

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210529

基于多探测器融合的非视线链路通信系统研究

卢钰松 蔡喜平 胡延静 程贵东

(黑龙江大学物理科学与技术学院 哈尔滨 150080)

摘要: 非视线链路可见光通信具有信号覆盖范围广、不易因遮挡而出现链路阻塞等优点,但存在着链路信号弱、采用单探测器的接收系统视场小等问题。针对上述问题,提出多探测器融合接收模式。通过实验研究了接收方位角对接收信号的影响,对比了单探测器接收系统和四探测器接收系统接收信号的信噪比分布,测试了基于四探测器的非视线链路通信系统的通信性能。实验结果表明:采用多探测器融合接收模式可以显著改善通信系统性能,采用四探测器接收可使非视线链路通信的系统最大信噪比提高 10.71 dB,在视线链路被完全阻塞时系统的最高通信速率可达 1 Mbps,且误码率低于 10^{-6} 。

关键词: 无线光通信;可见光通信;室内通信;非视线链路;链路阻塞

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Research on non-line-of-sight link communication system based on multi-detector fusion

Lu Yusong Cai Xiping Hu Yanjing Cheng Guidong

(School of Physical Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Non-line-of-sight link visible light communication has the advantages of wide signal coverage and not easy to block the link due to occlusion. However, there are some problems, such as weak link signal and small field of view of the receiving system using a single detector. Aiming at the above-mentioned problems, a receiving mode of multi-detector fusion is proposed. The influence of receiving azimuth angle on the received signal is studied experimentally, the signal-to-noise ratio distribution of the received signal based on the single-detector receiving system and the four detectors receiving system is measured respectively, and the communication performance of the non-line-of-sight link communication system based on four detectors is tested. Experimental results show that the multi-detector fusion receiving method can effectively improve the performance of the non-line-of-sight link communication system, the maximum signal-to-noise ratio of the system with non-line-of-sight link communication can be increased by 10.71 dB by using four detectors, and the maximum communication rate of the system can reach 1 Mbps and the bit error rate is less than 10^{-6} when the line-of-sight link is completely blocked.

Keywords: wireless optical communication; visible light communication; indoor communication; non-line-of-sight link; link blockage

0 引言

可见光通信(visible light communication, VLC)技术是将光作为信息载体进行数据传输的一种新兴技术。VLC不仅具有低成本、低功耗、高速率、高保密、无电磁污染及宽频段等优点,还具有照明与通信的双重功能^[1]。在频谱资源紧张、能源紧缺的现实环境下,以白光发光二极管(light emitting diode, LED)为主的室内 VLC 技术将成为新一代通信技术中的重要组成部分。

VLC 传输链路可分为视线(line-of-sight, LOS)传输链路与非视线(non-line-of-sight, NLOS)传输链路两种^[2]。LOS 链路是指发射端发出的光不经反射直接沿直线传播进入通信接收机。目前, VLC 研究基本上都是集中于 LOS 传输链路^[3-6]。LOS 链路通信实现的是点对点通信,要求发射机和接收机要对准,所以其使用灵活性不高。LOS 链路通信存在的最大问题是如果一旦出现链路阻塞,即直射光线被部分或全部遮挡,将导致通信质量下降甚至无法进行通信^[7]。NLOS 链路通信主要依靠来自于空间中反射体

收稿日期:2022-06-30

如墙壁、地板、天花板以及室内物品等的一次或多次漫反射,信号来源丰富,链路被完全遮挡的可能性很小,基本上不会出现链路阻塞问题。相比于 LOS 链路,NLOS 链路的信号很弱,在高速通信时,由于多径效应会存在明显的符号间串扰^[8]。优点是信号覆盖范围广,接收机的移动性更强,使用起来更加灵活。

对 NLOS 链路的研究可以追溯到 20 世纪七十年代,Bober 等^[9]提出了采用漫反射进行室内红外无线光通信,通过理论分析和建模仿真研究了光学通信通道及通信的可行性。随后,基于漫反射的 NLOS 红外无线通信取得了较大的发展^[10]。与红外通信相比,白光 LED 的发光效率和带宽都低于红外 LED,白光 LED 产生的一次和多次漫反射信号强度也远弱于红外 LED 产生的漫反射^[11]。在白光 VLC 系统中,漫射信号和直射信号同时存在,由于漫射信号强度过于微弱,一般在信号处理中就会忽略漫射信号的贡献,甚至可能会被当做干扰进行处理^[12]。实际上 NLOS 链路是可以用来改善通信系统性能的,尤其是在 LOS 链路被阻塞的情况下^[13-15]。Mmbaga 等^[13]在带有可移动角度分集接收器的室内 VLC 多输入多输出信道模型中,加入镜面反射和漫反射,发现利用镜面反射和漫反射可以显著改善链路性能。Chvojka 等^[14]通过考虑不同接收机的方位和可变视场角,分析了可见光通信系统的 LOS 和 NLOS 信道特性,发现与混合链路相比,纯 NLOS 链路可以提供更高的 3 dB 信道带宽。Cahyadi 等^[15]提出利用手机摄像头对 NLOS 链路信号进行接收,实现在 50 cm 的距离上达到了 6.72 kbps 的数据传输速率。张博、李娟等^[16-17]通过在实验室内建立一个漫反射空间,进行了基于漫反射的 VLC 通信实验,发现即使在 LOS 链路完全被遮挡的情况下,依然可以通过 NLOS 链路进行通信。

由于 NLOS 链路的漫反射信号非常微弱,室内漫射体分布不规律,在复杂环境下漫反射信号的分布并不会呈现出任何规律性。接收机接收到的漫反射信号的强弱取决于反射体的分布和其漫反射率的大小、以及接收机的接收方位等多方面因素。单探测器由于接收方位固定,接收视场角有限,使得接收机的性能严重依赖于探测器的放置方位,导致了采用单一探测器的 NLOS 链路通信系统在使用时需要寻找最强漫反射信号的方位,因此会大大降低通信系统的使用灵活性,同时也存在着某一方向漫反射信号被遮挡而大幅降低通信质量甚至无法通信的问题。为了减少上述因素对 NLOS 链路通信系统性能的影响,提出了采用多探测器的室内 NLOS 链路通信系统,并以所建立的信道模型为理论基础,搭建 1.27 m×1.27 m×1.27 m 实验场地,设计实验对比了多探测器与单探测器测得的系统信噪比分布并测试了系统的通信性能。多探测器融合接收将提高接收机收集信号的能力,从而提高系统的信噪比和使用的灵活性以及通信系统的鲁棒性,以达到提高通信速率和降低通信误码率的目的。

1 非视线信道模型和探测器布局

基于多探测器的室内 NLOS 链路通信信道模型如图 1 所示,建立一个 1.27 m×1.27 m×1.27 m 的三维空间漫反射实验空间,LED 放置于空间顶部,安装有 4 个光电探测器的接收机放置于空间底部,在接收机的顶部用挡板完全遮挡直射光,阻止直射光进入接收机。因为多次漫反射功率远远小于单次漫反射功率^[8],所以只考虑一次漫反射的情况。

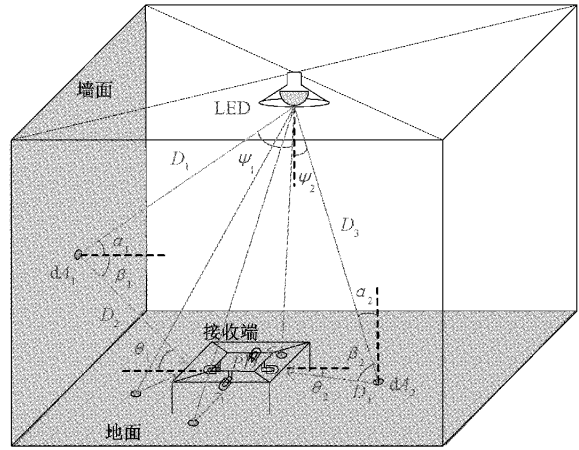


图 1 基于多探测器的非视线信道模型

在模型中,光信号可由两种途径进入接收机,一种是经墙面漫反射后进入接收机,另一种是由地面漫反射后进入接收机。每个探测器接收信号的总强度可表达为:

$$V_r = \int_{\text{wall}} \eta \times R \times G \times P_t dHref_{\text{wall}} + \int_{\text{ground}} \eta \times R \times G \times P_t dHref_{\text{ground}} \quad (1)$$

其中, V_r 为单个探测器接收信号的强度, P_t 为光源发射光的总功率, η 为光电二极管(photo diode, PD)的光电转换率, R 为跨阻阻值, G 为主放大器增益, $dHref_{\text{wall}}$ 为墙面微元对一次漫反射信号的信道增益,如式(2)所示^[18]。

$$dHref_{\text{wall}} = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho_1 \cos^m(\psi_1) \cos(\alpha_1) \cos(\beta_1) \cos(\theta_1) dA_1, & 0 \leq 2\theta_1 \leq FOV \\ 0, & 2\theta_1 \geq FOV \end{cases} \quad (2)$$

$dHref_{\text{ground}}$ 为地面漫反射微元对一次漫反射信号的信道增益,如式(3)所示。

$$dHref_{\text{ground}} = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi^2 D_3^2 D_4^2} \rho_2 \cos^m(\psi_2) \cos(\alpha_2) \cos(\beta_2) \cos(\theta_2) dA_2, & 0 \leq 2\theta_2 \leq FOV \\ 0, & 2\theta_2 \geq FOV \end{cases} \quad (3)$$

式(2)和(3)中 m 为 LED 灯的朗伯辐射阶数, A 为光电二极管的感光面积, ρ_1 为墙面的漫反射系数, ψ_1 为 LED 光线照射到墙面微反射元的出射角度, α_1 为 LED 光线照射到墙面微反射元的入射角度, β_1 为入射光线经墙面微元漫反射后的出射角度, θ_1 为墙面微元漫反射光到光电二极

管的入射角度, dA_1 为墙面漫反射微元面积, ρ_2 为地面的漫反射系数, ψ_2 为 LED 光线照射到地面微反射元的出射角度, α_2 为 LED 光线照射到地面微反射元的入射角度, β_2 为入射光线经地面微元漫反射后的出射角度, θ_2 为地面微元漫反射光线到 PD 的入射角度, dA_2 为地面漫反射微元面积, FOV 为光电二极管的接收视场角。

将探测器安装在接收机底部对漫反射信号进行接收, 这样可以有效分离 LOS 链路与 NLOS 链路, 实现纯 NLOS 链路通信, 即仅通过漫反射信号来完成通信。对一个光电接收系统来说, 输出信号强度与探测器的光敏面面积、接收视场角关系较大。对于漫反射信号接收系统来说, 由于漫反射光强度很弱导致单一探测器输出的电信号也很弱, 需要进行多级放大才能获得信息, 但由于放大电路增益带宽积的限制, 放大电路的放大倍数越大, 其带宽就会越小, 即在增大放大电路放大倍数的同时, 会降低通信速率。另外, 由于采用单一探测器的接收系统其视场角和方位角固定, 只能接收到某一方向的漫反射信号, 当该方向漫反射信号较弱或被挡时, 通信可能就无法正常进行。为了解决上述问题, 在兼顾接收灵敏度和系统带宽、以及 NLOS 链路阻塞时通信的鲁棒性, 采用 4 个探测器融合接收模式, 即使用 4 个探测器分别对不同方位的漫反射信号同时接收。接收端实物如图 2 所示将 4 个 PD 安装在接收机的底部, 其布局如图 3 所示, 4 个 PD 呈中心对称放置, 实现对漫反射信号的多方位接收。

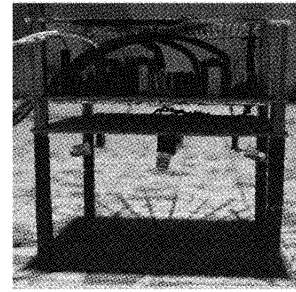


图 2 接收端实物

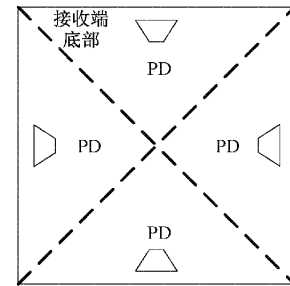


图 3 探测器布局

2 非视线链路通信系统硬件设计

基于多探测器接收的 NLOS 链路通信系统结构如图 4 所示, 由一个基于现场可编程逻辑门阵列 (field programmable

gate array, FPGA) 的信号调制模块按照自定义的通信协议采用开关键控的调制方式将通信数据打包输出至驱动电路, 经电流放大驱动 LED 发送光信号。光信号沿 NLOS 链路被多 PD 中的一个或多个探测到, 并经后续电路对信号放大、判决后输出给基于 FPGA 的数字信号处理模块进行处理, 该模块主要完成数据读取、解包和转发功能, 解包后的数据将分两路输出: 一路输出给误码率计算模块用于实时显示误码数据的比特数, 另一路输出给 PC 机用于实时显示通信数据。

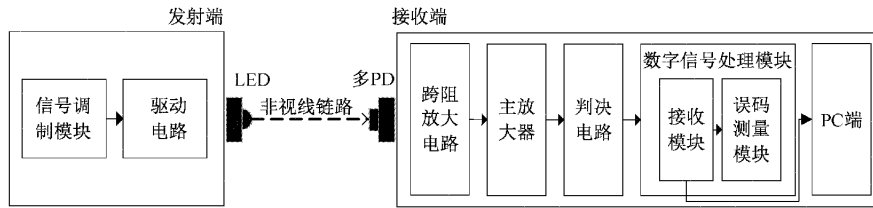


图 4 非视线链路通信系统结构图

2.1 驱动电路设计

设计了如图 5 所示的金属-氧化物半导体场效应晶体管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOS-FET) 分压式偏置电路用于驱动大功率 LED 发光。电阻 R_1 与 R_2 组成分压电路使 MOS-FET 处于导通状态, 可以保证在无信息传输任务时, LED 灯具有稳定的照明亮度, 有信息传输时, 可以同时实现照明和通信。

2.2 接收端电路设计

接收端电路如图 6 所示, 主要由多探测器融合电路、跨阻放大电路、主放大电路、同相加法器、高通滤波电路和判决电路组成。多探测器融合电路使用 4 个 PD 对称放置于接收端底部, PD 前端未加聚光透镜, 并加偏置电压使其

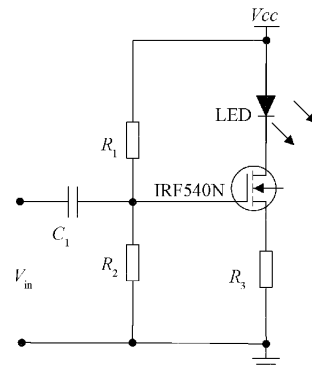


图 5 LED 驱动电路

工作在光导模式。在通信过程中4个探测器同时工作,分别对不同方位的漫反射信号进行接收,其中单个PD接收信号的幅值只取决于对应方位漫反射光的强弱,4个PD的输出脚通过等距布线后连接到一起实现信号的融合。跨阻放大电路将多PD输出的微电流信号转换成电压信号输出至主放大器进一步放大,放大电路的放大倍数在0~5000之间可调。电容 C_2 与电阻 R_3 组成无源高通滤波电路,截止频率为318 Hz,可以减少环境光对接收信号的影响。同相加法器可以为信号提供稳定的直流电压,以保证输出信号不会出现负电压的情况,同时配合判决电路进行信号恢复。由于后续信号需要FPGA进行信号处理,必须保证输出信号为晶体管-晶体管逻辑电平信号,故此采用滞回比较器作为判决电路。

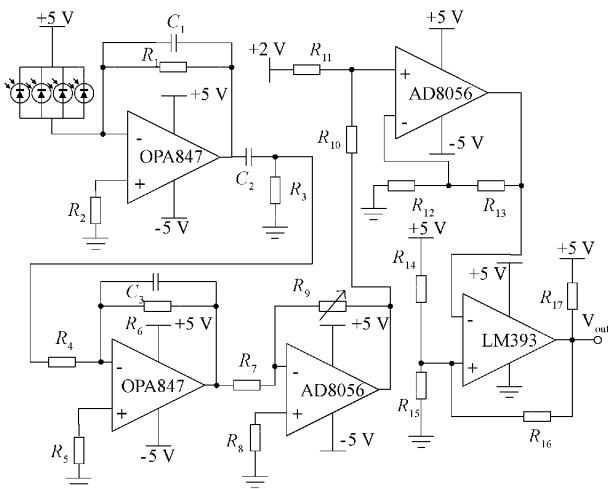


图6 接收端电路

2.3 通信协议

参考通用异步收发传输器(universal asynchronous receiver/transmitter, UART)通信协议,定义的传输数据格式如图7所示,由起始位、数据位和停止位3部分组成^[19]。起始位作为数据传输开始的标志位,设置为低电平。停止位作为数据传输结束的标志位,设置为高电平。数据位则为需要传输的8比特数据。为了测量不同速率下的通信性能,设置了0.5~1 Mbps间隔为0.1 Mbps的6种不同通信速率,可以通过按键进行速率切换。

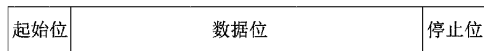


图7 数据包格式

2.4 误码率测量

设计了基于FPGA的误码率测量模块。如图8所示,此模块的核心运算单元为异或运算,通过将接收到的数据Data_in与参考序列进行异或运算即可得出一帧数据中错误的比特数,并将错误比特数进行累加运算可得出实时的错误比特个数。将总错误比特数并与总发射比特数相除,可得出系统误码率。

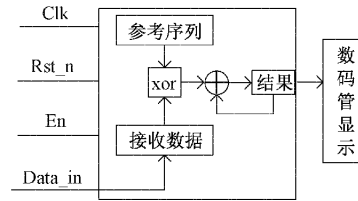


图8 误码率测量模块

3 通信实验及结果分析

3.1 实验场地

搭建了如图9所示的大小为1.27 m×1.27 m×1.27 m的实验空间,并以图示原点位置建立坐标系O-XYZ,以8 cm为步长于地面绘制13×13网格。LED放置于空间顶层正中间,位置坐标为(48 cm, 48 cm, 127 cm)。通过在框架的四周加装漫反射面来模拟墙面漫反射,模拟墙面放置位置如图10所示。为降低周围环境漫反射面对测量实验空间漫反射分布实验结果造成的影响,统一用蓝布对周围环境进行遮盖。

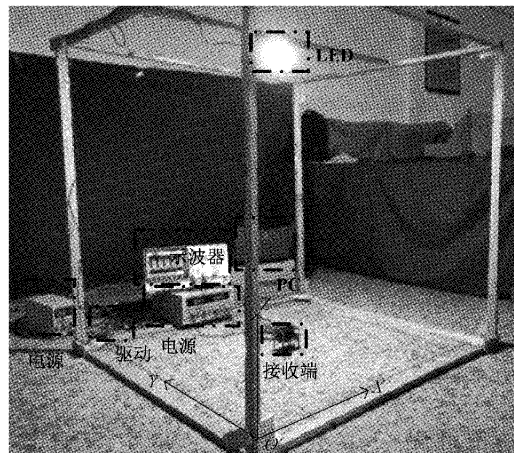


图9 非视线链路通信实验场地

3.2 接收方位角对接收漫反射信号强度的影响

为了研究不同通信场景、不同位置下PD偏转角度与接收信号强度的关系,设计了墙面加地面产生的漫反射和地面单独产生的漫反射两种通信场景来模拟室内环境中的漫反射通信。在此实验中,单探测器朝向和所加墙面位置均为二号墙(木板)。在两种场景中将接收端均分别放置于图10中的p1、p2、p3、p4点,对应坐标分别为(48 cm, 48 cm)、(48 cm, 32 cm)、(48 cm, 16 cm)和(48 cm, 0 cm)。实验时,倾角 ϕ (如图11所示)从0°开始以10°为步长进行逆时针旋转至90°得出不同场景、不同位置 and 不同倾角与接收强度之间的关系。

实验结果如图12和13所示,图12为只存在地面漫反射时的实验结果,图13为同时存在地面漫反射和墙面漫反射时的实验结果。由实验结果可知,探测器输出信号强度受接收方位角影响很大;最大接收信号强度与接收方位

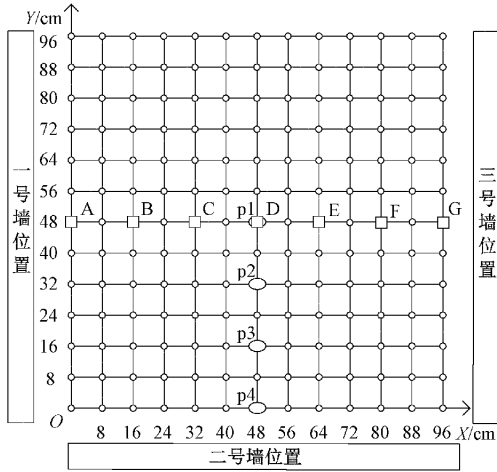


图 10 地面坐标及墙面分布图

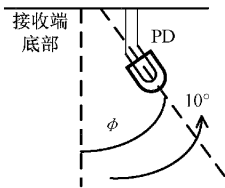


图 11 PD 倾角示意图

角并不是固定在某一角度,而是随环境不同而不同,如图 12 中,最大强度对应的角度约为 60° ,而图 13 中,其对应角度约为 70° 。使用单探测器接收信号时,如果采用固定接收方位角时,使用时需要先调整方位角,使其接收光强尽可能大,另外还需要调整电路增益,使其输出电压达到一定幅度,使用的灵活性会较差,信号处理电路也会更加复杂。

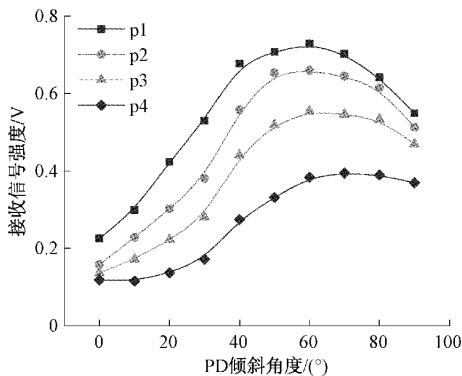


图 12 只有地面漫反射时信号强度与倾角 ϕ 的关系

3.3 两种探测系统的漫反射信噪比分布

研究了使用单探测器和多探测器接收机对图 10 所示的 169 个点进行测量,获取相应点处信号的电压值并按照式(4)求得对应点的信噪比(signal-noise ratio, SNR)。

$$SNR = 20 \lg \frac{I_s}{I_N} \quad (4)$$

其中, I_s 为信号强度, I_N 为噪声强度。实验中,信号

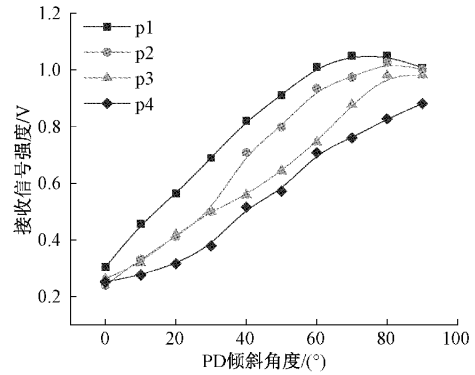


图 13 同时有地面和墙面漫反射时信号强度与倾角 ϕ 的关系

仅来自于地面漫反射,地面为较为粗糙的大理石地砖,其漫反射率约为 0.12,4 个探测器的倾角均取 65° 。

首先研究单探测器时接收信号的信噪比分布。实验时只安装一个探测器,该探测器朝向图 10 中二号反射墙体的位置,漫反射墙体采用普通木板,漫反射率约为 0.20。单探测器测量的地面漫反射信号的 SNR 分布如图 14 所示。然后在接收机上安装 4 个探测器,测量多探测器时接收地面漫射信号的 SNR 分布,结果如图 15 所示。可以看出,多探测器下的 SNR 分布更具有规律性,其呈中心对称分布并在中心位置有最大值且向四周均匀减小,信号分布更为符合朗伯辐射规律。图 14 中 SNR 在不同位置时变化较大,正常工作区域一般集中在中间较小的一个范围,如果要在一个大的范围内接收信号,显然会增加电路设计的难度。而图 15 中在整个二维平面内 SNR 变化范围较小,这将有利于扩大通信信号覆盖范围,减小电路设计难度。

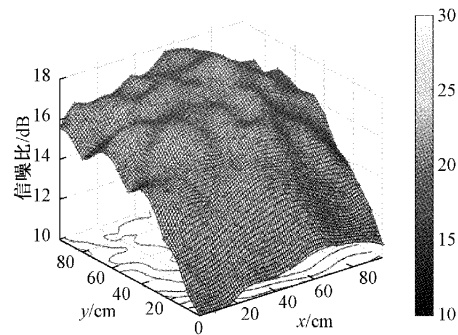


图 14 单探测器时接收地面漫反射信号信噪比分布

多探测器下整个空间接收信号的最大 SNR 为 28.94 dB,比单探测器下的 18.23 dB 高出 10.71 dB。多探测器下的空间平均 SNR 为 27.04 dB,比单探测器的 15.32 dB 高出 11.72 dB。在漫反射空间边缘附近多探测器的优势更为明显,在多探测器下的最小 SNR 为 24.91 dB,而单探测器下仅为 9.99 dB。可以看出,采用多探测器可以显著提高探测系统的 SNR,改善漫反射信号 SNR 的分布,更加有利于实现 NLOS 链路通信。

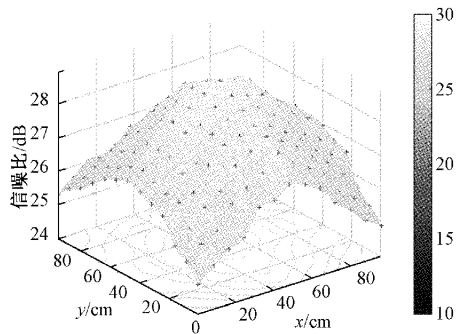


图 15 多探测器时接收地面漫反射信号信噪比分布

3.4 多探测器非视线链路通信实验

为了探究基于多探测器融合的非视线链路通信系统性能,在图 9 所示的实验空间中进行了不同速率下的通信实验。通过将发射端发送 1.6×10^8 bit 的数据与误码率模块所显示的误码个数比对得出实验误码率。在此实验中,4 个 PD 倾角 φ 均取 85° ,并加入一、二和三号墙(木板)来模拟空旷室内的通信场景,墙体的材料相同,漫反射率约为 0.20。在图 10 所示平面图中,在 $y = 48$ cm 的轴线上以 16 cm 的步长选择出 7 个点,分别为图 10 中的 A、B、C、D、E、F 和 G,并用多探测器接收机对不同通信速率下的误码率进行测量,得出如图 16 所示的误码率曲线。结果表明:基于多探测器融合的非视线链路通信系统,在实验空间的不同位置均具有良好的通信性能,最高通信速率可达 1 Mbps 且通信误码率低于 10^{-6} 。这个测量结果符合图 15 所示的 SNR 分布规律。

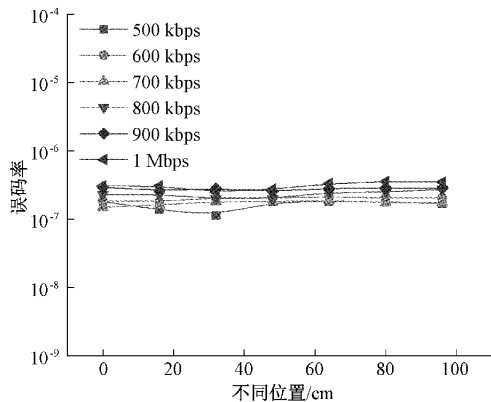


图 16 不同位置非视线链路通信实验结果

不同通信速率下测量的系统 SNR 与误码率的关系曲线如图 17 所示。结果表明,要达到较小的误码率,必须保证足够高的 SNR,如采用多探测器的通信系统在误码率为 10^{-6} 、通信速率为 1 Mbps 时,需要的系统 SNR 为 28.56 dB,而图 14 中测得的单探测器的最高 SNR 仅为 18.23 dB,显然无法保证在 10^{-6} 的误码率下实现 1 Mbps 通信。可以看出,采用多探测器可以显著增强信号、提高系统 SNR、降低误码率、提高通信速率,可以达到改善系统性能的目的。

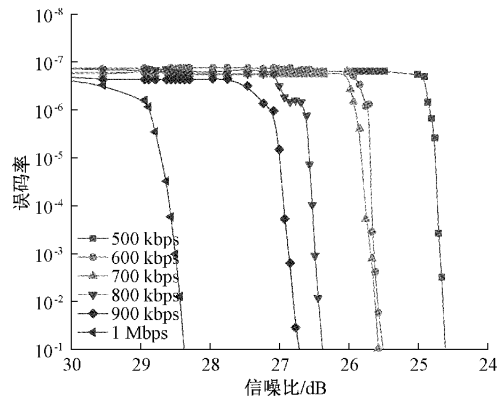


图 17 不同通信速率时的信噪比与误码率

4 结 论

本文在 $1.27 \text{ m} \times 1.27 \text{ m} \times 1.27 \text{ m}$ 的实验空间内搭建了基于多探测器融合的非视线链路通信系统,通过实验探讨了接收方位角对接收信号强度的影响、对比了不同探测系统下接收信号的 SNR 分布,并对系统进行了通信测试。实验结果表明:多探测器融合接收方式可增强接收机收集漫反射信号的能力,对比单探测器接收可有效提高系统 SNR 和改善通信空间 SNR 分布;基于多探测器融合的非视线链路通信系统在 LOS 链路被完全遮挡的情况下,最高通信速率可达 1 Mbps 且空间误码率均低于 10^{-6} 。以上实验均证明了多探测器融合接收方式在非视线链路通信中的可行性,并为在非视线链路通信系统中漫反射信号微弱导致通信困难的问题提供了解决方法和实验依据。但是,目前的实验空间对比于实际室内环境较为理想,且未考虑接收机高度变化给通信系统性能带来的影响,下一步研究将考虑在真实室内环境中搭建通信平台,探究漫反射信号的分布特性和多探测器接收系统的通信性能,并探索其实际应用价值。

参考文献

- [1] KHAN S, USMAN M, ALI S. Perspective on light-fidelity and visible light communication[J]. Journal of Laser Applications, 2022, 34(1): 011202.
- [2] 刘星辰,王利民,张帅,等. 室内可见光通信的脉冲响应及矢量编码算法模型[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 65-71.
- [3] HU J, HU F C, JIA J L, et al. 46.4 Gbps visible light communication system utilizing a compact tricolor laser transmitter[J]. Optics Express, 2022, 30(3): 4365-4373.
- [4] 槐利,张敏娟,林清,等. 一种基于白光 LED 的室内通信方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 13-17.
- [5] 秦岭,郝雅楠,杜永兴,等. 强背景光下 LED 交通灯的可见光通信误码率分析[J]. 电子测量与仪器学报,

- 2017, 31(5): 676-681.
- [6] 谭振坤, 柯熙政, 王姣. 外差探测系统波前校正实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 121-127.
- [7] HASS H, ELMIRGHANI J, WHITE I. Optical wireless communication[J]. Phil. Trans. R. Soc. A, 2020, 378(2169): 1-11.
- [8] WU Y H, AUDENAERT P, PICKAVET M, et al. Mirror-aided non-LOS VLC channel characterizations with a time-efficient simulation model[J]. Photonic Network Communications, 2019, 38(1): 151-166.
- [9] BOBER K L, MANA S M, HINRICHS M, et al. Distributed multiuser MIMO for LiFi in industrial wireless applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(11): 3420-3433.
- [10] BORAH D K, BOUCOUVALAS A C, DAVIS C C, et al. A review of communication-oriented optical wireless systems [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 91(2012): 1-28.
- [11] MANA S M, HELLMIG P, HILT J, et al. Experiments in non-line-of-sight Li-Fi channels[C]. Global LiFi Congress, IEEE 2019; 1-6.
- [12] KUMAR A, GHORAI S K. Effect of multipath reflection on BER performance of indoor MIMO-VLC system[J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(11): 388.
- [13] MMBAGA P F, THOMPSON J, HASS H, et al. Performance analysis of indoor diffuse VLC MIMO channels using angular diversity detectors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1254-1266.
- [14] CHVOJKA P, VITEK S, ZVANOVEC S, et al. Analysis of nonline-of-sight visible light communications [J]. Optical Engineering, 2017, 56(11): 116116.
- [15] CAHYADI W A, CHUNG Y H. Wide receiver orientation using diffuse reflection in camera-based indoor visible light communication [J]. Optics Communications, 2019, 431: 19-28.
- [16] 张博, 蔡喜平, 刘健, 等. 基于非视线链路的可见光通信实验研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(12): 25-28.
- [17] 李娟, 蔡喜平, 卢钰松, 等. 漫反射对白光可见光通信系统性能影响的实验研究[J]. 光通信技术, 2022, 46(2): 18-23.
- [18] YAHIA S, MERAIHI Y, CHERIF A R, et al. A survey of channel modeling techniques for visible light communications [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2021, 194: 103206.
- [19] 许波, 赵佳. 一种 FPGA 与 PC 通信方法及其应用[J]. 电子测量技术, 2018, 41(2): 115-118.

作者简介

卢钰松, 硕士研究生, 主要研究方向为室内可见光通信技术。

E-mail: 2201317@s. hlju. edu. cn

蔡喜平, 理学博士, 教授, 主要研究方向为光电信息技术。

E-mail: 2005031@hlju. edu. cn