

# 三维射线跟踪和有限状态马尔可夫链的非空室内可见光信道表征参数

邓莉君 樊养余

西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710129

**摘要** 采用三维射线追踪对非空室内可见光传输环境中的信道冲击响应和光源位于天花板不同位置时的均方根(RMS)时延扩展进行估算。在此基础上采用有限状态马尔可夫链对室内可见光衰落信道进行建模,得到非空室内可见光信道冲击响应的分布。研究表明,随机分布反射物对非视距(NLOS)传输环境的信道冲击响应的影响相比视距(LOS)传输环境要大,光源位于天花板角落时均方根时延扩展比其他位置要大,多径效应也更为明显。

**关键词** 光通信;非空室内可见光通信;信道冲击响应;均方根时延扩展;有限状态马尔可夫链

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0306002

## Channel Characterization Parameters of the Non-Empty Indoor Visible Light Communication Based on the Three-Dimension Ray Tracing and Finite State Markov Chain

Deng Lijun Fan Yangyu

School of Electronics and Information, North Western Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China

**Abstract** By the means of three-dimension ray tracing method, the channel impulse response under the non-empty indoor visible light transmission environment and the root-mean-square (RMS) delay spread when light source locates in different positions of the ceiling are estimated. Based on this, the finite state Markov chain is used to model the indoor visible light fading channel, and the distribution of the non-empty indoor visible light channel impulse response is obtained. The results demonstrate that random distribution reflector imposes greater effects on the channel impulse response in the non-line of sight (NLOS) transmission environment than that in the line of sight (LOS) situation. Besides, the RMS delay spread is obvious when the light source locates at the corner of the ceiling instead of other positions, which means that the multipath effect is more obvious at this place.

**Key words** optical communications; non-empty indoor visible light communication; channel impulse response; root-mean-square delay spread; finite state Markov chain

**OCIS codes** 060.4510; 330.7310

## 1 引言

可见光通信(VLC)作为一种桥接光通信和无线通信的融合型技术,在实现照明的同时能够进行数据传输,研究者已对室内可见光系统进行了很多有益的探索,不断挖掘VLC在许多场景如机舱、矿井、医院等的应用潜能<sup>[1-2]</sup>。进一步研究提高室内可见光通信系统性能的有效方法,首先要能够准确表征室内可见光传输

收稿日期: 2014-09-11; 收到修改稿日期: 2014-10-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61405157)、西安市碑林区科技计划项目(GX1408)、西安市科技计划项目(CXY1350(1))

作者简介: 邓莉君(1986—),女,博士研究生,主要从事室内可见光基础理论与关键技术等方面的研究。

E-mail: dengli@xaut.edu.cn

导师简介: 樊养余(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事波束形成与波达方向估计、空间与大气光通信、室内与可见光通信、水下光通信等方面的研究。E-mail: Fan\_yangyu@nwpu.edu.cn

信道的参数,就此国内外研究者提出了许多有效的方法。

早在 1979 年 Gfeller 等<sup>[3]</sup>就对红外信道特性进行了研究,后来的研究者在此基础上采用迭代算法对不同室内场景下的红外信道特性进行不断地完善。VLC 较早的研究多是借鉴红外信道的研究成果,对可见光信道特性及系统性能进行近似估计,故在准确性和建模效率上很难兼顾<sup>[4-5]</sup>。鉴于可见光的宽频谱特性与近红外(IR)的窄带近似单频特性之间的差异,研究者在对可见光光源经反射后的功率谱分布和室内家具材料的光谱反射率进行研究的基础上,采用迭代算法对可见光光源的宽带特性、功率谱分布及反射面的反射系数与波长的关系进行分析,得到了 VLC 特有的信道特性<sup>[6-9]</sup>。另外,针对 VLC 信道中反射链路产生的多径效应引入的码间干扰这一问题,许多学者致力于研究能精确反映室内可见光多径传输特性的信道表征参数,如路径损耗、信道冲击响应、均方根(RMS)时延扩展等<sup>[10]</sup>,来进一步提高 VLC 通信系统的性能。蒙特卡罗射线追踪和迭代算法是目前两种常用的方法,考虑到计算复杂度,多数研究在忽略了高阶反射的情况下对信道参数进行了分析<sup>[11]</sup>。文献[12]研究了在 Gb/s 高速可见光通信中高阶反射对可见光系统的影响,估算了高阶反射情况下的信道参数,结果表明仅考虑 3 次反射所计算的信道参数比考虑 5 次反射的信道参数产生的误差最大达到了 26.6%,指出应该依据应用场景考虑合适的反射次数计算可见光信道的参数。

上述对可见光信道表征参数的估算均是在室内空旷模型下得到的近似结果,考虑的反射物为室内墙面、天花板或者地板等固定反射物,而实际的室内环境会放置一些办公桌、书柜等随机分布的反射物,这些反射物的尺寸、表面材料、位置等对信道表征参数的影响并未考虑,信道模型的精确性有待进一步提高。针对该问题,本文建立非空旷密闭室内可见光传输环境,采用三维射线追踪对室内固定反射物及随机分布的反射物引起的多径功率和时延进行估计,并采用有限状态马尔可夫(Markov)链对时延功率分布进行建模,研究随机分布反射物引入的反射功率所占的比重及所产生的时延大小,得到室内可见光时变衰落信道的冲击响应分布,对光源处于室内天花板不同位置的均方根时延扩展进行估算。

## 2 室内可见光信道模型

### 2.1 室内可见光收发模型

室内可见光链路如图 1 所示,该链路包括视距(LOS)链路和非视距(NLOS)链路,收发端采用较大的视场角视距(LOS)通信可以避免对准问题,模型中,光源服从朗伯辐射模型,如(1)式所示。

$$I(\phi) = P_t \left( \frac{n+1}{2\pi} \right) \cos^n \phi, \quad (1)$$

式中  $I(\phi)$  表示辐射强度,  $P_t$  是发送的光功率,  $\phi$  表示从发送端到接收端的入射角,阶数  $n$  与发送端的半功率角  $\phi_{1/2}$  有关,  $n = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})}$ 。如视距传输半功率角的典型值为  $15^\circ$ , 此时的  $n$  为 20。

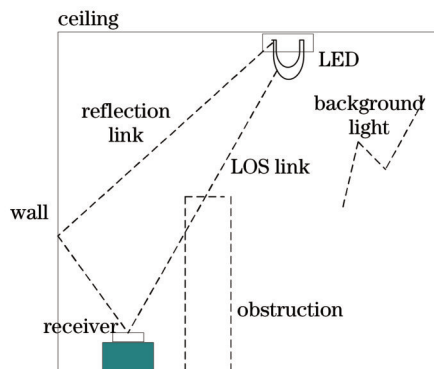


图 1 室内可见光链路

Fig.1 Indoor visible light links

接收端由光带通滤波器、半球形聚光器<sup>[13]</sup>和光电探测器(PD)组成,如图 2 所示。光带通过滤波器可以滤掉背景噪声,或者白炽灯、荧光灯产生的噪声,该滤波器的带宽包含发射光源的光谱。 $\phi$  为光源的辐射角,

入射角  $\psi$  应该小于辐射角  $\phi$ 。理想的非图像聚光器的增益  $G$  为

$$G = \frac{m^2}{\sin^2 \psi_c}, \quad (2)$$

式中  $m$  为材料的折射指数,  $\psi_c$  为一般视场角(FOV),  $\psi_c \leq \pi/2$ 。从(2)式可以看出,如果聚光器的 FOV 较大,则增益较小。当  $\psi_c \approx \pi/2$  时,  $G \approx m^2$ 。

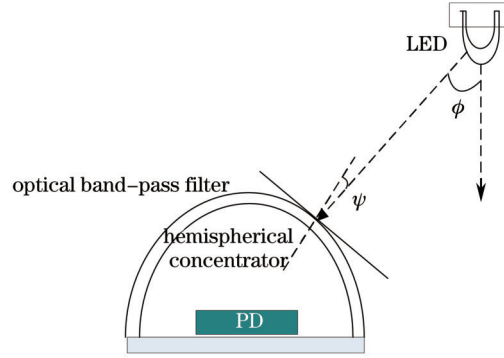


图2 接收模型

Fig.2 Receiver model

## 2.2 室内可见光信道冲击响应

室内可见光多径信道冲击响应可以表示为

$$h(t) = \sum_{k=0}^{K-1} E_k \delta(t - t_k), \quad (3)$$

式中  $K$  表示多径分量的个数,  $E_k$ 、 $t_k$  表示各个多径分量的电场强度和传输时延,  $\delta$  表示冲击函数。时延  $t_k$  由  $d/c$  得到,  $d$  表示传输距离,  $c$  为光速。若反射点  $Q$  的入射电场为  $E^i(Q)$ , 该点在反射点  $S$  产生的电场  $E^{r,d}(S)$  可以表示为

$$E^{r,d}(S) = E^i(Q) \cdot H(Q, S) \cdot \exp(-jks), \quad (4)$$

$$H(Q, S) = R \cdot A_s, \quad (5)$$

式中  $R$  为反射系数,  $A_s$  为反射面的扩散因子,  $k$  为传输常量,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $s$  为与反射点  $S$  的距离,  $\lambda$  为波长。

## 3 三维射线追踪理论

通常室内物体表面都是矩形平面,室内所有反射物体的几何形状都用矩形平面来表示。为了得到更加精确的接收功率及时延分布,就要确定射线所有可能传输路径相应的入射平面的位置及反射平面反射点的位置,即要不断地进行射线与反射平面求交运算。定义射线为  $r(\rho) = r_0 + r_d \rho$ , 其中  $r_0$  为射线的起点,由发射端进行初始化,在每一个反射点再重新初始化新的射线,  $r_d$  为射线方向的单位向量,  $\rho$  表示距离射线起点的距离。  $r_d$  在三维空间中以固定的角度间隔  $\alpha$  进行扫描,对于确定性反射物通过计算射线的偏振分量确定射线是否反射,再计算出反射点的具体位置,判断是否需要继续进行跟踪。

对于随机分布的反射物,假定反射物的分布服从指数分布,  $D$  表示射线起点  $r_0$  与确定性反射物上反射点的平均距离,  $\eta$  表示由随机分布的障碍物引入的“平均障碍物距离”,该值的大小依赖于室内传输环境。  $1/\eta$  的概率密度函数为

$$\varphi(1/\eta) = \begin{cases} D \exp(-D/\eta), & 1/\eta > 0 \\ 0, & 1/\eta \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

随机反射物发生反射的概率  $P_{\text{obs}}(D, \eta)$  分布函数为

$$P_{\text{obs}}(D, \eta) = \begin{cases} 1 - \exp(-D/\eta), & 1/\eta > 0 \\ 0, & 1/\eta \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

由(7)式可以看出,当室内环境中没有随机分布的障碍物时  $\eta = \infty$  和  $P_{\text{obs}} = 0$ 。如果射线与随机反射物相交,并假定反射点在该反射平面不同位置上的分布是等概率的,基于这些假设可计算出新的反射平面和相应的反射点分布的位置,该过程一直重复直到超过最大的反射次数或者射线能量衰减到阈值以下停止对射线的追踪。

接收端采用半球形接收,接收半径为  $\alpha d/\sqrt{3}$ ,  $d$  为发送端到接收端的总传输距离(包括反射路径)。选取半径为  $\alpha d/\sqrt{3}$  主要是因为当发送射线间的角间距为  $\alpha$  时,射线尾部扫描的距离为  $\alpha d$ ,假设波前为局部平面波,射线与接收半球的交叉点会形成边长为  $\alpha d$  等边三角形,该等边三角形的外接球的半径为  $\alpha d/\sqrt{3}$ 。考虑到室内反射物的尺寸,在模型中选取  $\alpha \approx 1^\circ$ <sup>[14]</sup>。

在三维空间以一个固定的角度分割相邻的射线相当于对称地分割一个闭曲面,该曲面的中心点位于多边形区域的中心,这样形成的几何形状是一种正多面体。这种正多面体有正四面体、立方体、正八面体、正十二面体和正二十面体5种类型,每一种多面体有一个同中心轴的内切球和外接球<sup>[15]</sup>。其中正二十面体的角分辨率是最好的,如图3所示,有20个等边三角形作为侧面,12个顶点和30条边<sup>[16]</sup>。如果射线从顶点发射,每条射线就有5条射线与其相邻,射线间的角度间隔  $\alpha$  约为  $63.5^\circ$ 。但是该角间距在射线跟踪模型中过大,计算的精度远远不够。为了得到更小的角间距  $\alpha$ ,对正二十面体的每个面的等边三角形继续细分为4个更小的等边三角形,如此重复,直到角间距满足模型中的要求。如果  $M$  表示所细分的等边三角形的个数,所产生的顶点数为  $4^M \times 10 + 2$ <sup>[16]</sup>,这些顶点位于内切球(半径为  $R_c$ )和外接球面之间(半径为  $R_i$ )。细分之后所有等边三角形的边长均相等,假定为  $m$ ,那么射线间的角度间隔  $\alpha$  在  $\alpha_{\min} = m/R_c$  与  $\alpha_{\max} = m/R_i$  之间。在模型中取  $M=6$  时,产生的射线数为40962条,角度间隔  $\alpha$  为  $0.94^\circ \sim 1.18^\circ$ ,可以使相邻射线之间的角度间隔  $\alpha$  约为  $1^\circ$ ,保证半球接收探测的有效性。

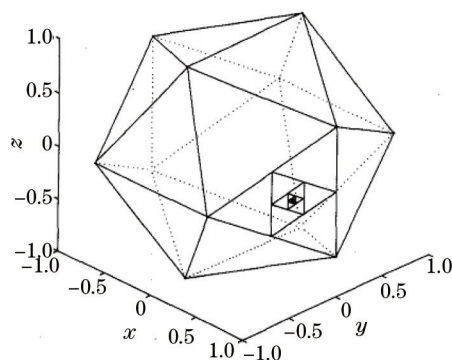


图3 正二十面体模型

Fig.3 Model of regular icosahedron

## 4 有限状态 Markov 建模

### 4.1 有限状态 Markov 理论

有限状态的 Markov 链可以对离散衰落信道的时变特性进行建模<sup>[17-18]</sup>,其主要思想是将信道的统计值划分为有限个离散值,然后将这些离散值映射为不同的 Markov 状态,即采用信道的统计值产生均匀分布的 Markov 链来表示时变信道的衰落过程,可以用于室内可见光时变衰落信道的建模。

假设  $\zeta = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_{K-1}\}$  表示  $K$  个有限状态,  $S_n$  表示第  $n$  个时间间隔中 Markov 过程对应的状态,且  $\{S_n\}$  过程为时间平稳。为了将信道的衰落值  $h$  与 Markov 链的状态对应起来,将  $h$  分割为  $K$  个均匀间隔:

$$\Delta = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{K}, \quad (8)$$

式中  $h_{\max}$  和  $h_{\min}$  分别表示信道衰落的最大和最小值,若第  $n$  个时间间隔中的信道衰落值为  $h_n$ , Markov 链的状态为  $S_n = s_k$ ,  $k$  由(9)式可以得到:

$$h_{\min} + k\Delta \leq h \leq h_{\min} + (k+1)\Delta, k \in \{0, 1, 2, \dots, K-1\}. \quad (9)$$

确定了  $k$  后, 就可以得到每个时间间隔中信道衰落值对应的 Markov 状态, 该 Markov 状态对应的输出幅值由(10)式计算得到:

$$h^{(k)} = h_{\min} + (k + 1/2)\Delta. \quad (10)$$

### 4.2 三维射线追踪估计室内可见光信道冲击响应

采用的仿真环境为 Matlab, 参数设置如表 1 所示。直角坐标中心位于天花板的中心[坐标为(0,0,0)], 发射光源位于天花板中心(0,0,0)处, 接收端位于地板中心(0,0,-3)处。跟踪的射线数为 40962 条, 角度间隔取  $0.94^\circ$ , Markov 建模取  $K=16$ 。在所建立的室内传输环境中仿真研究仅存在视距链路及视距与非视距链路都存在时的信道冲击响应分布, 考虑的反射为墙面、天花板、地板及随机反射物的一次反射。假定随机分布反射物距地板的高度为 1 m, 反射面为 1 m×1.5 m, 反射面为松木质地, 反射系数为 0.8。

表 1 室内可见光系统参数设置

Table 1 Parameters set of indoor visible light system

Parameter	Value
Room size /m <sup>3</sup>	5×5×3
Transmitter power /mW	400
Height of detector to floor /m	0
Detector area /cm <sup>2</sup>	1
Number of LED (light-emitting diodes) array	1
Filed of view /( $^\circ$ )	180
Gain of optical filter	0.94
Refractive index of hemispherical concentrator	1.5
Reflection coefficient $R$ (ceiling, wall, floor, random reflector)	(0.95、0.95、1、0.8)
Reflector spread ractor $A_s$	1

图 4~图 7 仿真参数如表 1 所示, 发射光源的半功率角  $\phi_{1/2}$  为  $15^\circ$ , 尽可能保证传输过程仅为视距链路。从图 4 可以看出该视距链路的最大时延约为 10.35 ns。图 5 是随机分布的反射物发生反射的概率随着平均障碍物距离发生变化时的曲线, 在 5 m×5 m×3 m 的室内传输环境中仅考虑一次反射时, 半功率角  $\phi_{1/2}$  为  $15^\circ$  的光源不会在 4 个墙面和天花板发生反射, 必定引起反射的是地板, 所以射线起点与确定性反射物上反射点的距离  $D$  的估算中考虑的确定性反射物为地板, 仿真估算的  $D$  约为 3.052 m, 从该图中可以看出随着随机分布的障碍物距离光源距离的增加, 反射发生的概率会逐渐减小。图 6 为视距接收强度占总接收强度的比例随着随机分布的反射物发生反射的概率的变化过程, 随机分布反射物反射概率约为 65% 时接收端探测到的几乎全部为经过视距传输的射线, 从图 5 可以看出此时对应的平均障碍物距离约为 2.902 m, 与  $D$  相差约为 0.15 m, 当小于该平均障碍物距离时反射发生的概率增加, 对应图 6 中视距接收强度占总接收强度的比例减

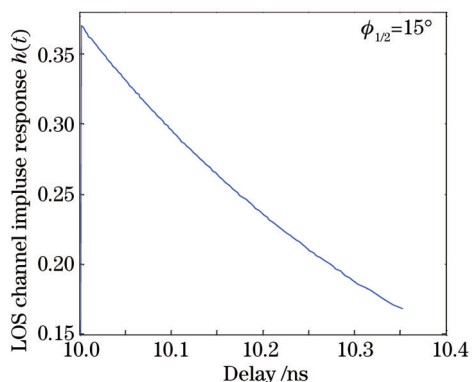


图 4 视距信道冲击响应

Fig.4 LOS channel impulse response

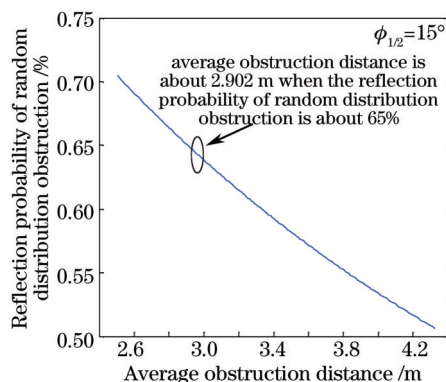


图 5 随机分布的障碍物发生反射的概率随着平均障碍物距离的变化

Fig.5 Variation of reflection probability of random distribution obstruction with the average obstruction distance



小便是由于随机反射物引入了反射强度。图7为反射物(包括固定反射物与随机分布反射物)引入的总反射信道冲击响应,总的时延约为17 ns,在11 ns时反射强度较大,主要是由随机分布反射物引起的,经墙面反射到达接收端的强度很小,所以在11~17 ns反射的强度非常小。

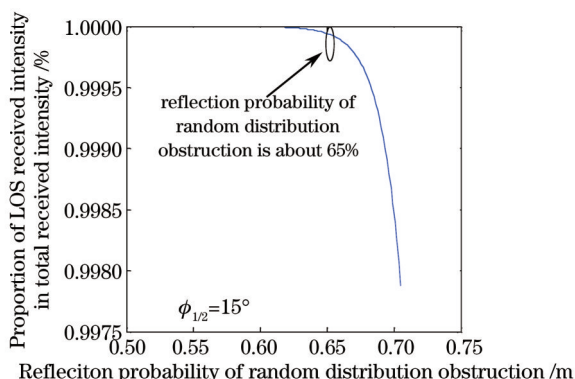


图6 视距接收强度占总接收强度的比例随着随机分布障碍物反射的概率的变化

Fig.6 Variation of the proportion of LOS received intensity in total received intensity with the reflection probability of random distribution obstruction

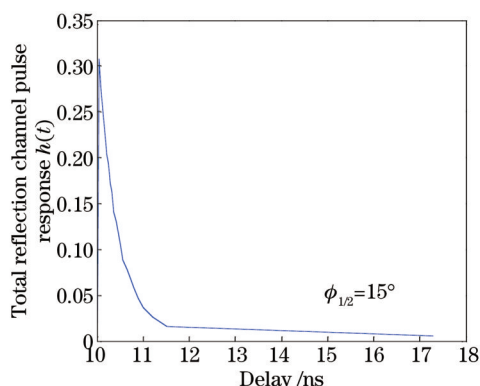


图7 总的反射信道冲击响应

Fig.7 Total reflection channel impulse response

图8~11仿真参数如表1所示,发射光源的半功率角  $\phi_{1/2}$  为  $60^\circ$ ,保证传输过程同时存在如图1所示的视距链路和非视距链路。从图8中可以看出,视距链路的最大时延小于10.18 ns。图9是随机分布的反射物发生反射的概率随着平均障碍物距离发生变化时的曲线,在  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$  的室内传输环境中仅考虑一次反射时,半功率角为  $60^\circ$  的光源会在4个墙面和地板发生反射,射线起点与确定性反射物上反射点的距离  $D$  的估算中考虑的确性反射物为墙面和地板,仿真估算的  $D$  约为3.620 m,随着随机分布的障碍物距离光源距离的增加,反射发生的概率会逐渐减小,与图5相比变化趋势相同,但是图9中存在非视距链路时平均障碍物距离相同的情况下随机分布障碍物发生反射的概率要大。图10为视距接收强度占总接收强度的比例随着随机分布的反射物发生反射的概率变化曲线,随机分布反射物反射概率约为63%时接收端探测到的几乎全部为经过固定反射物传输的射线,从图9可以看出此时对应的平均障碍物距离约为3.579 m,与  $D$  相差约为0.05 m。当小于该平均障碍物距离时反射发生的概率增加,对应图10中视距接收强度占总接收强度的比例明显减小便是由于随机反射物引入了反射强度。图11为反射物(包括固定反射物与随机分布反射物)引入的总反射信道冲击响应,总的时延约为20 ns,随机分布反射物引起的最大时延约为17 ns,从该图中的小图可以看出固定反射物引起的时延约为18~20 ns,但是强度小于随机分布反射物。

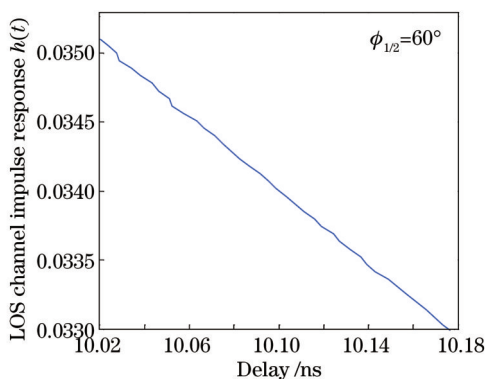


图8 视距信道冲击响应

Fig.8 LOS channel impulse response

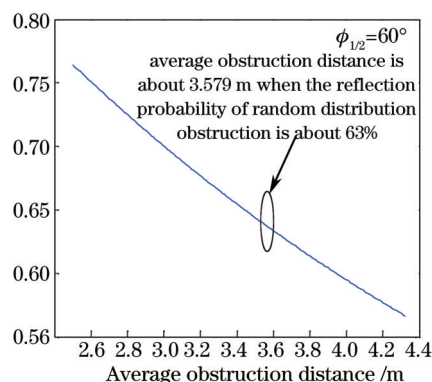


图9 随机分布的障碍物发生反射的概率随着平均障碍物距离的变化

Fig.9 Variation of reflection probability of random distribution obstruction with the average obstruction distance

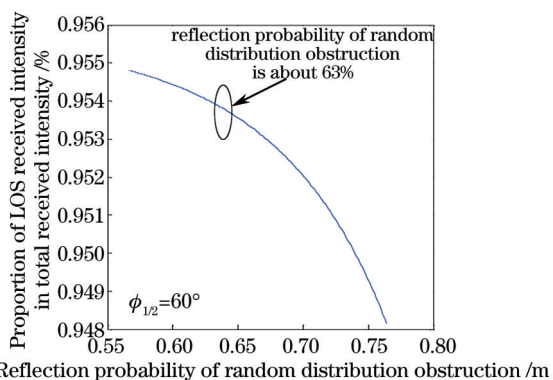


图 10 视距接收强度占总接收强度的比例随着随机分布的障碍物物发生反射的概率的变化

Fig.10 Variation of the proportion of LOS received intensity in total received intensity with the reflection probability of random distribution obstruction

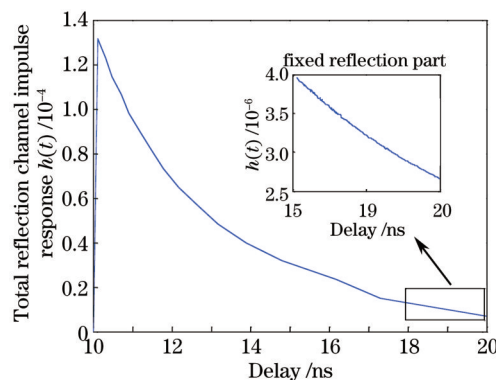


图 11 总的反射信道冲击响应

Fig.11 Total reflection channel impulse response

由以上计算机仿真分析可知,当平均障碍物距离小于光源到固定反射物的平均距离时,仅存在视距链路的传输环境中,反射强度主要由随机分布反射物引入,但对视距接收强度所占比重影响不大。但在视距与非视距链路都存在的传输环境中随机分布反射物所引入的反射强度较大,使得视距接收强度所占比重有较大幅度的减小,在建立非视距室内可见光信道模型时应该考虑随机分布反射物的影响。

表 2 为光源在室内天花板对角线 6 个不同位置时的均方根时延扩展  $\tau_{\text{RMS}}$ 。光源位于天花板中间[坐标为(0, 0,0)]时均方根时延扩展最小,越靠近天花板角落均方根时延扩展越大,在天花板角落时[坐标为(-2.5,2.5,0)]均方根时延扩展达到最大约为 8.65 ns,此时的多径效应更为明显。

表 2 光源在不同位置的均方根时延扩展

Table 2 Root-mean-square delay spread of light source at different positions

Coordinate	(0,0,0)	(-0.5,0.5,0)	(-1,1,0)	(-1.5,1.5,0)	(-2,2,0)	(-2.5,2.5,0)
$\tau_{\text{RMS}} / \text{ns}$	5.75	6.16	6.50	7.13	7.88	8.65

## 5 结 论

采用三维射线追踪及有限状态 Markov 链对非空旷室内可见光模型中的两个信道表征参数进行了初步研究。在仅存在视距链路、视距与非视距链路都存在的非空室内传输环境中,假定随机分布反射物所服从的分布、反射面的质地及反射面距地面的高度,采用三维射线追踪对反射物引入的时延功率分布进行估算,采用有限状态 Markov 链进行建模得到非空室内可见光环境中的信道冲击响应。从结果可知,随机分布反射物对非视距传输环境信道冲击响应的影响相比对视距传输环境信道冲击响应的影响要大。另外,对该非空室内传输环境中光源位于房间对角线上 6 个不同位置的均方根时延扩展进行了估算,结果表明当光源位于天花板角落时均方根时延最大,即多径效应更为突出。接下来工作的重点是研究非空室内传输环境中影响多发多收系统的信道表征参数的因素,建立非空室内可见光多输入多输出(MIMO)信道模型。

## 参 考 文 献

- 1 Li Rongling, Shang Huiliang, Lei Yu, *et al.*. Research of key enabling technologied for high-speed visible-light communiation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050003.  
李荣玲, 商慧亮, 雷 雨, 等. 高速可见光通信中关键使能技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050003.
- 2 Fu Hongshuang, Zhu Yijun. Analysis of the correlation of optical multiple-input multiple-output channel using white LED lighting in indoor line of sight environments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906002.  
付红双, 朱义君. 室内直射环境下白光 LED 的多输入多输出信道相关性分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906002.
- 3 F R Gfeller, U H Bapst. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation [J]. *Proc IEEE*, 1979, 67(11): 1474 - 1486.

- 4 J R Barry. *Wireless Infrared Communications* [M]. Holland: Kluwer Academic, 2002.
- 5 J M Kahn, W J Krause, J B Carruthers. Experimental characterization of non-directed indoor infrared channels [J]. *IEEE Trans Commun*, 1995, 43(234): 1613–1623.
- 6 Do Tronghop, Junho Hwang, Souhwan Jung, *et al.*. Modeling and analysis of the wireless channel formed by LED angle in visible light communication [C]. *International Conference on Information Networking*, 2012. 354–357.
- 7 Kwonhyung Lee, Hyuncheol Park. Channel model and modulation schemes for visible light communications [C]. *IEEE 54th International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2011. 1–4.
- 8 Talha A Khan, Muhammad Tahir, Ahmad Usman. Visible light communication using wavelength division multiplexing for smart spaces [C]. *Consumer Communications and Networking Conference*, 2012. 230–234.
- 9 Xie Zhang, Kaiyun Cui, Minyu Yao, *et al.*. Experimental characterization of indoor visible light communication channels [C]. *International Communication System, Network and Digital Signal Processing*, 2012. 1–5.
- 10 Kwonhyung Lee, John R Barry. Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications [J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(2): 217–219.
- 11 Fang Li, Xinwan Li, Weiwen Zou, *et al.*. Simplified calculation method of indoor optical impulse response based on recursive algorithm [C]. *International Conference on Communication in China Workshops*, 2012. 49–53.
- 12 Zhou Zhou, Chunyi Chen, Mohsen Kavehrad. Impact analyses of high-order light reflections on indoor optical wireless channel model and calibration [J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32(10): 2003–2011.
- 13 Ying Yi, Changping Li, Kyesan Lee. Optimum spread code applied in indoor visible light data transmission for optical multipath dispersion reduction [J]. *IETE Technical Review*, 2013, 30(3): 233–239.
- 14 R J C Bultitude, P Melancon, H Zaghoul, *et al.*. The dependence of indoor radio channel multipath characteristics on transmitter/receiver ranges [J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 1993. 979–990.
- 15 H Takai. In-room transmission BER performance of anti-multipath modulation PSK-VP [J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 1993, 42(2): 177–185.
- 16 A Gheorghiu, V Dragomir. *Geometry of Structural Forms* [M]. London: Elsevier Applied Science, 1978.
- 17 V Bhaskar. Finite-state Markov model for lognormal, chi-square (central), chi-square (non-central), and K-distributions [J]. *Int J Wireless Inf Networks*, 2007, 14(4): 237–250.
- 18 X Zhu, J M Kahn. Markov chain model in maximum-likelihood sequence detection for free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Trans Commun*, 2003, 51(3): 509–516.

栏目编辑: 王晓琰