

室内光通信漫射信道阶反射脉冲响应特性分析与模拟

何沛南¹,何明友^{2*}

(1.中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院,四川 广汉 618307; 2.成都理工大学,成都 610059)

摘要:针对可见光信号在传输中很容易遭受到障碍物阻挡而导致通信中断问题,提出了一种由直射链路和漫射链路来交替传输光信号的解决方案。基于这一方案,采用函数计算法和实验模拟方法,对室内光通信漫射信道阶反射脉冲响应特性进行了深入分析研究。在此基础上,探讨了4种场景下漫射信道阶反射脉冲响应特性及光平均接收功率的影响因素,并对其进行了实验仿真。仿真结果表明:发射光源的位置、发射光的角度 θ_{img} 和光束扩散角度 θ_{max} 是光平均接收功率的影响因素。

关键词:室内光通信;漫射信道;阶反射脉冲响应;实验模拟

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2020)07-0011-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.07.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis and simulation of order reflection pulse response characteristics in diffuse channel for indoor optical communication

HE Peinan¹, HE Mingyou^{2*}

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In view of the problem that the visible light signal is easily blocked by obstacles in the transmission, the author proposed a solution that the direct link and the diffuse link alternately transmit the optical signal. Based on this scheme, this paper uses function calculation method and experimental simulation method to analyze the response characteristics of order reflection pulse in the diffuse channel of indoor optical communication. On this basis, the response characteristics of the order reflection pulse and the influence factors of the average receiving power are discussed, and they are simulated by experiments. The experiment results show that the position of the emitting light source, the angle of the emitting light θ_{img} and the angle of the beam diffusion θ_{max} are the influencing factors of the average receiving power.

Key words: indoor optical communication; diffuse channel; order reflection pulse response; experimental simulation

0 引言

可见光通信是一种新兴的无线光通信技术。该技术实现了对通信频谱的巨大拓展,具有将通信与照明

收稿日期:2019-08-26。

基金项目:中国民用航空飞行学院科学研究基金(J2018-11)资助;四川省科技计划项目应用基础研究基金(2019YJ0721)资助。

作者简介:何沛南(1983—),女,2006年获得英国华威大学工程学院通信工程硕士;2011年获得该专业的博士学位。现就职于中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,从事教学和科学研究工作。研究方向为无线光通信、航空通信和地理信息系统-GIS信息提取与解译。目前,独立主持6项省级、校级相关科研和教改项目。



*通信作者:何明友(E-mail: hmy@cdut.edu.cn)。

2种技术相结合的优势。与传统无线通信技术相比,可见光通信技术还具有安全性高、保密性强和频率资源丰富等优点。从应用方面来看,可见光通信技术既适用于室内无线接入、智能家居等照明与通信结合的领域,又可用于医院、飞机客舱、火车车厢和汽车等电磁敏感环境中^[1-2],同时也适用于对保密性要求较高的通信场景。可以预测,可见光通信应用的下一个重大扩展领域将是机场的通信安全,因为可见光通信的应用,可以有效避免严重的电磁波干扰给机场和飞行安全造成的潜在风险。

然而,目前可见光通信尚存在一些关键技术问题有待解决,可见光信号在传输中很容易遭受到障碍物

何沛南,何明友:室内光通信漫射信道阶反射脉冲响应特性分析与模拟

阻挡而导致通信中断。如何让光信号在传输过程中克服障碍物阻挡,实现“无堵塞”通信值得研究。针对这一问题,何沛南等人提出了一个采用直射链路和漫射链路相结合的办法来交替传输光信号的解决方案^[3]。基于该方案,本文对漫射信道的阶反射脉冲响应特性进行深入分析与实验仿真。

1 漫射信道特性与仿真

为了仿真漫射信道特性,通过在有效通信区域内绘制一系列位置 (x,y) 来模拟光辐射的范围。假设室内房间的天花板为朗伯体,则接收机接收到的信号功率为 P_s ,由式(1)得出:

$$P_s = U h^2 \iint_{\text{ceiling}} \frac{H(x,y) \text{rect}(x,y) dx dy}{[h^2 + (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]^2} \quad (1)$$

其中, U 是探测器的接收面积, h 是房间高度,ceiling是天花板有界闭区域面积, H 是辐射照度。 x,y 是接收机的位置,对于天花板上的辐射位置 (x,y) ,其一阶辐射照度为:

$$H(x,y) = \frac{\rho P h^2}{(h^2 + x^2 + y^2)^2} \quad (2)$$

其中, ρ 为天花板反射率参数, P 为平均发射功率。从 (x,y) 到 (x_1,y_1) 的距离 D 为:

$$D = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \quad (3)$$

漫射接收机接收功率 $P_{s-\text{DIFF}}$ 可定义为:

$$P_{s-\text{DIFF}} = \frac{U \rho P h^2 \tan^2 \theta_a}{(h^2 + D^2)^2} \quad (4)$$

其中, θ_a 为光源入射角。为了简单起见,假设 $\rho=1, x=y=x_1=y_1$,类似于式(4),可以得到漫射链路信道(DIFF)的信噪比(SNR)为:

$$\text{SNR}_{\text{DIFF}} = \frac{r U P^2 h^4 \tan^4 \theta_a}{2 q I B \pi^3 (h^2 + D^2)^4 H_b \sin^2 \theta_a} \quad (5)$$

其中, SNR_{DIFF} 为漫射链路信道的信噪比, r 为光电二极管的响应度(一般为 $r=0.6 \text{ A/W}$), q 为自由移动电荷量, I 是光辐射强度, B 为传输速率, π 为常数, H_b 为比特速度。

本文通过模拟房间来探讨漫射链路信道的 θ_a 与SNR之间及 h 与SNR之间的关系。假设发射功率为50 mW, r 为0.6 A/W,高度 h 在3~5 m间变化,数据收发速度 B 为10 Mb/s, θ_a 在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 间变化。仿真结果分别如图1和图2所示。从图1可以看出,当 θ_a 从 10° 变为 40° 时,SNR上升,这意味着接收端的接收功率随之增加;房间的高度在3 m、4 m和5 m的情况下,SNR随接收机与天花板辐射区距离的增加而减

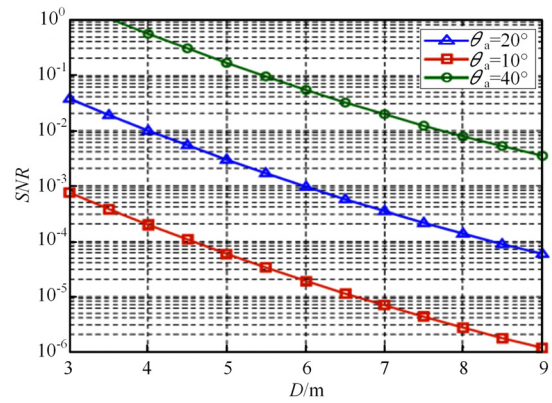


图1 光源入射角度与SNR关系的仿真

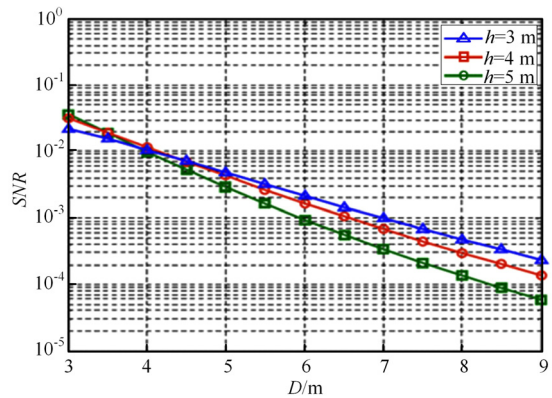


图2 房间高度与SNR关系的仿真

小。从图2可看出,在点 $(4, 10^{-2})$ 上,3条线相交,彼此之间的差异不大。也就是说,房间的高度不是影响漫射链路通信系统SNR的重要因素。

2 阶反射脉冲响应特性分析

在室内场景中,漫射光通过对不同物体(如天花板、墙壁、家具甚至人)的先后反射在该区域内传播。在这个场景中,一个发射机朝向一个普通大小的房间的天花板,光线的一阶反射将发生在天花板上的一个点区域,随后在其它物体表面上产生二阶和高阶反射。由于光路长度的不同,光束到达接收机的时间也不同。因此,可以将漫射链路的阶反射脉冲响应总和看作是所有的光反射总和。漫射链路的算法因适应不同的环境或模型而有所不同,但脉冲响应通常被建模为2个分量的总和,即一阶反射和高阶反射。漫射链路的阶反射脉冲响应如图3所示,一阶反射的脉冲响应明显高于其它反射的脉冲响应,其余随衰减而来的峰值是高阶反射的脉冲响应。

光传播的初始方向取决于光源位置、发射光角度 θ_{img} 和光束扩散角度 θ_{max} ^[4-6]。文献[7]描述了一种简单的

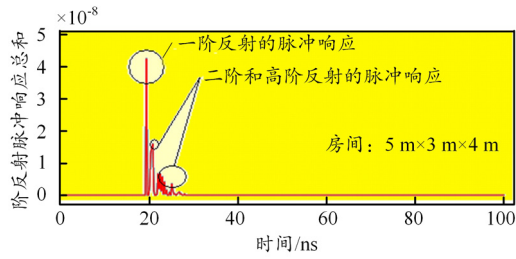


图3 漫射链路的阶反射脉冲响应

方法,通过引入一些参数来探索信道特性。

2种场景下的光路径如图4所示。发射机、接收机分别放置在T、R处,均朝向天花板。结合光束扩散角 $\theta_{\max}$,引入代表发射光源法向角 θ_0 ,可将 θ_0 作为半角度水平光源的最大值,从而确定光源的方向性。

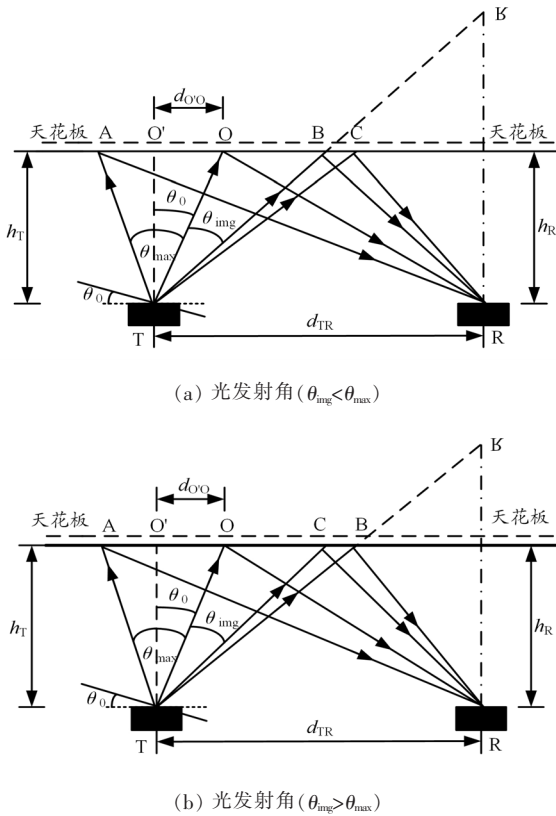


图4 2种场景下的光路径

在等效均匀分布中,朗伯体光源的归一化强度、光束强度的总辐射强度的半角可以表示为:

$$\theta_{\text{half}} = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{m} + 1} \right) \quad (6)$$

其中, m 是朗伯系数。参考 Naoki H^[8],光束扩散角 $\theta_{\max}$ 可以表示为:

$$\theta_{\max} = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 - 0.4 \times \theta_{\text{half}} / \cos^{-1}(0.5)}{m + 1}} \right) \quad (7)$$

如图4所示,光源发射角 θ_{img} 是线段TO与连接接

何沛南,何明友:室内光通信漫射信道阶反射脉冲响应特性分析与模拟

收机和发射机之间的角度, θ_{img} 可以定义为:

$$\theta_{\text{img}} = \tan^{-1} \left(\frac{d_{\text{TR}}}{h_T + h_R} \right) - \theta_0 \quad (8)$$

其中, d_{TR} 是发射器和接收机之间的距离, h_T 是发射器的高度, h_R 是接收机的高度。另外,当 θ_0 为零时, $|TO'|$ 是光束的法向,同时 $|TO|$ 也是光源的法向。

图4中有2种情况:①当角度 $\theta_{\text{img}} < \theta_{\max}$ 时,B点(天花板的交叉点)和连接光源的接收机图像线位于光源照亮的区域内;②当角度 $\theta_{\text{img}} > \theta_{\max}$ 时,发射机和接收机之间的距离 d_{TR} 会变大,B点超出了照明区域。为了用几何方法描述光的传播,光的快速和慢速路径可以用式(9)表示:

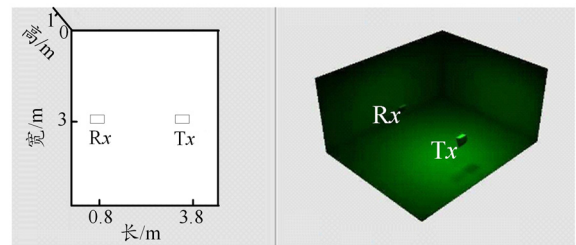
$$L_{\text{fast/slow}} = \frac{h_T}{\cos(\theta_{\max} + \theta_0)} + \sqrt{[d_{\text{TR}} + h_T \cdot \tan(\theta_{\max} + \theta_0)]^2 + h_R^2} \quad (9)$$

其中, $L_{\text{fast/slow}}$ 表示光的快速路径或慢速路径。在场景中, $L_{\text{fast/slow}}$ 是连接点T、C、R的连线。

3 实验仿真及讨论

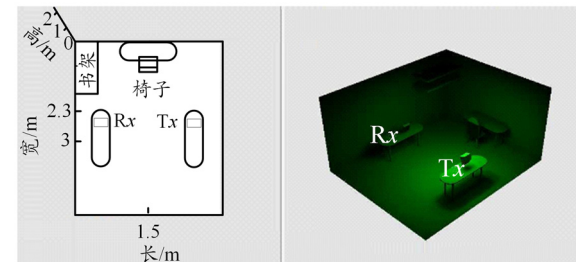
3.1 空房间和有家具房间的影响

本文模拟了一个空房间和有家具房间的场景。二维和三维布局视图如图5所示。2个房间大小相同,均为5 m×3 m×6 m。发射机Tx位于(3.8 m,1 m,3 m),接收机Rx位于(0.8 m,1 m,3 m)。在有家具房间内,增加1个书架、3张桌子和1把椅子,位置分别为(0 m,1 m,0 m)、(1.5 m,0 m,0 m)、(0.5 m,0 m,2.5 m)、(3.7 m,0 m,2.5 m)和(2.2 m,0 m,0.5 m)。阶反射脉冲响应的比较结果如图6所示。



(a) 空房间的二维视图

(b) 空房间的三维视图



(c) 带家具房间的二维视图

(d) 带家具房间的三维视图

图5 收发机在房间中的布局

何沛南,何明友:室内光通信漫射信道阶反射脉冲响应特性分析与模拟

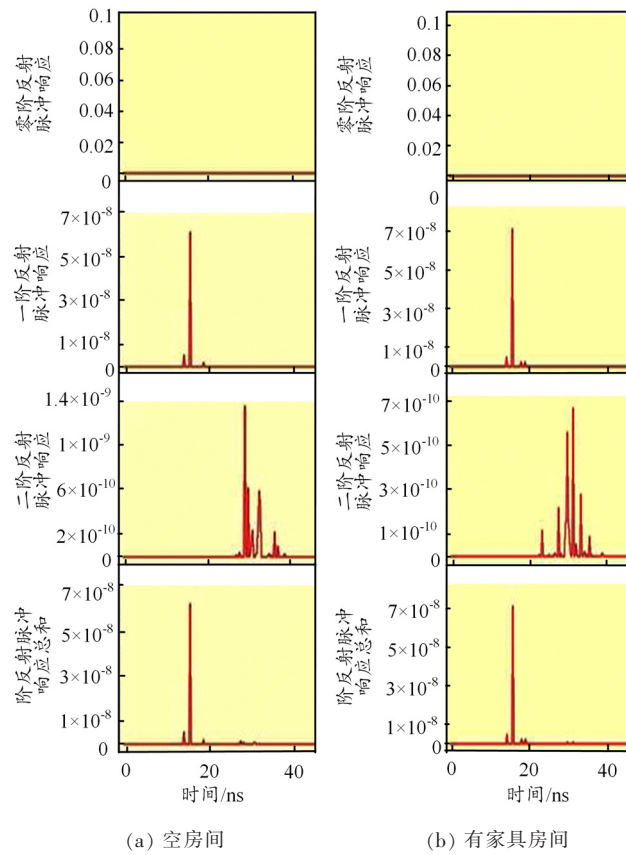


图6 空房间和有家具房间的阶反射脉冲响应比较

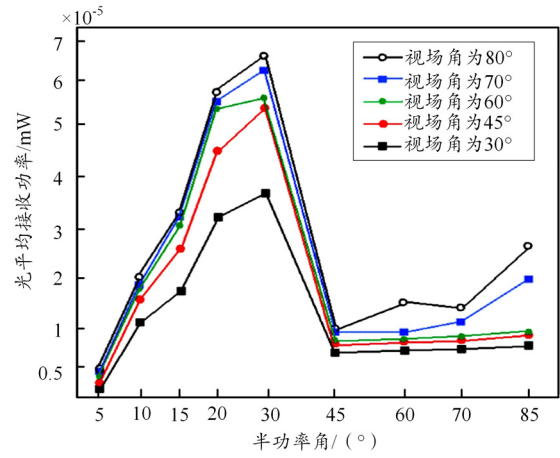


图7 平均接收功率与视场角和半功率角的关系