

引用本文:樊庭冰,涂俊轩,庄济舟,等.基于OOK调制的可见光通信视频传输系统[J].光通信技术,2024,48(3):84-88.

基于 OOK 调制的可见光通信视频传输系统

樊庭冰^{1,2,3,4},涂俊轩^{1,2,3,4},庄济舟^{1,2,3,4},倪慧琳^{1,2,3,4},秦琳玲^{1,2,3,4},吴绍龙^{1,2,3,4*},李孝峰^{1,2,3,4}

(1.苏州大学 光电科学与工程学院,江苏 苏州 215006;2.苏州大学 苏州纳米科技协同创新中心,江苏 苏州 215006;

3.江苏省先进光学制造技术重点实验室,江苏 苏州 215006;4.教育部现代光学技术重点实验室,江苏 苏州 215006)

摘要:为了降低可见光通信(VLC)系统的误码率,设计了一种基于二进制开关键控(OOK)调制的 VLC 视频传输系统。该系统采用改进型 4B5B 编码,后均衡放大电路改善了系统误码性能,拓展了系统的 -3 dB 带宽,并在自适应阈值判决的基础上分析数据的相关性特征,实现了 OOK 解调。实验结果表明:系统可以在 2 m 的距离下实现 1 080 P 高清视频的实时、无失真传输;当传输速率为 60 Mb/s 时,改进型 4B5B 编码能将系统无编码时的误码率由 2.2×10^{-2} 降低至 2.81×10^{-6} 。

关键词:可见光通信;开关键控;4B5B 编码;相关性分析;视频传输

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)03-0084-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.03.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Visible light communication video transmission system based on OOK modulation

FAN Tingbing^{1,2,3,4}, TU Junxuan^{1,2,3,4}, ZHUANG Jizhou^{1,2,3,4},

NI Huilin^{1,2,3,4}, QIN Linling^{1,2,3,4}, WU Shaolong^{1,2,3,4*}, LI Xiaofeng^{1,2,3,4}

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou Jiangsu 215006, China;

2. Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou Jiangsu 215006, China;

3. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Suzhou Jiangsu 215006, China;

4. Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Suzhou Jiangsu 215006, China)

Abstract: In order to reduce the bit error rate of visible light communication (VLC) systems, a VLC video transmission system based on binary on-off keying (OOK) modulation is designed. This system improves the system's bit error performance and expands the system's -3 dB bandwidth by using an improved 4B5B encoding and post-equalization amplification circuit, and realizes OOK demodulation by analyzing the correlation characteristics of the data based on adaptive threshold decision. The experimental results show that the system can achieve real-time, lossless transmission of 1 080 P high definition video at a distance of two meters. When the transmission rate is 60 Mb/s, the improved 4B5B encoding can reduce the bit error rate of the uncoded system from 2.2×10^{-2} to 2.81×10^{-6} .

Key words: visible light communication, on-off keying, 4B5B encoding, correlation analysis, video transmission

0 引言

由于二进制开关键控(OOK)具有调制解调复杂度

收稿日期:2023-12-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:62075146,62120106001)资助;江苏省自然科学基金项目(批准号:BK20231311)资助。

作者简介:樊庭冰(1998—),男,汉族,江苏徐州人,硕士研究生,现就读于苏州大学光电科学与工程学院电子信息专业,主要研究方向为可见光通信系统设计、基于FPGA的信号调制解调算法与编解码技术。

***通信作者:**吴绍龙(1985—),男,博士,教授,主要从事微纳光电转换器件及其可见光通信应用研究工作。



低、易实现等特点,因此在可见光通信(VLC)系统中得到了广泛应用^[1-6]。OOK的解调方式主要包括非相干解调、相干解调和基于机器学习(ML)的解调^[7]等。李知恒等人^[8]采用非相干解调方案,成功实现了VLC图传应用,同时保持了较低的系统复杂度。王许浦等人^[9]则利用TLV3501硬件判决电路与现场可编程门阵列(FPGA)时钟恢复电路完成了OOK的相干解调,并实现了3.125 Mb/s的实时通信速率。然而,在具体VLC视频传输应用中,非相干解调存在带宽利用率低、通信性能差的问题,难以满足实际需求;而硬件判决的相干

解调方案灵活性较差,抗干扰能力不足,不利于实现高速传输。ML 作为一种新型的解调方法,由于缺乏成熟的模型,因此实用性不足。针对以上问题,本文设计一种基于 OOK 调制的 VLC 视频传输系统,该系统采用自适应阈值判决和相关性分析解调方案,并结合改进型 4B5B 编码(下文简称 4B5B* 编码),旨在提升 VLC 实时视频传输系统误码性能。

1 视频传输系统设计

本文设计的基于 OOK 调制的 VLC 视频传输系统由发射端、可见光信道和接收端组成,系统框图如图 1 所示。其中,发射端和接收端所使用的 FPGA 型号均为 Altera Cyclone IV EP4C10F17C8N,光源采用 0.4 W 的绿光发光二及管(LED),而接收器则采用了硅基 PIN 探测器(型号为 Thorlabs PDA10A2)。在数据传输过程中,数/模转换器的速率为 125 MS/s,位宽为 8 bit;模/数转换器的速率则为 180 MS/s,位宽同样为 8 bit。传输系统基本工作原理如下:在发射端,上位机(PC_TXD)会实时采集和处理视频数据;然后,FPGA_TXD 会对这些数据进行缓存、编码和成帧操作;最后,FPGA_TXD 的输出信号由数/模转换器转换为模拟信号,并通过 LED 驱动电路驱动 LED 发光,从而完成数据发射。当数据到达接收端时,后均衡与放大电路将改善其信噪比,FPGA_RXD 负责数据采样、同步处理、阈值比较与解调,并将解调出的视频数据上传至 PC_RXD 进行显示。

此外,VLC 系统采用了帧同步方案,以确保数据传输的稳定性。数据帧结构如图 2 所示。当接收端捕捉到帧起始信息后,会调整时钟的频率与相位,从而准确地提取出同步时钟信号。

1.1 数据编码

PC_TXD 利用开源媒体软件 VLC Media Player 对网络摄像头捕获的视频数据进行实时压缩,并通过千兆以太网将这些数据通信传输至 FPGA_TXD。为了保



图 2 数据传输的帧结构

障 VLC 信道数据传输的稳定性,视频数据流首先被暂存于同步动态随机存储器(SDRAM)中,然后以固定速率进行读取。若直接将这些数据转换为串行数字基带信号进行传输,接收端的波形可能会产生明显的失真。为此,本文提出了一种 4B5B* 编码方案。这种方案在基于 OOK 调制的 VLC 视频传输系统中,取消了 4B5B 编码的反向编码机制,并对编码规则进行了适当的调整。具体的映射规则如表 1 所示。可以看出,经过 4B5B* 编码后,数据中的“1”的数量显著减少,且其连续出现的次数被限制在 2 次以内。尽管这可能导致一定程度的直流不平衡,但这种不平衡是可预测的,因此可以通过调整放大电路的参考电压来进行有针对性的优化。

表 1 4B5B 与 4B5B* 编码表

原始数据(H)	4B5B (B)	4B5B* (B)
0	11110	10000
1	01001	01100
2	10010	01001
3	10011	10110
4	01010	01000
5	01011	10100
6	01110	00100
7	01111	01010
8	10010	00010
9	10011	10001
A	10110	00101
B	10111	01101
C	11010	00001
D	11011	00110
E	11100	10010

注:H 代表十六进制,B 代表二进制。

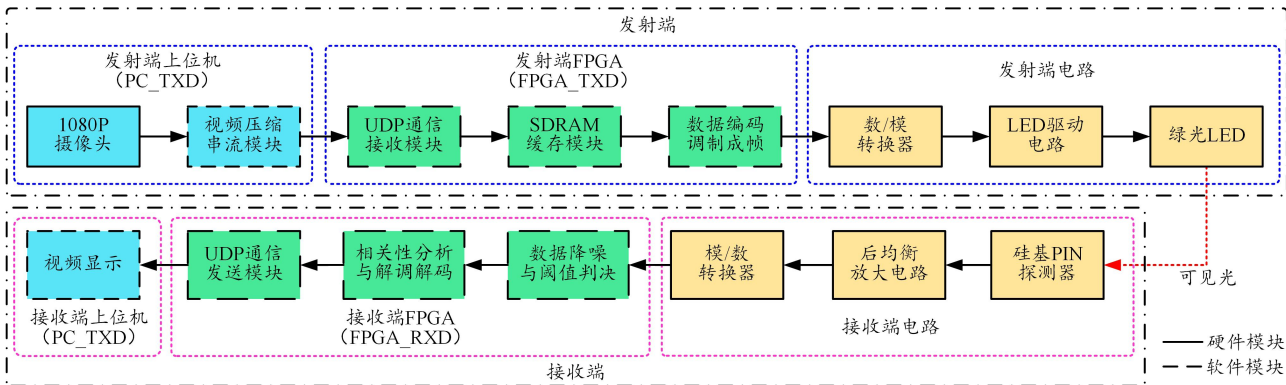
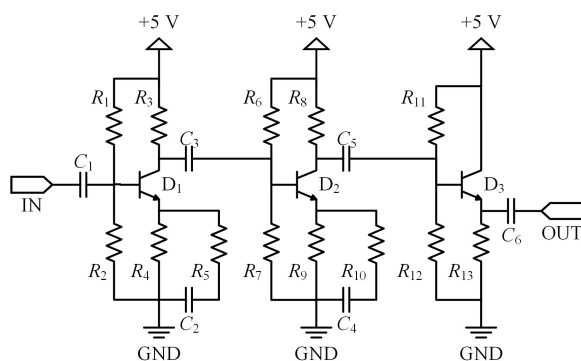


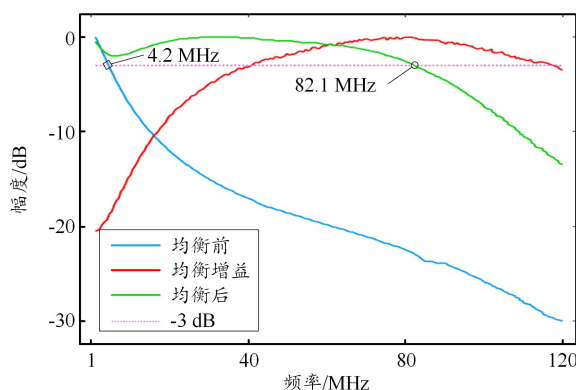
图 1 基于 OOK 调制的 VLC 视频传输系统框图

1.2 后均衡放大电路

由于商用LED带宽的限制,基于LED的VLC系统的电-光-电(EOE)带宽仅为数兆赫兹,难以满足视频传输的要求。为了解决这一问题,本系统在接收端引入了后均衡放大电路,以提高EOE带宽。后均衡放大电路的原理与带宽图如图3所示。图3(a)中,前2级为级联射极放大电路,用于补偿绿光LED、硅基PIN探测器等器件的高频衰落,并调整系统的频响特征;而后一级为射极跟随器,主要用于匹配电路阻抗。



(a) 后均衡放大电路原理图



(b) 后均衡前后的系统EOE带宽
图3 后均衡放大电路原理与带宽图

从图3(b)可以看出,系统的EOE带宽在经过均衡处理后,其-3 dB带宽从4.2 MHz提升至82.1 MHz,满足了视频传输的需要。

2 OOK信号处理

2.1 数据降噪

VLC系统受环境和硬件电路的影响,其模/数转换的输出通常是实际信号与噪声的混合。因此,在进行数据解调之前,必须对采样数据进行降噪处理。为了同时抑制随机噪声并保持清晰的阶跃响应特征,本系统采用了滑动平均滤波器,并确定了其最佳滑动窗口大小 $W^{[10]}$ 为

$$W = \frac{0.443 \times F_s}{f_{co}} \quad (1)$$

其中, F_s 是采样频率, f_{co} 是截止频率。将 $F_s=180$ MHz、 $f_{co}=20$ MHz代入式(1),得出窗口大小约为4。采样数据滤波输出前后的波形如图4所示。可以看出,滤波后噪声被有效抑制,信号波形也更加平滑,从而提高了解调的准确性。

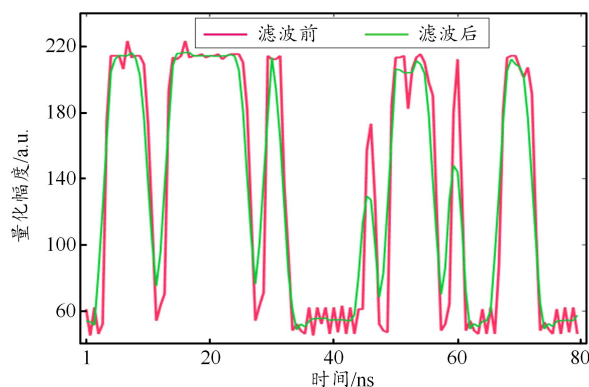


图4 滑动滤波前后波形对比图

2.2 采用自适应阈值方式进行门限判决

强度调制信号通常采用非相干解调,通过设定固定阈值或自适应阈值的方式进行门限判决。在OOK调制的VLC信道中,信号功率主要为码元“1”的功率,码元“0”的功率为0。设码元“1”与“0”的幅值分别为 A_1 与 A_0 ,默认2种码元等概率,则固定阈值 V_T 为

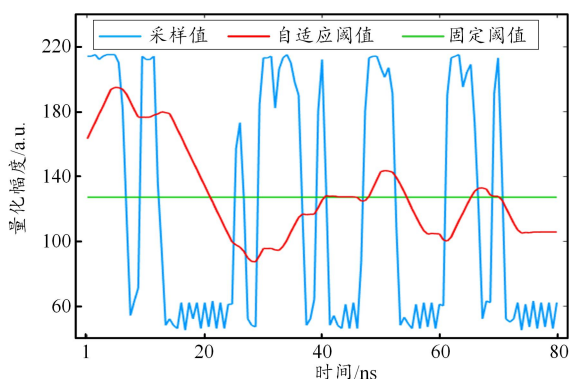
$$V_T = \frac{A_1 + A_0}{2} \quad (2)$$

由于固定阈值 V_T 仅由码元幅值决定,忽略了信道的动态变化,导致其灵活性较低,常常引发较高的误码率,进而限制了通信性能。相比之下,自适应阈值方式通过考虑信道的动态特性,并利用累计求平均的方法,使判决门限 V_A 能够随信号变化而调整,从而提高了通信的稳健性和性能。 V_A 表达式为

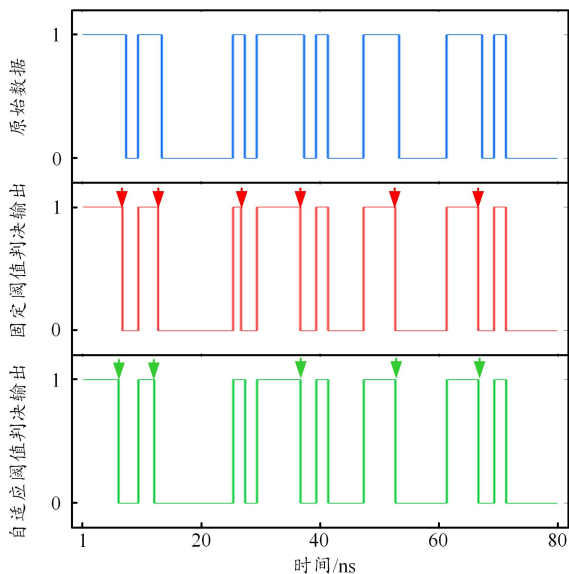
$$V_A = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^N S_k(t) \quad (3)$$

其中, n 是平均点数, N 是采样点数, $S_k(t)$ 是当前采样值, k 为 N 个采样点的序号。自适应阈值方式将 N 个采样值按顺序写入寄存器,采用滑窗方式计算平均值。当通信速率为50 Mb/s时,本文比较了2种判决门限与判决结果的差异,如图5所示。

从图5(a)可以看出,自适应阈值相较于固定阈值具有更高的灵活性。然而,当采样数据长时间保持在某一范围内时,自适应阈值可能会出现过拟合的情况,从而导致码元误判。图5(b)中,蓝色和绿色箭头标



(a) 2种阈值曲线



(b) 2种阈值判决输出

图5 2种阈值门限与输出对比

示了判决输出与原始数据之间的差异。可以看出,尽管2种阈值判决方式都存在高电平位置与持续时间误判的现象,但总体来说,自适应阈值的性能优于固定阈值。因此,本文选择了自适应阈值判决方式。然而,随着通信速率的提升,波形失真问题(如零点漂移、脉冲展宽等)逐渐凸显,这使得固定阈值和自适应阈值判决的输出错误率都显著增加。在这种情况下,如果直接采用同步采样解调方式,可能会导致较高的误码率,难以满足视频传输等高速应用的需求。因此,为了有效控制和降低系统的误码率,需要进一步优化解调方式。

2.3 相关性分析解调

本文从互相关性角度出发,基于阈值判决分析判决数据与原始数据的相关性特征,对OOK解调方式进行优化。具体过程如下:

对于OOK的某一确定符号 s ,在进行模/数变换时,由于采样定律的影响,会对其进行大于2次的采

样,从而产生相应数量的采样值。假设单个符号采样后产生 p 个采样值,那么进行阈值比较会得到对应数量的离散0/1序列,本文将这一序列称为 $s_r(n)$ 。此外,本文还定义了另一个序列 $s_i(n)$,它包含 p 个重复的原始数据。对于序列 $s_i(n)$ 与 $s_r(n)$,二者的互相关性^[11]由式(4)给出。

$$r_{s_i s_r}(i) = \begin{cases} \sum_{n=i}^{p-1} s_i(n) s_r(n-i), & i=0, 1, \dots, p-1 \\ \sum_{n=0}^{p-1-|i|} s_i(n) s_r(n-i), & i=1-p, 2-p, \dots, -1 \end{cases} \quad (4)$$

当 $r_{s_i s_r}(i)$ 有最大值时,表明序列 $s_i(n)$ 与 $s_r(n)$ 相似度最大。此时,依据实际情况设置某一确定阈值,当 $r_{s_i s_r}(i)$ 最大值大于该值时,即认为 $s_i(n)$ 与 $s_r(n)$ 相等,从而实现信号的解调。由于非归零(NRZ)-OOK仅包含2种字条:0和1,所以 $s_i(n)$ 的元素只能为全0或全1。当 $s_i(n)$ 为全0序列时, $r_{s_i s_r}(i)$ 的值恒为0,无法反映真实的互相关特性。因此,本文仅考虑 $s_i(n)$ 为全1的情况。

当 $s_i(n)$ 元素均为1时, $r_{s_i s_r}(i)$ 反映 $s_r(n)$ 与1的相关度,因而可以通过 $r_{s_i s_r}(i)$ 判定符号 s 是否为1,修正阈值比较的输出结果。将 $s_i(n)$ 代入式(4),此时 $r_{s_i s_r}(i)$ 最大值恰好与 $s_r(n)$ 的元素之和一致,其结果等价于

$$R_m = \sum_{n=1}^p s_r(n) \quad (5)$$

其中, R_m 为 $r_{s_i s_r}(i)$ 的最大值。

在本视频传输系统中,由于模/数转换器件的限制, p 的取值与VLC系统所能实现的最高通信速率呈负相关。为了确保通信质量和速率,本文所设计的系统中 p 的取值为3。根据阈值比较输出的结果,采用修正原则,以满足式(6)的要求。

$$\hat{s} = \begin{cases} 1, & R_m \geq 2 \\ 0, & R_m < 2 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\hat{s}$ 是符号 s 的解调值, R_m 阈值的选取考虑了高速传输时信号的脉冲展宽的影响。

经过相关性分析解调处理的数据与原始数据保持了高度一致性,因此,为了更好地配合4B5B*编码,本文特采用了自适应阈值判决与相关性分析解调相结合的方案。

3 系统测试

3.1 视频传输系统测试

本文搭建的VLC视频传输系统实物图如图6所



图6 VLC视频传输系统实物图

示。经过测试验证,在2 m的通信距离内,本系统能够实现1 080 P高清视频的实时、无失真传输。

3.2 通信质量测试

为了分析系统的通信性能,本文研究了不同通信速率时系统的误码率情况。测试条件如下:FPGA_TXD通过VLC、有线传输2种方式同时发送随机数据,FPGA_RXD接收数据后对比并统计2种传输方式的误码情况。当接收到特定量的数据后,FPGA_RXD会将误码数据通过串口发送至Labview软件,后者会实时计算平均误码水平,并绘制出同步采样解调与相关性分析解调的平均误码率随通信速率的变化情况图,如图7所示。可以看出,在相同的通信速率下,采用本文提出的相关性分析解调方案时的误码率更低。

除此之外,本文比较了无编码、4B5B与4B5B*编码的OOK VLC系统在10 min内的平均误码率情况,如图8所示。可以看出,随着通信速率的提高,系统误码率逐步增加,但有编码的系统误码率更低。其中,当通信速率为60 Mb/s时,无编码、4B5B与4B5B*编码的系统误码率分别为 2.2×10^{-2} 、 3.26×10^{-4} 、 2.81×10^{-6} ,其中4B5B与4B5B*编码的系统误码率均低于前向纠错(FEC)阈值 3.8×10^{-3} ,符合端到端通信的误码要求。

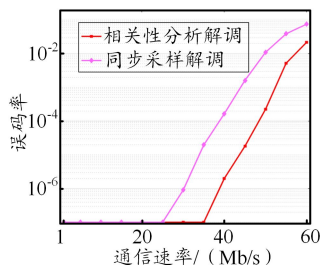


图7 2种解调方案的误码对比情况

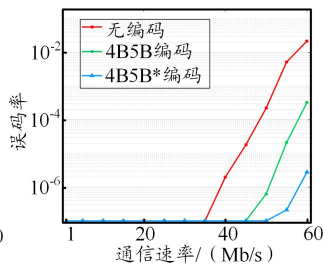


图8 3种编码方案的误码率对比情况

4 结束语

本文设计了一种基于OOK调制的VLC视频传输

系统,通过采用自适应阈值判决方式与相关性分析解调方案,显著降低了系统误码率。系统可以在2 m的距离下实现1 080 P高清视频的实时、无失真传输;当传输速率为60 Mb/s时,4B5B*编码能将系统无编码时的误码率由 2.2×10^{-2} 降低至 2.81×10^{-6} 。通过优化电路设计,本文成功将系统的-3 dB带宽扩展至82.1 MHz,这一研究成果对于推动基于LED的VLC技术在高速通信领域的应用及市场化推广具有积极意义。

参考文献:

- [1] LU C, WANG J, LI S, et al. 60M/2.5 Gbps underwater optical wireless communication with NRZ-OOK modulation and digital nonlinear equalization[C]//IEEE. Proceedings of 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose: IEEE, 2019: 1-2.
- [2] 韩中达,赵黎,王栋,等.兼顾照明的可见光流媒体信息传输装置研究[J].激光杂志,2020,41(7):128-132.
- [3] 董德壮,万生鹏,尹玺,等.基于双路发送的可见光语音视频混合传输[J].光通信技术,2020,44(12):25-28.
- [4] 龚从安,胡芳仁,赵晓燕,等.基于OOK调制的水下高速激光通信系统设计与实现[J].光通信技术,2023,47(1):13-16.
- [5] JIN J, LU H, WANG J, et al. Adaptive feedback threshold based demodulation for mobile visible light communication and positioning integrated system[J]. Optics Express, 2022, 30(8): 13331-13344.
- [6] WANG Y, CHEN X, XU Y. Transmitter for 1.9 Gbps phosphor white light visible light communication without a blue filter based on OOK-NRZ modulation[J]. Optics Express, 2023, 31(5): 7933-7946.
- [7] MA S, DAI J, LU S, et al. Signal demodulation with machine learning methods for physical layer visible light communications: prototype platform, open dataset, and algorithms[J]. IEEE Access, 2019(7): 30588-30598.
- [8] 李知恒,周锋,杨文俊.一种光通信数字图像传输系统的设计与实现[J].电子测量技术,2022,45(16):171-175.
- [9] 王许浦,孙晓红,薛琦.基于FPGA的OOK可见光通信系统仿真与实现[J].现代电子技术,2020,43(17):25-28,33.
- [10] 高西全,丁美玉.数字信号处理[M].第4版.西安:西安电子科技大学出版社,2016.
- [11] 管致中,夏恭恪,孟桥.信号与线性系统[M].第6版.北京:高等教育出版社,2015.