{l,i} \beta_{l,i} g_{l,i}(t) \right) + n(t) \quad (1)$$

其中 $h_{n-1}(t)$ 表示长度为 n 的多径信道， τ_k 为第 k 条路径所对应的多径时延， $g_{l,i}(t)$ 为子载波脉冲波形，表示为 $g_{l,i}(t) = e^{j2\pi(k/T_u)(t-T_g-lT_s)} u(t-lT_s)$ 。 T_u 是发送符号的宽度， T_g 表示加入的循环前缀宽度， T_s 为系统加入循环前缀以后 OFDM 符号宽度，关系表达式为 $T_s = T_g + T_u$ 。取采样间隔 $T = T_s / (N + N_g)$ 在 $t_n = nT$ 时刻分别对接收信号进行单倍速率采样，得到了 $N_s = N + N_g$ 个采样数据，然后去除保护前缀即可得到 N 个有效的采样值。在上下行信道状态一直是，上述链路的 N 个有效值可以表示成：

$$r_{l,n} = r\left((n + N_g + l \cdot N_s) \cdot T\right) \quad (2)$$

在 OFDM 系统中，通常 CP 长度 T_g 大于信道最大多径延时 τ_{\max} ，可以认为接收信号去除循环前缀后系统无 ISI 干扰。对上述有效值进行 N 点快速傅里叶变换，可以得到发送的第 1 个符号的第 m 个子载波数据：

$$\zeta_{l,m} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} r_{l,n} e^{-j2n\pi m/N} = b_{l,m} \beta_{l,m} H_{l,m} + n_{l,m} \quad (3)$$

上式第 1 个符号的第 m 个子载波数据的信道频域相应 $H_{l,m}$ 表示为：

$$H_{l,m} = \sum_{i=1}^{n-1} h_{l,i} e^{-2j\pi m\tau_i/NT} = \mu_{l,m} e^{j\theta_{l,m}} \quad (4)$$

其中 $\mu_{l,m}$ 表示多径效应对于 1 个符号的第 m 个子载波造成的幅度增益，而 $e^{j\theta_{l,m}}$ 则表示相位旋转。由式（4）可知，采用预均衡策略的实际想到相应 $H'_{l,m}$ 可以表示成：

$$H'_{l,m} = \beta_{l,m} H_{l,m} \quad (5)$$

通过限制 $H'_{l,m}$ 的值，可以对发送信号进行不同的预处理。

2.2 预均衡技术的优缺点

①预均衡技术的优点

1) 降低接收机复杂度

由于预均衡 OFDM 系统在发射端提前对信道造成的衰落效应进行了预纠正，因此接收机不再需要复杂的信道均衡就能正确解调原始数据，大大简化了接收机的设计。

2) 抗干扰能力强

通过预均衡过后的发射信号通过多个子载波传输，每个子载波上的信号持续时间就比同速率的单载波 OFDM 系统上的信号时间长，这会使得信号对信道噪声和信道的衰落的抵抗能量更强。

3) 调制简单

各个子载波的调制和解调都是经过 IDFT 和 DFT 实现的，在高子载波的通信系统中可以采用 IFFT 和 FFT 实现。而随着电路技术和硬件技术的逐渐成熟，IFFT 和 FFT 的工程实现也比较简单。

4) 动态分布资源

预均衡系统可以选择性的对处于深度衰落的进行屏蔽，这样就可以将传输资源尽可能的分配到其它子载波上，节约资源。

②预均衡技术的确定

1) 使用范围有限

预均衡技术只适合 TDD 模式的传输系统，这要求信道的上下行切换时间较短。而在 FDD 模式中，一般上下行的切换时间比较长，这就会导致上下行信道状态信息发生较大的改变，预均衡系统会存在较大误差。

2) 对信道估计要求高

预均衡 OFDM 系统的核心技术是通过参考链路的信道状态信息对将要发射的原数据信道进行预处理，以此抵消预均衡链路信道造成的信号衰落。于是参考链路处的信道估计精度就会直接影响系统预均衡的预均衡系统，对信道估计的依赖程度较高。

3 自适应均衡基本理论

均衡就是指对信道特性的均衡，即接收机的均衡器产生与信道相反的特性，用来由抵消信道时变多径传播特性引起的码间干扰。也就是说，通过均衡器来消除信道的频域和时间的选择性。由于信道是时变的，因此要求均衡器的特性能够自动适应信道的变化而均衡，故称自适应均衡^[10]。均衡用于解决符号间的干扰问题，适合于信号不可分离多径，且时延扩展远大于符号宽度的情况。它可以分为频域均衡和时域均衡。频域均衡是使总的传输函数（信道传输函数和均衡器传输函数）满足无失真传输条件，即校正幅频特性和群时延特性。时域均衡是使总的冲击响应满足于无码间干扰的条件。

欧洲著名学者奈奎斯特 (Nyquist) 早在 1928 年就系统地论述了基带数字信号传输理论，并就消除码间干扰原理与基本方法归纳出三个准则：峰值失真准则（迫零准则）、最小均方误差 (MMSE) 准则、最小二乘 (Least Square, 简称 LS) 准则。迄今运用已 70 多年。均衡器是自适应滤波器在均衡方面的应用，因此自适应均衡器也必须遵循这几个准则。在这些准则下的自适应均衡算法有很多，其中最小均方误差算法 LMS 和递归最小二乘法 RLS 运用最为广泛。

参考文献

- [1] Mark P, Markus S, Frank L, et al. Multi-User pre-processing in multi-antenna OFDM TDD systems with non-reciprocal transceivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 3781-3793.
- [2] Kamio Y, Nakamura M, Miyazaki T. ISI pre-equalization in a vector modulator for 5 Gsymbol/s 64-QAM[C]//European Conference on Optical Communication. Belgium: IEEE Press, 2008: 1-2.
- [3] Banelli P, Cacopardi S. Theoretical analysis and performance of OFDM signals in nonlinear AWGN channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(2): 284-293.
- [4] Liu Dawei, Tang Youxi, Sang Dongshen, et al. Impact of timing error on BER performance of TDD pre-equalized OFDM systems.[C]//2004 IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Barcelona: IEEE Press, 2004: 714-718.
- [5] 沈福民, “自适应信号处理”, 陕西, 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [6] 陶昱.单载波无线传输系统中自适应均衡技术的研究[D].西安: 西安电子科技大学出版社, 2006. 3-4.
- [7] 方文斌. 虚拟 MIMO-OFDM 中的子载波分配技术研究[D]. 电子科技大学, 2009.
- [8] 刘大为, 唐友喜, 李少谦. TDD 相位预均衡 OFDM 系统中的定时误差分析[J]. 电子学报, 2004(S1): 136-140.
- [9] Xu Mu, Zhang Junwen, Lu Feng, et al. FBMC in next-generation mobile fronthaul networks with centralized pre-equalization[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016: 1-1.
- [10] Haykin S, “Adaptive Filter Theory”, 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.