

多值数据的自适应脉冲宽度调制预加重方法

孙华娟 颜晓红 郝学元

A method of adaptive pulse width modulation for multiple-valued data transmission

Sun Hua-Juan Yan Xiao-Hong Hao Xue-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 018402 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.018402

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018402>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地月平动点导航星座的概要设计与性能分析

Outline design and performance analysis of navigation constellation near earth-moon libration point

物理学报.2014, 63(24): 248402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248402>

Kalman 滤波辅助的室内伪卫星相对定位算法

Indoor pseudolite relative localization algorithm with kalman filter

物理学报.2014, 63(22): 228402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228402>

用于随机解调器压缩采样的重构判定方法

Reconstruction verification for random demodulator based compressed sampling

物理学报.2014, 63(22): 228401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228401>

基于中国余数定理的欠采样下余弦信号的频率估计

Frequency estimation of undersampled sinusoidal signal based on chinese remainder theorem

物理学报.2014, 63(19): 198403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.198403>

基于混沌序列和 RIPless 理论的循环压缩测量矩阵的构造

Construction of a circulant compressive measurement matrix based on chaotic sequence and RIPless theory

物理学报.2014, 63(19): 198402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.198402>

多值数据的自适应脉冲宽度调制预加重方法*

孙华娟† 颜晓红 郝学元

(南京邮电大学电子科学与工程学院, 南京 210003)

(2014年6月27日收到; 2014年8月27日收到修改稿)

信号受长距离同轴电缆的趋肤效应、介电损耗等因素的影响, 高频衰减严重, 产生码间干扰, 使接收端很难恢复信号, 限制信号传输速度. 脉冲宽度调制 (PWM) 预加重技术, 是通过时域信息处理来增加信号的传输速度, 在二进制信号中已经得到很好运用. 自适应 PWM 预加重方法则是进一步针对数据相关性抖动, 对不同数据序列进行或强或弱的预加重, 动态补偿多进制数据的传输损耗, 提高信号完整性, 眼图结果表明该方法改善了信号传输质量.

关键词: 脉冲宽度调制, 多进制数据, 数据传输, 预加重

PACS: 84.40.Ua, 84.30.Sk

DOI: 10.7498/aps.64.018402

1 引言

在长缆上进行高速数据传输, 由于趋肤效应和介电损耗会引起码间干扰, 限制信号传输速率. 这样的传输损耗可通过发送端的预加重或接收端的后均衡来补偿, 但接收均衡器通常包含的几个模拟电路对速度、精度和线性的要求较高. 预加重技术通常是基于有限脉冲响应 (FIR) 滤波器^[1,2], 可是它电路实现复杂, 并且信号幅度增加的同时还会增加电磁干扰和噪声容限, 影响传输质量. 利用放大器、反相器和延时器等器件也可增加幅度产生预加重驱动信号^[3], 这样的预加重技术需要许多电路元器件, 预加重信号粗糙. 在光纤远距离传输中是利用相位预加重抵抗光脉冲的非线性克尔效应来提高长距离光纤通信质量, 由于非线性影响, 要分别确定不同信道的最佳补偿点, 此外由于相位调制器有驱动电压限制, 使得单个相位调制器进行预加重时存在补偿极限^[4]. 脉冲宽度调制 (PWM) 预加重技术是利用时间分辨率, 改变脉冲宽度^[5]. 它最先用在芯片线上, 后来发现此技术对于线缆补偿也十分有效, 25 m 同轴电缆以 5 Gb/s 速率传输可获

得 33 dB 补偿^[5]. 第 38 届国际多值数据逻辑研讨会 (ISMVL) 上有文献运用脉冲宽度调制预加重技术来补偿多值数据, 获得信号完整性^[6]. 由于那篇文献是采用电阻电容 (RC) 组成的简单受限传输电路, 针对实际传输的复杂低通信道, 又有文献^[7]又提出了二阶脉冲宽度调制预加重技术, 从幅度域和时间分辨率两方面共同补偿信号高频衰减, 算法较为复杂, 实现难度大. 本文以同轴电缆为信道模型, 在叙述脉冲宽度调制 (PWM) 预加重技术能够改善低通信道的传输质量后, 提出自适应 PWM 预加重方法, 该方法仅从时间分辨率这一个变量上, 利用数据相关性对不同数据序列进行或强或弱的预加重, 动态补偿数据传输损耗, 提高多进制数据信号传输的完整性.

2 码间干扰和带限信道

由于信道的趋肤效应、介电损耗^[8]及低通特性等非理想特征表现非常明显, 使收端脉冲展宽, 延伸到邻近码元中去, 即每个码元的拖尾造成了对相邻码元的串扰, 叫做码间干扰.

传输电缆可将其看成是分布电容、分布电感和

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA050526) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jingxuansun@qq.com

电阻联合组成的等效电路. 信号的损耗主要由电缆的分布电容和分布电感(LC)组成的低通滤波器造成. 这里导线的电阻对信号的影响很小, 可忽略不计. 因此可利用LC低通电路代替传输线作为传输信道. 因此可以利用LC低通滤波器代替传输线, 等效电路作为信道. 从频域分析, 假设一阶低通传输信道函数为

$$H_{1st}(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_{ch}}}. \quad (1)$$

信道的有线带宽 ω_{ch} (rad/s), 低通电路的幅频响应如图1所示, 可见长缆信道对信号的高频部分衰减严重.

放大高频分量或是衰减低频分量都可以起到消除码间干扰的作用. 预加重原理就是在信道之前放置一个补偿传递函数 $G_{eq}(j\omega)$, 它是与信道函数性质相反的补偿函数, 如图2所示[9].

$$G_{eq}(j\omega) = \frac{1 + \frac{j\omega}{\omega_{ch}}}{1 + \frac{j\omega}{\omega_{p,eq}}}, \quad (2)$$

由此可以得到补偿后的信道为 H_{tot} .

$$H_{tot} = H_{1st}(j\omega) \cdot G_{eq}(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_{p,eq}}}. \quad (3)$$

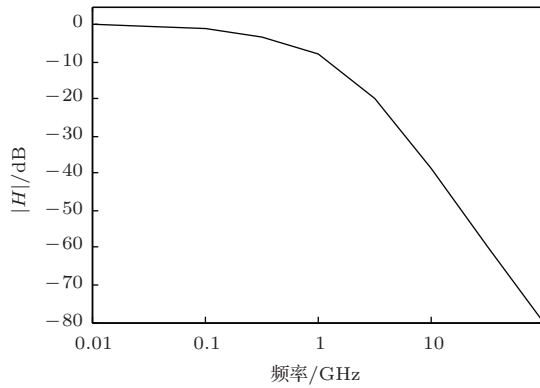


图1 一阶低通信道

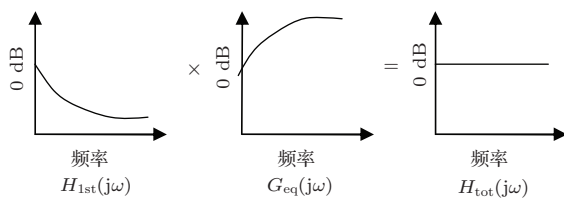


图2 预加重原理

3 脉冲宽度调制(PWM)预加重技术

PWM预加重技术不像FIR幅度预加重那样调整脉冲幅度来匹配电缆, 而是利用时间分辨率. 如图3所示, 给出了PWM预加重的输出波形, 输出是标准的 ± 1 V. 脉冲宽度调制脉冲的形状类似曼彻斯特编码一样, 只是曼彻斯特编码的占空比是固定的50%, 而它的占空比可变. 占空比为100%的信号就相当于没有预加重过的非归零信号一样, 而占空比为50%的信号就相当于曼彻斯特编码一样. 最佳占空比就介于50%到100%之间, 具体数值取决于传输的信道特性. 基于PWM预加重的脉冲响应为 $P_{PWM}(t)$ [10]. 对于一阶低通信道, 占空比 d 是一个基于符号时间 T_s 和信道恒定参数 τ_{ch} 的函数[5], 针对本文选用的信道, 最佳占空比为60%.

$$P_{PWM}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & 0 \leq t < T_s, \\ -1, & d \cdot T_s \leq t \leq T_s, \\ 0, & t \geq T_s \end{cases} \quad (4)$$

$$d = \ln \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} e^{\frac{T_s}{\tau_{ch}}} \right) \frac{\tau_{ch}}{T_s}. \quad (5)$$

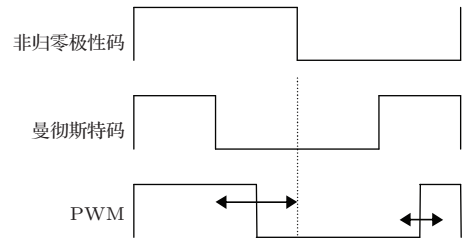


图3 脉冲宽度调制预加重波形

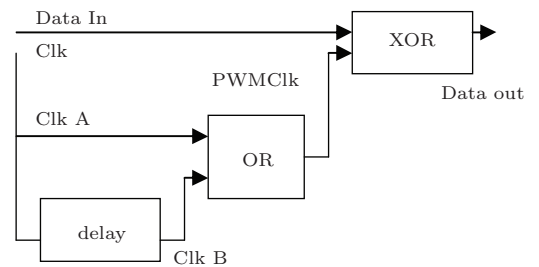


图4 脉冲宽度调制预加重原理

PWM预加重原理如图4所示, 输入数据 Data In 和脉冲宽度调制时钟 PWM Clk 进行异或运算得

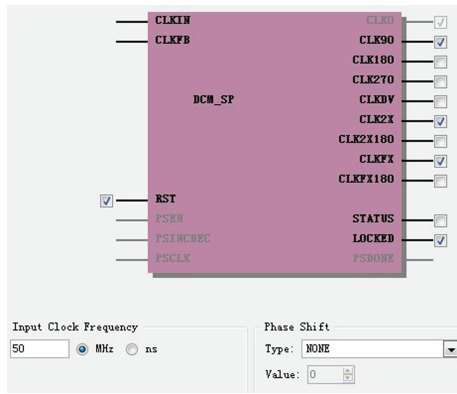


图5 IP核

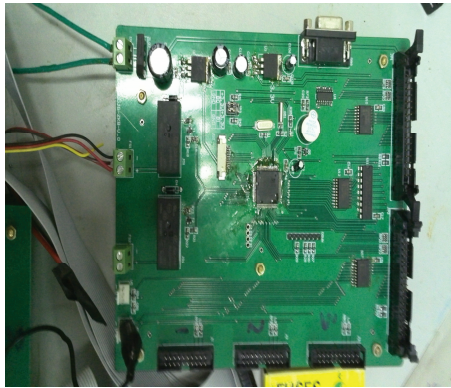


图6 STM32F103VCT6单片机

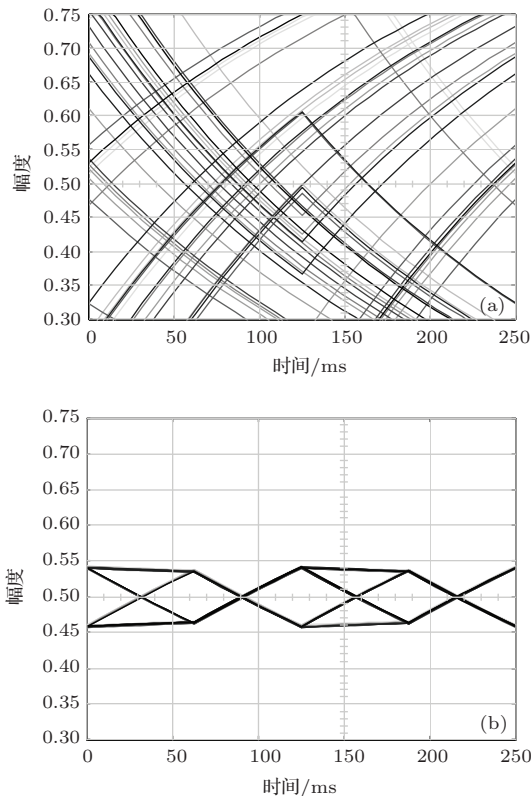


图7 (a) 未预加重波形; (b) 脉冲宽度调制预加重眼图

到时域预加重数据PE-Out. PWM Clk是通过输入时钟Clk和一个延迟电路delay进行或门逻辑运算形成的^[11]. 本文选用Xilinx-FPGA中DCM模块(即IP核)完成延时电路部分, 在Xilinx时钟向导的建立窗口中进行配置, 如图5所示. 在Input Clock Frequency输入栏中敲入输入时钟的频率或周期, 单位分别是MHz和ns, 在Phase Shift输入栏中敲入适当相位, 其余保持默认值. 采用STM32F103VCT6单片机最小系统作为硬件电路产生预加重波形, 如图6所示.

图7展示的是二进制信号PWM预加重前后的眼图, 未预加重的发送波形, 在接收端的眼图是杂乱无章的, 预加重后的眼图变得清晰, 眼睛张开大, 码间干扰变小, 传输质量得到提高.

4 多进制数据预加重

4.1 多进制数据预加重原理

PWM预加重技术在二进制信号传输中已经得到很好的应用, 我们希望在多进制数据均衡中也运用PWM预加重技术, 来提高数据传输能力. 由于FIR幅度预加重很难降低供应电压和噪声容限, 所以选用PWM预加重. 该方法是通过一个时钟信号来选择发送数据的数据或是 $\overline{\text{data}}$, 形成多进制数据的脉冲宽度调制^[12].

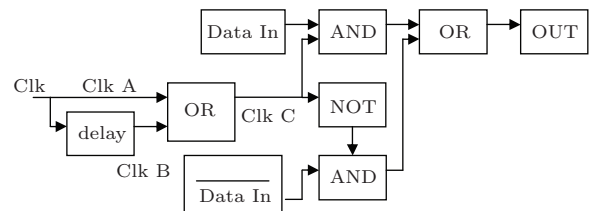


图8 四进制数据脉冲宽度调制预加重

表1 四进制预加重电路解释

Data	Clk C = 0		Out
	Data In	$\overline{\text{Data In}}$	
0 (00)	00	11	03 (0011)
1 (01)	01	10	12 (0110)
2 (10)	10	01	21 (1001)
3 (11)	11	00	30 (1100)

以四进制数据为例来解释这个预加重电路. 输入时钟经过延时电路产生ClkB和ClkA进行或运

算, 当结果为1时, Out输出端为 $\overline{\text{data In}}$; 当结果为0时, Out输出端为Data In, 如表1所示, 它的发送门电路如图8所示.

4.2 自适应脉冲宽度调制(PWM)预加重方法

一阶PWM预加重已经能够补偿带限信道, 对于更复杂的信道环境, 还是需要高阶预加重来补偿. FIR幅度预加重是通过增加抽头系数来实现高阶预加重的, 它的预加重电路需要额外的电路消耗和功率损耗, 自适应PWM预加重利用数据间的相关性, 来进一步改善信号完整性^[13].

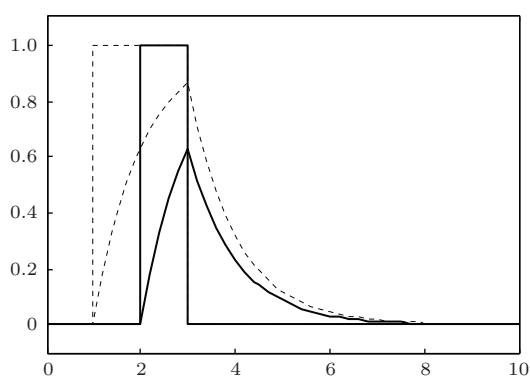
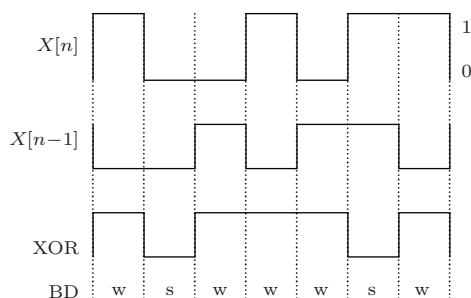


图9 序列001和011的信道响应



(a) w: 弱加重, s: 强加重

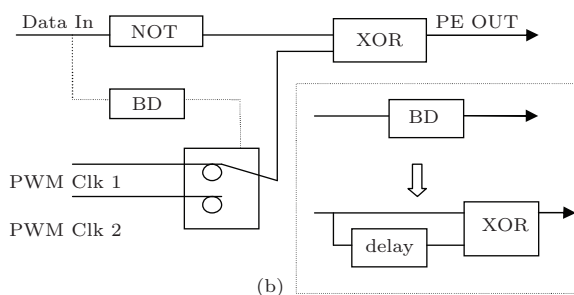


图10 (a) 位检测原理; (b) 自适应脉冲宽度调制预加重原理和位检测电路

接收端的信号不仅依赖数据序列本身发送还取决于之前发送的数据序列, 这就是数据相关性抖动(DDJ). DDJ是总抖动的主要来源, 也是制约进一步提高数据速率和传输距离的瓶颈. DDJ是与数据码型本身相关的峰峰值抖动, 抖动的峰峰值随着观察样本数量的增加而增加.

基于数据相关性的自适应PWM预加重技术, 通过改变数据转换时间抵消DDJ. 在图9中, 对于数据序列011这种慢转换提供强预加重(短占空比), 对于序列001这种快转换提供弱预加重(长占空比). 位检测(BD)电路可实现占空比的改变, 如图10所示, BD电路通过异或逻辑门电路检测连续比特流, 分别对快、慢转的数据序列提供最佳占空比来抵消DDJ^[13].

4.3 脉冲宽度调制预加重仿真结果

4.3.1 预加重波形

在Simulink里面建模仿真, 可以得到经过自适应脉冲宽度调制(PWM)预加重后的发送波形和接收波形如图11所示.

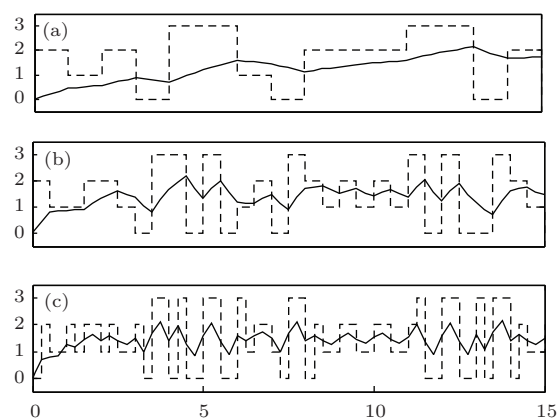


图11 (a) 四进制数据发送和接收波形; (b) 脉冲宽度调制预加重发送和接收波形; (c) 自适应脉冲宽度调制预加重后发送和接收波形

从图12的接收波形来看, 自适应PWM预加重接收波形的判决门限相较于之前两种方法更加明显; 从图12的结果来看, 没有进行预加重处理的发送波形, 在接收端的眼图是杂乱无章的, 码间干扰严重, 传输效果不理想. 经过普通PWM预加重的四进制波形重合度低, 还存在一定程度的码间干扰, 预加重效果不理想. 自适应PWM预加重波形重合度较高, 眼图更清晰, 预加重的效果良好.

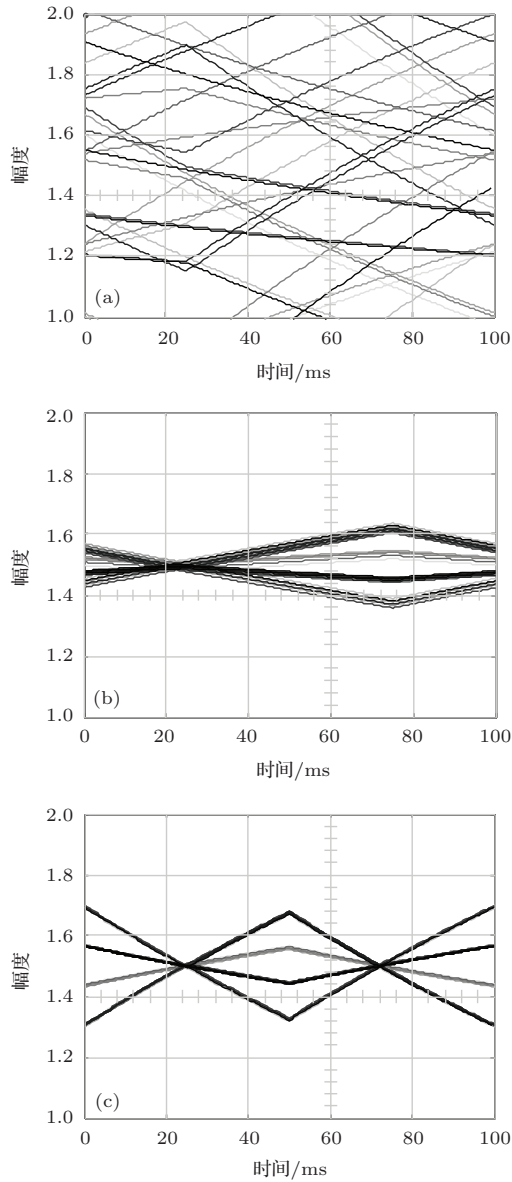


图 12 (a) 未预加重眼图; (b) 脉冲宽度调制预加重眼图; (c) 自适应脉冲宽度调制预加重眼图

通过计算, 自适应PWM预加重的眼图高度比普通PWM预加重的眼图扩大了约44%, 因此, 对四进制传输信号而言, 自适应PWM预加重效果好, 能有效的补偿信号衰减, 提高传输质量.

4.4 脉冲宽度调制预加重试验结果

为了进一步验证自适应脉冲宽度调制预加重方法能有效提高传输质量, 本文进行了实验, 四进制发送波形幅度为3 V, 频率为2 MHz, 由试验结果图13至图18可知自适应脉冲宽度调制预加重效果最好, 能较好保持信号完整性, 消除数据相关性抖动, 改善传输质量.

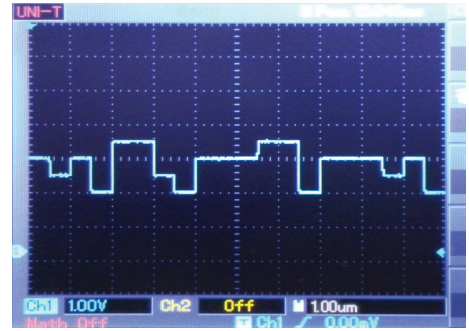


图 13 四进制数据发送波形

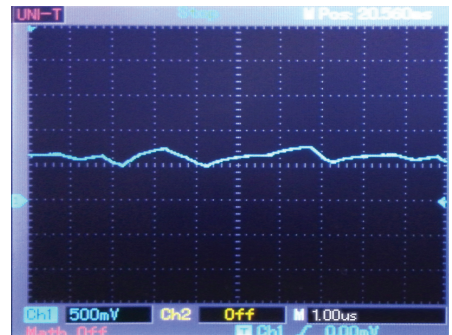


图 14 四进制数据接收波形



图 15 脉冲宽度调制预加重发送波形

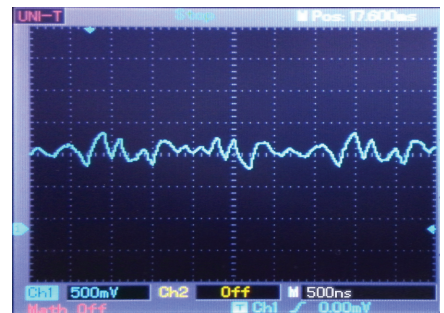


图 16 脉冲宽度调制预加重接收波形



图 17 自适应脉冲宽度调制预加重发送波形

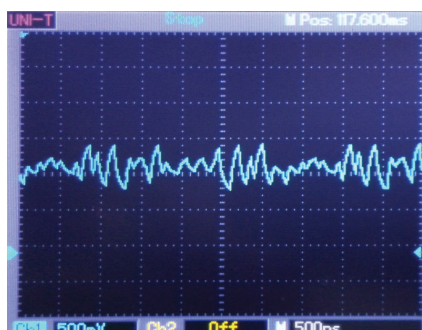


图 18 自适应脉冲宽度调制预加重发送波形

5 结 论

本文详细分析了 PWM 预加重技术, 它是利用时间分辨率改变脉冲宽度而不是像 FIR 型预加重那样改变信号幅度, 对于高阶复杂的传输环境, 我们又进一步研究了自适应 PWM 预加重方法, 鉴于数据相关抖动 (DDJ) 动态补偿多进制数据传输损耗, 获得了眼图扩大 44% 的良好结果, 多进制数据

传输速率和系统质量得到提高和改善.

参考文献

- [1] Kudoh Y, Fukaishi M, Mizuno M 2003 *IEEE J. Solid-State Circuits* **38** 741
- [2] Gai W, Hidaka Y, Koyana Gi Y, Jiang J H, Osone H, Horie T 2004 *Symposium on VLSI Circuits*, Digest of Technical Papers, June 17–19, 2004 p138
- [3] Xu H H, Huang Q Z, Li Y T 2010 *Chin. Phys. B* **19** 084210
- [4] Li Y, Cheng H R, Li W, Yu S H, Yang Z 2012 *Acta Phys. Sin.* 61 194205 in Chinese 2012 **61** 194205 (in Chinese) [李源, 成浩然, 李蔚, 余少华杨铸 2012 物理学报 **61** 194205]
- [5] Schrader J, Klumperink E, Visschers J, Nauta B 2005 *Symposium on VLSI Circuits* June 16–18, 2005 p388
- [6] Yuminaka Y, Takahashi Y 2008 *Multiple Valued Logic Dallas*, May 22–24, 2008 p20
- [7] Yuminaka Y, Takahashi Y, Henmi K 2009 *39th International Symposium on Multiple-Valued Logic Naha, Okinawa*, May 21–23, 2009 p250
- [8] Yang F X, Zhang D M, Deng Z W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3845 (in Chinese) [杨凤霞, 张端明, 邓宗伟 2008 物理学报 **57** 3845]
- [9] Yuminaka, Yamamura 2007 *Multiple-Valued Logic IEEE Oslo*, May 13–16, 2007 p26
- [10] Horace Cheng, Anthony Chan Carusone Member 2008 *Custom Integrated Circuits Conference San Jose CA* September 21–24, 2008 p635
- [11] Jan-Rutger (J. H. R.) Schrader, Eric A. M. Klumperink, Jan L. Visschers, Bram Nauta 2006 *Custom Integrated Circuits Conference San Jose CA* p591
- [12] Yuminaka, Takahashi 2008 *Multiple Valued Logic* p20
- [13] Yuminaka, Henmi 2010 *Communications and Information Technologies Tokyo*, October 26–29, 2010 p1103

A method of adaptive pulse width modulation for multiple-valued data transmission^{*}

Sun Hua-Juan[†] Yan Xiao-Hong Hao Xue-Yuan

(College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(Received 27 June 2014; revised manuscript received 27 August 2014)

Abstract

The non-ideal characteristics such as dielectric loss and skin effect of coaxial cables etc can cause attenuation of the high-frequency component of the signals, making it difficult for the receiver to interpret the signal, thereby greatly reducing the data rate. Pulse width modulation (PWM) pre-emphasis technique, which has been very good to use in the binary signal, utilizes time-domain information processing to increase the data rate. We introduce the new adaptive PWM pre-emphasis method to further eliminate the data-dependent jitter, which can dynamically compensate for the transmission loss of multiple-valued data with strong or weak pre-emphasis. The results of eye diagrams show that this method can improve the quality of signal transmission.

Keywords: pulse-width modulation, multiple-valued data, data transmission, pre-emphasis

PACS: 84.40.Ua, 84.30.Sk

DOI: [10.7498/aps.64.018402](https://doi.org/10.7498/aps.64.018402)

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No.2011AA050526).

[†] Corresponding author. E-mail: jingxuansun@qq.com