

基于 LED 可见光的通信系统设计

綦振禄¹
QI Zhenlu

摘要

可见光通信是利用可见光作为传输介质的一种新兴通信方式，LED 可见光通信利用 LED 照明设备发出的肉眼观察不到的高速调制光波信号，对信息进行调制和传输。文章探讨了一种利用可调稳压器集成电路，采用幅度调制（AM）的电路设计思路，用单音信号直接调制 LED 光信号强度，实现了一种精简的基于 LED 可见光的通信系统设计，在传输效能、复杂度等方面具有优势。

关键词

可见光通信；三端可调稳压器；幅度调制；数字调制；发光二极管

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.020

0 引言

可见光通信（visible light communication, VLC）是一种利用可见光波段（波长介于 380~780 nm 之间）作为传输媒介的创新通信技术^[1]。这种通信方式常被称作“LiFi”，预示着其可能对现有的无线网络传输技术，特别是 Wi-Fi，产生深远的影响^[2-3]。与传统无线射频通信相比，VLC 使用未被传统无线电通信占用的频谱资源，从而避免了获取频谱许可的需求。此外，VLC 系统具备多项优势，包括强大的抗干扰能力、宽广的光谱频段、高通信速率、无电磁干扰以及优良的安全性和保密性。同时相较于无线红外和紫外通信系统，VLC 在

信号功率方面更高，且不存在健康安全风险^[4]。2013 年，上海复旦大学的研究人员成功开发出一项国际前沿技术，该技术能够使用室内可见光传输网络信号，并且达到了 3.5 Gbit/s 的数据传输速率^[5]。

作为第四代照明光源的 LED，凭借其高亮度、低能耗、长寿命、小型化以及环保特性，在全球照明市场的比重逐年增长。LED 的高亮度和低能耗使其成为室内可见光通信（VLC）系统的理想光源，逐渐受到广泛关注。基于 LED 的 VLC 系统通过高速调制 LED 光源发出的可见光信号来传输信息，已经成为当前研究的热点领域之一^[6]。

本文提出了一种基于常规三端稳压器电路的 LED 可见光通信系统设计方案，采用幅度调制（AM）方法，直

1. 公安部第一研究所 北京 100048

[3] LI T, XIA T, WANG H D, et al. Smartphone App usage analysis: datasets, methods, and applications[J].IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(2): 937-966.

[4] PENG Y R, CHEN Y T, SHEN B J. An adaptive approach to recommending obfuscation rules for Java bytecode obfuscators[C]//2019 IEEE 43rd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC). Piscataway: IEEE, 2019, 1: 97-106.

[5] YOU G, KIM G, CHO S J, et al. A comparative study on optimization, obfuscation, and deobfuscation tools in android[J].Journal of internet services and information security, 2021, 11(1): 2-15.

[6] LENGAUER P, BITTO V, MOSSENBOCK H, et al. A comprehensive java benchmark study on memory and garbage collection behavior of dacapo, dacapo scala, and SPEC-

jvm2008[C]//Proceedings of the 8th ACM/SPEC on International Conference on Performance Engineering. New York: ACM, 2017: 3-14.

[7] MIUI Team. MIUI file explorer[EB/OL]. [2024-05-10]. <https://github.com/MiCode/FileExplorer>.

[8] MIUI Team. MIUI sound recorder[EB/OL]. [2024-05-10]. <https://github.com/MiCode/SoundRecorder>.

[9] MIUI Team. MIUI notes[EB/OL]. [2024-05-10].<https://github.com/MiCode/Notes>.

【作者简介】

周少杰（1998—），男，浙江绍兴人，硕士，研究方向：大数据审计和区块链审计。

（收稿日期：2024-11-26）

接调制 LED 光信号强度。与先前方法不同的是,本方案并非通过高速切换 LED 灯来传递信息,而是利用直流电源中的纹波电压携带原始信号。当波动引起光强轻微改变时,这种变化由光电探测器捕获并转换为原始信号。该方案的主要优势在于间接的电-光调制电路结构设计,具体实现中,发送端仅需使用一个可调节的三端稳压器即可实现功能。

1 可见光通信技术分析

可见光通信系统由 3 个主要组件构成,即发射端、传输信道及接收端。在发射过程中,原始数据经过编码和调制处理后,通过驱动电路激发光源产生光信号。这些快速变化的光信号通过信道传递到接收端,接收端首先通过滤波器去除杂散光,然后光电转换电路将光信号转换为电流信号,再进一步转换为电压信号。最终通过解调和解码过程,恢复出原始数据。常见的可见光通信方式是通过高速闪烁的灯光来发送信息,其中灯光亮表示二进制“1”,熄灭表示“0”。由于这种闪烁频率极高,人眼难以察觉到,但光电探测器可以准确识别这些变化以解析信号。如图 1 所示。



图 1 可见光通信系统示意图

生活中,人工照明设备根据其工作原理主要被分类为 3 种类型。首先是白炽灯,这种灯具通过电流加热钨丝至高温,使其发光。尽管调节流经钨丝的电流可以改变亮度,但由于其依赖热能转换光能的特性,导致响应时间较长,因此不适用于快速信号传递场合。

随后发展起来的是荧光灯和节能灯技术,它们利用电子从加热后的灯丝释放并通过气体(通常为水银蒸气)时产生的紫外线来激发涂覆于管壁内部的磷光物质而发出可见光。此类光源启动需要较高的初始电压以穿透气体介质,并且其电路设计较为复杂,目前尚未广泛应用于可见光通信领域作为有效载波。

在当前照明技术的发展趋势中,LED 光源作为一种新兴的电致发光半导体材料,正逐渐获得广泛应用。该技术基于 PN 结构,通过施加特定电流使其发光,且光强随着电流的增加而增强。作为半导体器件的一种,LED 能够在高频开关状态下稳定工作,其响应速度与其他半导体器件相似^[7]。从对各种光源发光机制的分析可以得出,LED 发光二极管是满足特定要求的理想选择。在本设计方案中,采用 LED 灯作为

信息传输的光源。

在数字通信领域,数字电路因其低功耗、高稳定性和强抗干扰能力成为众多电子设备的首选。针对 LED 可见光通信系统,发射端通过控制 LED 的闪烁来传输二进制数据“0”和“1”。这种闪烁包含亮度、频率和亮暗时长等参数,与其他数字通信系统中的信号幅度、频率及占空比相似。因此,研究者们将其他数字通信系统中的调制技术应用于可见光通信系统^[8-9]。国际上常用的可见光通信调制方法包括二进制振幅键控(2ASK)、二进制频移键控(2FSK)、二进制相移键控(2PSK)、二进制脉冲位置调制(PPM)和正交频分复用(OFDM)。以上调制技术比较复杂,成本高、稳定性不佳,且实现的可见光传输并非基于室内照明环境的,而是特定的点对点的可见光传输。

本文提出一种基于 LED 可见光的通信系统设计,为了简化电-光调制电路结构,设计者未使用复杂的 A/D 转换、数字编码和数字调制电路。相反,通过巧妙利用单片三端可调稳压器来实现信号调制,发送端通过单音信号调制 LED 照明灯的发光强度,通过可见光强度变化实现信号发送。接收端由光电转换模块接收光信号,通过低噪声信号放大电路实现可见光高保真传输信号的功能。这种简单的模拟电路设计具有稳定可靠、成本低、信号室内覆盖范围宽等优点,可支持低速率的可见光通信系统。

2 方案设计

在本设计方案中,采用 LED 灯作为信息传输的光源,通过单片三端可调稳压器实现原始信号的调制,具体设计框架如图 2 所示。

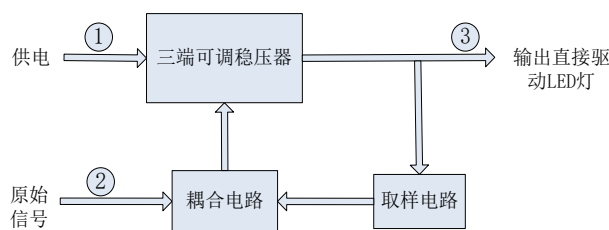


图 2 三端稳压器实现电-光调制

在该方案中,三端稳压器的两个输入端分别为直流工作电压和原始信号耦合电路,直流工作电压给 LED 灯施加一定的直流工作电压,使 LED 灯达到正常的亮度状态,类似于三极管放大器电路的基极偏置电压,此时 LED 灯上的电压信号如图 3(a)所示。三端可调稳压器的调整端信号来自取样电路,稳压器的输出电压会跟随调整端电压改变而改变。此时若将原始信号通过电容耦合到稳压器的调整端,原始信号如图 3(b)所示。当稳压器的调整端受到叠加的原始信号的激励后,稳压器的输出端将不再是稳定的直流电

压，而是带有显著纹波的直流电压，纹波便承载了原始信息如图 3（c）所示。

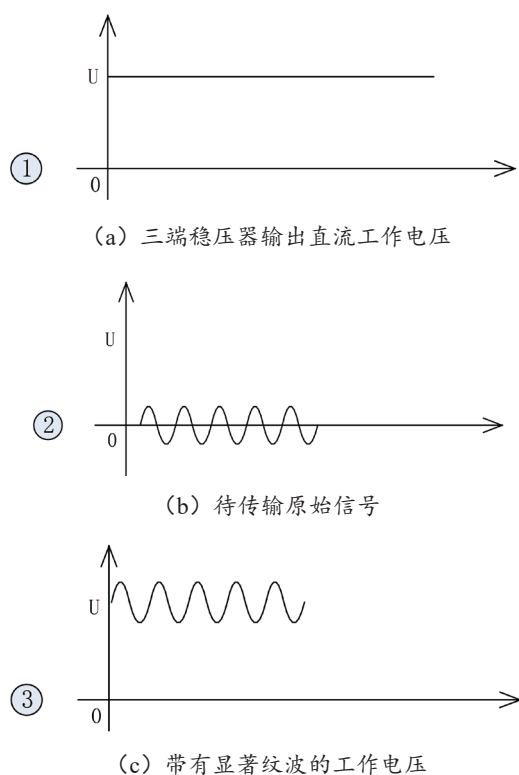


图 3 LED 灯驱动电压调制原理

用带有纹波的直流电压直接驱动 LED 灯，LED 灯会在正常亮度基础上跟随纹波电压大小而改变^[10]。因此，本设计实质上是给 LED 灯施加一个带有特定纹波的直流电压，这个特定纹波的波形实际就是要传输的原始信号。这样，LED 灯的亮度变化就反映了所传输的原始信号。

3 电路设计

3.1 芯片选型

三端可调稳压器具有多种类型，尽管其输出功率各不相同，但调整原理大体相同。以 LM317 为例，这是一种典型的三端可调稳压器。其内部电路示意图如图 4 所示。

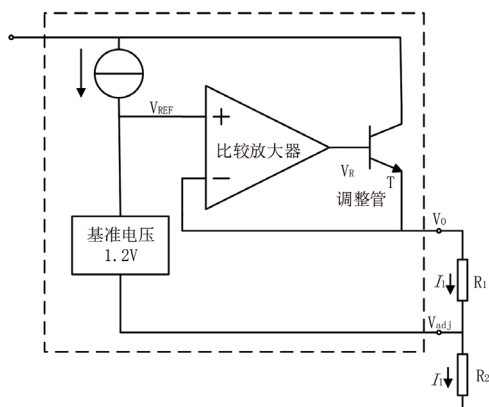


图 4 三端可调稳压器集成电路内部示意图

从上述电路图分析可知，该电路的核心组件包括比较放大器、恒流源以及带隙基准电压 V_{REF} 等。电路设计中，公共端被重新连接到输出端，且器件本身并未设有接地端。因此，所有电流均通过输出端流出。内部设定的基准电压（大约 1.2 V）连接在比较放大器的同相输入端与调节端之间。当外部接入调整电阻 R_1 和 R_2 时，输出电压表示为：

$$V_O = V_{REF} + \left(\frac{V_{REF}}{R_1} + I_{adj} \right) R_2 = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{adj} R_2 \quad (1)$$

式中：LM317 的 $V_{REF}=1.2$ V， $I_{adj}=50$ mA，因调整端电流 $I_{adj} \ll I_1$ ，故可以忽略，式（1）可简化为：

$$V_O = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2)$$

因此可以得出，三端可调稳压器（LM317）的输出电压幅度由 R_1 和 R_2 的分压决定，这两个电阻叫作取样电路，稳压器的输出电压 V_O 经 R_1 和 R_2 分压后得到调整信号电压 V_{adj} ，调整电压反馈给稳压器的调整端，该信号经内部的误差比较放大器后再控制调整管 T ，从而控制输出端得到稳定的直流电压 V_O 。若将 R_1 和 R_2 的分压看作变量 X ，输出电压可简化为：

$$V_O = V_{REF} + V_{REF} \times X \quad (3)$$

则 $V_{\Delta} = V_{REF} \times X_{\Delta}$ ，即输出的变化量与分压变化量成线性正比关系，基于此原理，通过调整分压点上的电压，可以有效地调控三端稳压器的输出电压幅度。

3.2 电路原理设计

经过对三端可调稳压器（LM317）内部电路的详细分析，可以发现，通过调整输入信号电压 V_{adj} 的大小，能够精确控制输出电压。在本项设计中，利用电容器将原始信号耦合至稳压器的调节端口，并细致调节信号幅度。这样做的目的是确保稳压器输出电压变化幅度适中，避免因 LED 灯光亮度产生明显的视觉波动^[11]。但通过光电探测器仍能感知到灯光亮度的细微变化，从而捕捉到由 LED 灯发出的原始信号中的交流成分。

基于三端可调稳压器的幅度调制电路结构如图 5 所示，由于单颗 LED 灯珠工作电压大约为 3 V，电流为 60 mA，为兼顾日常照明效果，光源电路采用 4 颗 LED 串联，4 串 LED 灯再并联的方式，因此光源所需工作电压应为 12 V，电流为 240 mA，总功耗大约 3 W。图 5 中三端稳压器输入电压为 15 V，稳态输出电压为 12 V，可以正常点亮四颗 LED 灯珠。当通过电容 C3 施加原始信号激励时，LED 灯上的电压在 12 V 附近产生相应的波动。接收端通过光电探测器可以监测到这个波动，从而解调出原始信号。

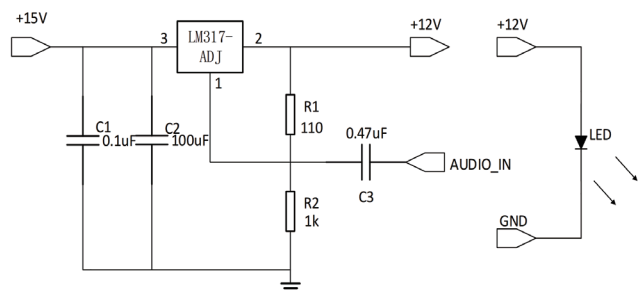
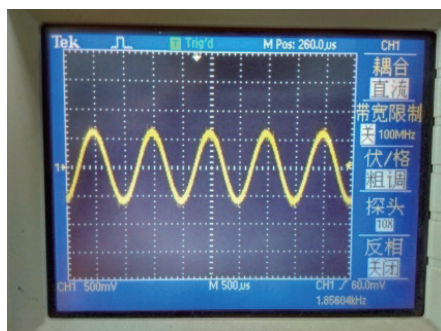


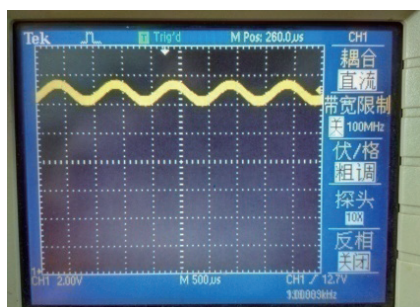
图5 基于三端稳压器的幅度调制电路设计

3.3 电路实验

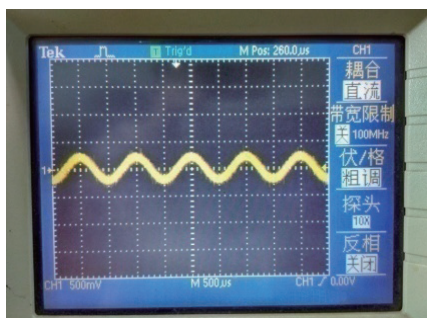
基于以上电路设计,搭建了具体调试电路,电路加电后,LED灯即点亮,如图6所示。图6(a)为通过AUDIO_IN端输入幅值为1V的交流信号。图6(b)为利用示波器在三端稳压器的输出端观察到带有相应调制频率纹波的直流电压。在接收端通过光电探测器接收LED光束,图6(c)为光电探测器输出信号滤除直流分量后直接解调出的原始信号。



(a) 输入激励信号



(b) 调制输出波形



(c) 光电探测器输出波形

图6 信号调制解调测试结果

4 结论

本文采用最精简的电路搭建了基于LED可见光的通信系统,其本质是一种调幅调制方式,利用三端可调稳压器输出端变化量与调整端的变化量成线性比例关系,将原始信号的变化转换为三端稳压器输出电压的变化,进而驱动LED灯产生相应的明暗变化。这一过程实现了信号以光为传输介质进行传输,是一种低成本的微型可见光通信系统。

参考文献:

- [1] 薛德宽,黄兴洲,位浩杰,等.基于LED可见光通信的音频传输演示仪[J].物理通报,2015(8):82-85.
- [2] 张欢.可见光全双工通信系统设计[D].西安:西安理工大学,2018.
- [3] 丁德强,柯熙政.可见光通信及其关键技术研究[J].半导体光电,2006(2):114-117.
- [4] 张晨亮,苏学军,王文,等.基于白光LED的可见光通信系统研究[J].光通信技术,2015,39(5):44-46.
- [5] 刘冰,薛德宽,黄兴洲,等.LED可见光模拟通信实验系统的设计[J].电声技术,2015,39(9):37-41.
- [6] 臧景峰,朴燕,宋正勋,等.基于白光LED照明光源的室内VLC系统[J].发光学报,2009,30(6):877-881.
- [7] 徐佐,徐宁,马正北.大功率白光LED室内可见光通信系统研究[J].光通信技术,2015,39(10):39-40.
- [8] 陈治平.可见光并行通信系统及相关技术研究[D].南京:南京邮电大学,2012.
- [9] 邓健志,孙科壮,程小辉.LED路灯可见光通信模型的研究[J].光通信技术,2020,44(5):53-57.
- [10] 傅文博,张杰.考虑节点安全的可见光通信系统设计[J].激光杂志,2019,40(10):152-155.
- [11] 钟海泉,叶韩,雷喻然,等.基于室内LED照明光的无线音频信号传输装置的研究[J].山西电子技术,2019(5):85-87.

【作者简介】

慕振禄(1976—),男,山东青岛人,硕士,副研究员,研究方向:音视频信号采集传输、嵌入式系统设计、网络数据安全传输等。

(收稿日期:2024-11-27)