

可见光通信的光角度选择性合并分集接收系统研究

阮巍,杜志华,陈谱望,王德戌,郝宏刚*

(重庆邮电大学 光电工程学院,重庆 400065)

摘要:针对可见光通信系统中由多径效应引起的信道衰落和接收端被遮挡造成的通信中断问题,采用分集接收技术作为解决方案来提高通信质量。考虑到接收机复杂度和系统实现的性能代价比,首先引入了处理相对简单但又具备分集优势的选择性合并方式,其次通过对选择合并方式的支路数目分析,设计了4路选通电路作为分集接收的信号处理电路,最后完成了电路仿真和实物测试。测试结果表明:与未加分集电路接收装置的接收系统相比,采用分集接收技术后信噪比(SNR)提高了10 dB。

关键词:可见光通信;分集接收技术;信噪比

中图分类号:TN929.12 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)01-0044-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on optical angle selective combination diversity receiving system for visible light communication

RUAN Wei, DU Zhihua, CHEN Puwang, WANG Dexu, HAO Honggang*

(College of Electronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to solve the problem of channel fading caused by multipath effect and communication interruption caused by occlusion of receiver in visible communication system, the diversity receiving technique was employed as the solution to improve communication quality. Considering the complexity of the receiver and the performance-cost ratio of the system implementation, the selective combination treatment which is relatively simple but also has the advantage of diversity was introduced at first. Secondly, after analyzing the number of branch selection combining mode, 4-road gate circuit was selected as diversity receiving signal processing circuit. Finally, the circuit simulation and physical testing was completed. The results show that the diversity receiving technique increases 10 dB signal to noise ration (SNR) of the receiver as compared with the receiving system without diversity circuit receiving device.

Key words: visible light communication; diversity receiving technique; signal to noise ration

0 引言

室内可见光通信系统主要由信号调制编码、光源发射、传输和接收系统等部分组成。其中,接收系统作为室内可见光通信系统的重要环节,其性能在很大程度上决定了整个系统的优劣^[1]。由于多径效应引起的

码间干扰^[2]和信道衰落对通信系统的影响较大,并且室内人员的走动可能会引起通信系统中断,导致通信系统稳定性能差^[3,4],信号质量下降。因此,减轻信道衰落影响,提升可见光通信系统性能成为未来研究的重点方向。

目前,分集接收技术^[5]是解决这一问题的主要技术,通过对系统接收到的多路信号进行合并处理来减弱衰落,常用的合并方式有选择式合并^[6]、最大比值合并^[7,8]和等增益合并^[9]。文献[7]基于多输入输出(MIMO)技术和分集接收技术搭建了发光二极管(LED)系统,采用最大比值合并的分集接收方法,分析了灯间距、半角功率的选择对可见光通信系统的误码率的影响。文献[9]针对自由空间光通信系统任意分集复合衰落

收稿日期:2019-05-06。

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800639)资助。

作者简介:阮巍(1982-),男,贵州安顺人,硕士,讲师,现任职于重庆邮电大学光电工程学院。主要研究方向为无线通信技术;主持或参加国家自然科学基金项目、省部级科研基金项目6项,发表学术论文5篇,申请发明专利3项。

*通信作者:郝宏刚(E-mail: haohg@cqupt.edu.cn)。



信道和指向性误差对接收性能产生影响的问题,采用等增益合并方式的分集接收技术进行了分析研究和评估。但大多文献在对可见光通信系统的分集接收方案上并没有考虑接收端的复杂度。其中,最大比值合并方式的分集接收复杂度最高;等增益合并方式的复杂度相对较低,但会把被中断信号内的杂光与未被中断的信号直接合并,降低输出信号的信噪比(SNR)。因此,设计出符合性能要求并且花费较低的分集接收系统是可见光通信技术得以广泛应用的关键。本文采用选择合并方式对接收的信号进行处理,既可以避免信道中断,又能防止 SNR 下降,电路结构简单。

1 光角度分集接收技术

分集接收技术的基本原理为:在通信系统接收端添加分集接收装置对自由空间中的光信号进行多路采集,然后将采集到的各路信号进行合并处理后输出,进而获得较高的系统 SNR。为研究光角度分集接收技术,本文首先对接收机的前端模块进行分析和设计,包括分集支路数目的确定、光电探测器的布局、信号读取电路和分集接收检测电路的设计。

1.1 光角度分集接收的支路数目分析

可见光通信系统接收到多路信号之后,需要对接收信号进行合并处理,考虑到实现的复杂度,本文采用选择式合并方式对接收到的信号进行处理。选择式合并将检测到的所有支路信号进行比较,将信号强度最大的一路信号作为最佳信号进行输出,其工作框图如图 1 所示。

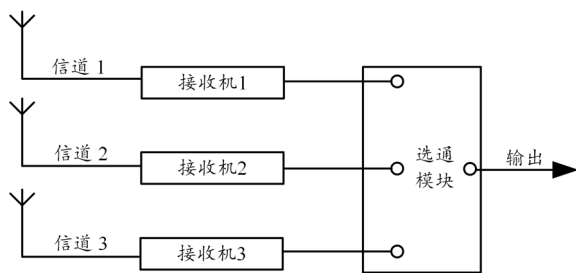


图 1 分集接收原理框图

在分集接收选择式合并方式中,SNR最高的支路将被作为输出信号。令第 k 条支路的信号功率为 $r_k^2/2$,噪声功率为 N_k ,则其信噪比 γ_k 可表示为:

$$\gamma_k = \frac{r_k^2}{2N_k} \quad (1)$$

为保证接收机的信号输出质量,支路中的 SNR 需要达到一定的门限值,设这个门限值为 γ_t 。只有当所有

的支路的 SNR 都小于门限值 γ_t 时,通信才会失败。令 $\gamma_k < \gamma_t$ 的概率为 $P_M(\gamma_k < \gamma_t)$,则通信系统存在 M 条支路被中断的概率由式(2)表示,并由式(2)得到 M 重分集选择式处理的可通过率 T 如式(3)所示。

$$P_M(\gamma_s < \gamma_t) = (1 - e^{-\gamma_t/\gamma_0})^M \quad (2)$$

$$T = P_M(\gamma_s > \gamma_t) = 1 - (1 - e^{-\gamma_t/\gamma_0})^M \quad (3)$$

其中, γ_s 为所有的支路的 SNR, γ_0 为信号的平均 SNR。

由于 $(1 - e^{-\gamma_t/\gamma_0})$ 小于 1,所以 $\gamma_t < \gamma_0$ 为确定值时,分集重数 M 越大,则信号的通过率 T 也相应变大,根据式(3)得到选择式合并器输出 SNR 的累计概率分布曲线如图 2 所示。

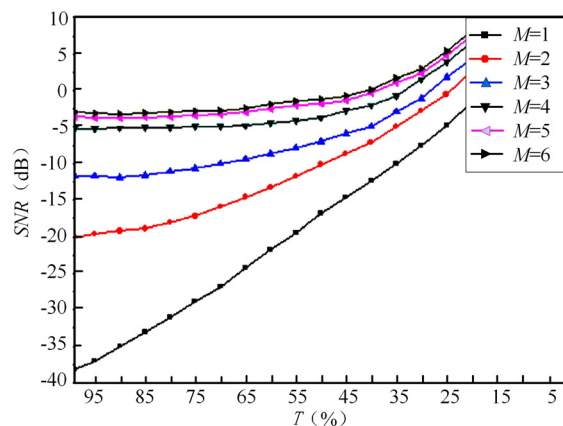


图 2 选择式合并 SNR 累计概率分布曲线

从图 2 可以看出,当支路数 $M \geq 4$ 时,随着分集接收支路数目的增加,所得 SNR 增益的变化不大。而过多的支路数目将增大后续处理电路的工作难度,同时加大系统搭建成本。为此,本文将分集接收的支路数定为 4 个。

1.2 光角度分集接收探测器的布局

为了使可见光通信系统的接收性能达到最优,本文对光电探测器在接收端的位置分布进行研究。接收端中单个光电探测器接收到的光功率可由式(4)表示。其中, A_d 是光电探测器的探测面积; D_{dl} 是探测器到光源的距离; $g(\varphi)$ 为光聚能增益; $T_s(\varphi)$ 代表滤波增益; φ 是入射角的角度; ϕ 是光源放射光线对于放射法线的角度; m 表示发光二极管(LED)光源的辐射模式,由于同一个白光 LED 的半值角是确定的,即不同的光电探测器 m 相同。因此,下个光电探测器处接收到的光功率用式(5)表示:

$$H_1(0) = \frac{(m+1)A_d}{2\pi D_{dl}} \cos^m(\phi_1) g(\varphi_1) T_s(\varphi_1) \quad (4)$$

阮巍,杜志华,陈谱望,等:可见光通信的光角度选择性合并分集接收系统研究

$$H_2(0) = \frac{(m+1)A_1}{2\pi D_{d2}} \cos^m(\varphi_2) g(\varphi_2) T_s(\varphi_2) \cos(\varphi_2) \quad (5)$$

本系统选用4个型号为S6968的PIN光电二极管作为可见光通信系统的光电探测器,则有 $D_{d1}=D_{d2}$, $\varphi_1=\varphi_2$ 。因此,光电探测器的信号强度只与本身的接收视角有关。综合考虑探测器与接收的效果,2个探测器的最大接收功率比值可为1/2,则有:

$$\frac{H_2(0)}{H_1(0)} = \cos(\varphi_2) = 1/2 \quad (6)$$

由式(6)可得,2个探测器的最大角度为 60° ,另外2个探测器与垂直放置的探测器的角度也为 60° ,3个探测器之间夹角呈 120° 展开,探测器分布如图3所示。4个圆锥形的接收范围近似合成半球状,即只有整个半球完全遮挡的情况下才会出现信道完全被中断的现象。

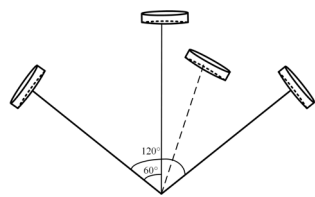


图3 探测器分布图

1.3 信号读取电路结构设计

信号读取电路结构设计如图4所示。该电路主要为每个光电探测器的信号提供信号端口,用于后续信号处理。光电探测器工作模式为光导模式,通过外加偏置电压可以抑制探测器产生的暗电流。可见光通信系统中到达接收端的信号衰减较严重,因而光电探测器检测到的信号微弱,同时电路内部伴随噪声。为控制噪声信号的引入,本文选用具有低噪声、低损耗的集成运算放大器OPA380作为前置放大器的主要元件,并通过设置 R_1 和 R_2 的值来控制前置放大的倍数。由于器件的增益带宽积一定,因而无法获取较大增

益,电压幅度值无法满足后续电路的处理要求,还需对输出信号进行二次放大处理,该放大电路仍选择集成运放OPA380。

在Multisim电路仿真软件中,对所设计的信号读取电路进行电路仿真时,利用信号发生器(XFG)作为信号输入源,示波器(XSC)观测各电路模块的输出波形。经过主放大电路处理后,输出的波形幅度值达到V级别,电路效果较为理想。

1.4 光角度分集接收电路的设计及仿真分析

依据选择式合并的原理,设计分集接收电路如图5所示。本文方案中使用的电路主要由电压比较器LM339和选通芯片ADG719组成,其中选通芯片是一款单芯片CMOS单刀双掷开关,具有低功耗、高开关速度和低导通电阻。接通时,ADG719的各开关在2个方向的导电性能相同。对4个光电二极管接收到经处理放大的信号进行实时采集取样,将取样信号交给电压比较器比较,找出最大的信道,此信道就是要进行传输的信道。同时,电压比较器输出控制信号给选通芯片ADG719,最终实现信道的选通。

本文用Mutisim仿真软件对设计的4路选通电路进行仿真测试,利用信号发生器作为经过放大电路得到的4路输入信号,测试信号幅值为1V、1.5V、2V和2.5V的相同频率的正弦波信号,用示波器观测输出的波形,观测结果表明:设计的分集接收电路可以将4路信号中幅值最大的一路信号进行输出,所设计的电路可以正常工作。

2 实验测试分析

在LED可见光通信系统中,系统接收到的信号主

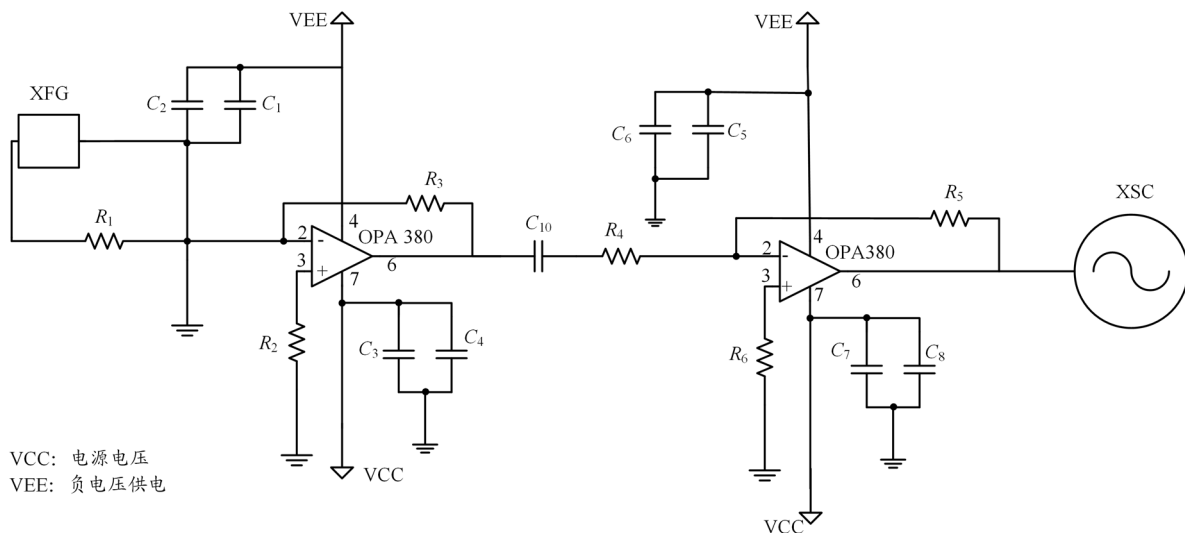


图4 信号读取电路

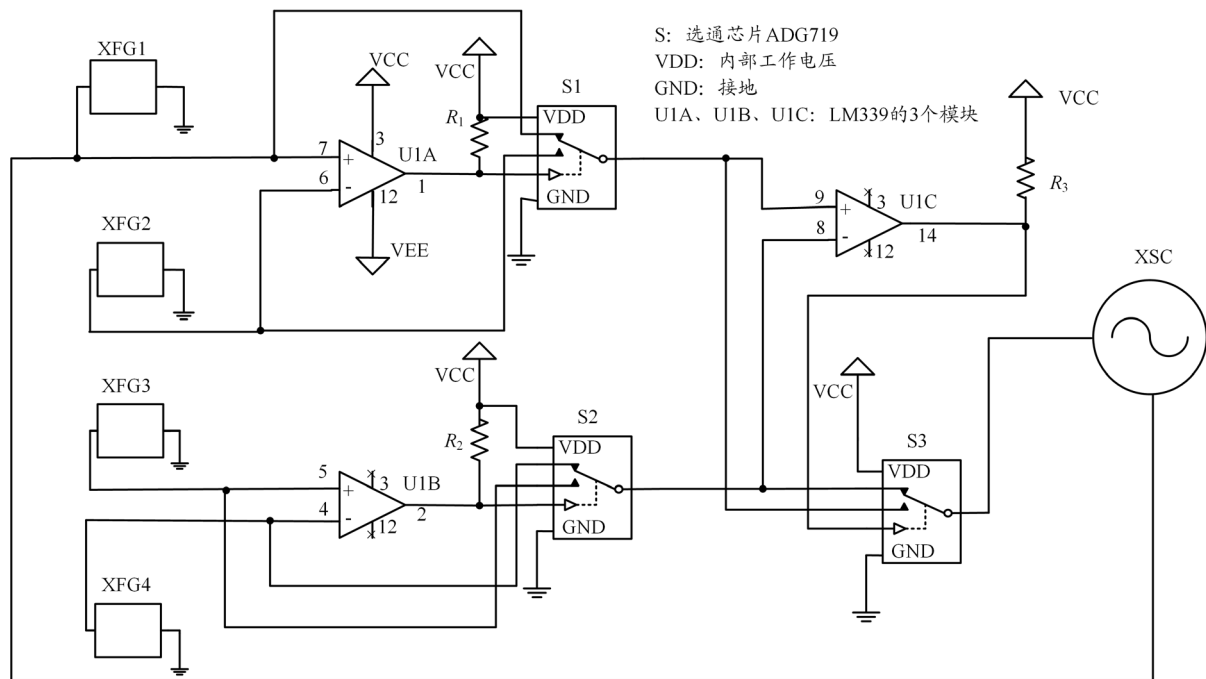


图5 分集接收电路

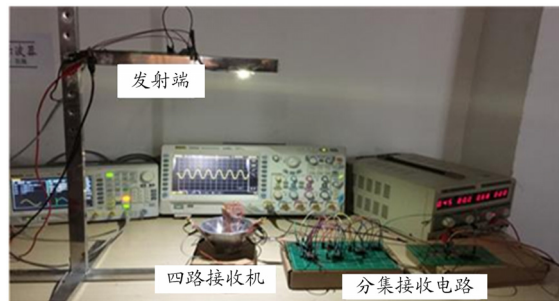
要由传输信号和噪声组成,假设各支路引入噪声相等,则等效于选择输出平均功率最大的那条支路信号。通信系统的信噪比 S_{SNR} 可表示为:

$$S_{\text{SNR}} = \frac{P}{\sigma^2} = 10 \lg \left(\frac{p_s}{p_n} \right) = 20 \lg \left(\frac{V_s - V_n}{V_n} \right) \quad (7)$$

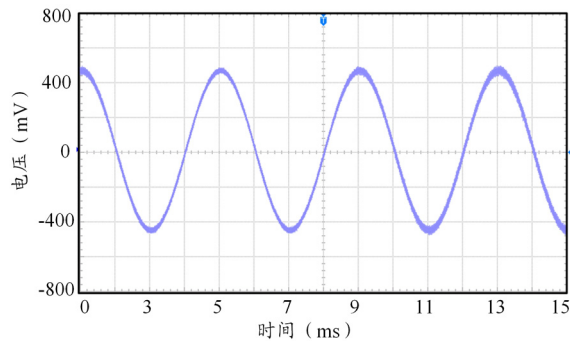
其中, P 为传输信号中最大的平均功率, σ^2 为噪声的平均功率。实验测试中,当传输信号接入到通信系统时,系统接收到的功率等效为系统最大输出功率 p_s ; 当撤去输入信号时,系统接收到的功率等效为系统的噪声功率 p_n , V_s 和 V_n 分别代表信号和噪声电压的有效值。

测试信号源采用 RIGOL 公司的 XFG, 将 XFG 输出的正弦波信号接到系统发射端的信号输入端口。系统搭建如图 6(a) 所示, 将可见光通信系统发射光源固定在 T 型铁架上, 模拟室内照明光源; 采用 XFG 的正弦波信号作为实验系统测试源, 通过偏置器耦合电路将传输的交流信号加载在驱动 LED 光源正常工作的直流源上。将所设计的球形探测器放在铁架底部, 通过信号读取电路和分级电路的处理, 用示波器观测接收端的输出波形, 电路输出最大幅度的一路信号波形如图 6(b) 所示。

在 LED 灯和接收端之间放置一块挡板, 依次增加被遮住探测器的数目, 利用示波器测出光电二极管被遮挡个数与挡板移动过程中输出信号振幅的关系, 从而得出分集接收系统中被遮住的探测器数目与系统



(a) 分集接收测试场景图



(b) 分集接收输出波形

图6 分集接收测试场景及输出波形

SNR 关系如图 7 所示。

实验测试结果表明: 在可见光通信系统中, 随着通信距离的增加, 光电探测器接收到的信号光强度逐渐减小, 相对而言, 噪声干扰增强, 从而引起系统 SNR

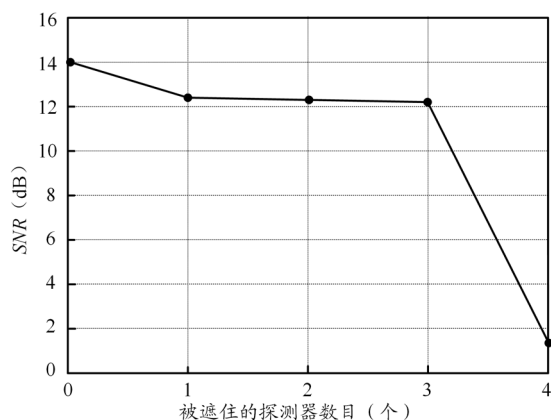


图7 被遮住的探测器数目与系统 SNR 关系

下降。当采用单一探测器接收时,通信距离大于30 cm后,系统的 SNR 约为 2.5 dB。当接收端的 4 个光电探测器都未遮挡时,SNR 为 14 dB;当接收端的被遮住的探测器数目少于 4 个时,系统的 SNR 没有明显变化,约为 12.5 dB,比未加分集电路接收装置的接收系统提高了约 10 dB。只有当 4 个光电探测器被全部遮住后,通信才会被中断,而实际通信传输过程中,光电探测器被全部遮住的可能性并不大。加入的分集接收模块将接收到的光信号输入到 4 路选通电路,信号幅度最大的一路信号被作为输出信号,有效避免了单个探测器因光强信号变化对系统性能造成的影响。

3 结束语

在可见光通信中,针对由多径效应引起的信道衰落以及接收端被遮挡引起的通信中断问题,本文采用了分集接收技术来提高通信质量。从系统实现的性能代价比角度考虑,引入了处理相对简单但又具备分集优势的选择性合并方式。通过对选择合并方式支路数目的分析,确定了 4 重分集数,设计了 4 路选通电路

作为分集接收信号处理电路,并完成了电路仿真和实物测试。测试结果表明:采用分集接收技术后,与未加分集电路接收装置的接收系统相比,前者 SNR 提高了 10 dB,有效抑制了由多径效应引起的信道衰落以及接收端被遮挡而导致通信中断的现象。

参考文献:

- [1] QIAN G, TIAN L, QI Z, et al. Design and implementation of indoor visible light communication avalanche photodiode detecting circuit [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (2): 731-735.
- [2] XU Juanjuan. Research on blind signal separation technology for receiver of LED optical communication [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
- [3] FAHAMUEL P, THOMPSON J, HAAS H. Improved indoor VLC MIMO channel capacity using mobile receiver with angular diversity detectors [C]//2014 IEEE Global Communications Conference, Dec 8-12, 2014, Austin, USA. Piscataway: IEEE, 2015: 2060-2065.
- [4] FENG R, DAI M, WANG H, et al. Linear Precoding for Multiuser Visible-Light Communication With Field-of-View Diversity[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1-8.
- [5] HAN D, LIU Y, ZHANG K, et al. Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 33-42.
- [6] WANG Binbin. Research on VLC system based on light angle diversity [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [7] ZHOU Y, XU Y, WANG Z, et al. MIMO VLC positioning system based on LEDs utilizing diversity reception technology [C]//2015 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Oct. 15-17, 2015, Austin, USA. Piscataway: IEEE, 2015: 1-4.
- [8] GUO L, MENG D, LIU K, et al. Experimental research on the MRC diversity reception algorithm for UV communication [J]. Applied Optics, 2015, 54(16): 5050-5056.
- [9] MIRIDAKIS N I, TSIFTIS T A. EGC Reception for FSO Systems Under Mixture-Gamma Fading Channels and Pointing Errors [J]. IEEE Communications Letters, 2017(99): 1441-1444.

OSID 内容制作手册

凡经本刊审稿录用后即将发表的论文都将添加 OSID 开放科学(资源服务)标识码。作者需要录制 1 段或几段语音介绍(每段语音不超过 10 分钟)上传到 OSID 码中。具体操作如下:

1、注册 OSID 作者助手。作者收到“OSID” <says_support@vip.163.com>发来的那封邮件后,用手机扫描邮件中的二维码,注册“OSID 作者助手”工具账号(或通过电脑注册账号 <https://author.says.ren/A10000088871/register>)。

2、录制并上传语音。获得【OSID 作者助手】工具账号后,请先准备好要录制上传的语音内容,然后登录【OSID 作者助手】工具账号,这时窗口会自动弹出系统为您的文章生成的独一无二的 OSID 码;接下来您只需按提示操作录音、提交。录好第 1 段语音后请提交(右侧那个“提交”);然后录第 2 段、提交(右侧那个“提交”)……最多可录 5 段,录完最后一段语音后,先点右侧那个“提交”,再点正下方的那个“提交”。

《光通信技术》编辑部