

室内无线光通信信道分析

荣 健¹, 鲁 辉², 强世锦³

(1. 电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054; 2. 西南交通大学 应用物理系, 四川 成都 610031; 3. 武汉职业技术学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:文章采用基于定点的迭代模型对非定向信道进行分析, 得出了具体的迭代公式。在有家具的房间环境中, 给出了可视光的增益公式, 通过 MATLAB 编程实现了反射次数 $k=0, 1, 2$ 三种情况下的脉冲响应, 给出了仿真图形并加以说明。同时又对空房间的三种情况下的脉冲响应进行了仿真, 通过与有家具的环境的比较, 得出了随房间高度增加, 非可视分量也增加的结论。

关键词:室内无线光通信; 非定向信道; 基于定点的迭代模型

中图分类号: TN925 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2007)01-0018-03

Analysis of indoor wireless optical communication channels

Rong Jian¹, Lu Hui², Qiang Shijin³

(1. College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
2. College of Sciences, Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China;
3. Wuhan Technical College, Wuhan 430074, China)

Abstract: Analysis is made of non-directional channels by using site-based iterative modeling, thus obtaining the specific iterative formula. For rooms with furniture, the optical gain formula of LOS is presented. Impulse responses when reflection times $k=0, 1, 2$ are simulated by MATLAB programming and the simulation graphics given and explained. In addition, the impulse responses for rooms without furniture in the same conditions are also simulated and compared with those for rooms with furniture, leading to the conclusion that the non-LOS components increase along with the height of the rooms.

Key words: indoor wireless optical communication; non-directional channel; site-based iterative modeling

随着科技的发展, 膝上型电脑(laptops)、掌上电脑(palmtops)以及个人数字助理(PDA)等移动数字设备得到了越来越广泛的应用^[1~3], 如何使它们能够随时随地地跟网络互连, 是一个越来越突出的问题。传统的有线系统已无法满足这种需要, 无线红外通信系统的出现, 能够很好地解决此问题。信道研究是红外通信系统分析中的重要一环。在定向的信道中, 光发射机与光接收机的指向范围均有限制; 而对非定向的信道, 光接收机的接收范围无限制。本文主要是对非定向信道进行数学模型上的探讨, 然后用 MATLAB 仿真软件对定向信道和非定向信道的特性进行分析。

1 非定向信道数学模型的建立

基于定点的红外无线信道的迭代模型^[4]算法的关键就是对许多不同位置的接收机和发射机同时进行估算, 这样可以大大减少计算次数。这种方法在用于估计红外无线漫射信道的脉冲响应时显示出了明显的优势, 现在我们用它来计算复杂环境下的非定向脉冲响应。过程分为以下 3 个步骤:

- (1) 建立以室内有发射机、接收机和反射面等物为特征的模型;
- (2) 具体推导计算信道的脉冲响应;
- (3) 进行计算机模拟仿真。

1.1 定点和链路模型

我们的仿真模型如图 1 所示。仿真环境如图 1(a)所示, 对 IM/DD 通信的基带脉冲响应进行修正, 使其完全取决于给定的光源(S)、接收机(R)和环境(E), 这样我们可以把信道的脉冲响应 $h(t)$ 更精确地定义为 $h_E(t; S, R)$ 。

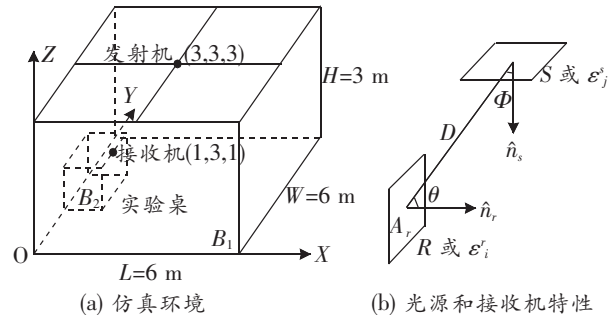


图 1 仿真模型示意图

S 由位矢量 $\vec{r}_s$ 、方向矢量 $\hat{n}_s$, 以及辐射模式

$T(\Phi)$ 表示。 S 可以看成点光源, 用一个三元组表示为

$$S = \{\vec{r}_S, \hat{n}_S, n\}, \quad (1)$$

n 阶的朗伯光源辐射模式

$$T(\Phi) = \frac{n+1}{2\pi} \cos^n(\Phi), \quad (2)$$

式中, Φ 为方向矢量 $\hat{n}_S$ 和 $(\vec{r}_R - \vec{r}_S)$ 的夹角,

$$\cos(\Phi) = \hat{n}_S \cdot (\vec{r}_R - \vec{r}_S) / D, \quad (3)$$

D 为接收机与发射机之间的直线距离。发射光源为朗伯光源, n 为朗伯光源的阶数, 它反映了光源发光的方向性。对于一般的朗伯光源, n 取 1。 R 如图 1(b) 所示, 由位矢量 $\vec{r}_R$ 、方向矢量 $\hat{n}_R$ 、光接收机的光收集面积 A_R 和以 θ (光源发射的光线与接收机面的法线的夹角) 为变量的有效光收集面积 $A(\theta) = A_R g(\theta)$ 表示。

光接收机增益函数 $g(\theta) = \cos(\theta) \cdot 1\{\theta < FOV\}$, 式中 FOV 为接收机的视场范围角, $1\{\cdot\}$ 为指示器函数, 相应的

$$\cos(\theta) = \hat{n}_R \cdot (\vec{r}_S - \vec{r}_R) / D. \quad (4)$$

对于环境 E , 我们把它看做由 N_b 个长方体的箱子 $\{B_1, K, B_{N_b}\}$ 组成, 第 1 个箱子 B_1 表示“全域”, 它里面包含了所有其他的箱子以及所有的光源和接收机。 B_1 可以是一个房间、一层楼, 甚至整座大厦, 内部的箱子可以代表桌子、椅子和人, 甚至墙壁和过道等。我们规定每个箱子的 6 个表面分别平行于 x 、 y 或 z 轴, 这样, 每个箱子就可以用一个角位置矢量 $\vec{r}_{B_i}$ 和一个坐标集合 $\{L_{x,B_i}, L_{y,B_i}, L_{z,B_i}\}$ 来表示, 其中 L_{x,B_i} 、 L_{y,B_i} 和 L_{z,B_i} 分别代表 B_i 箱子沿 x 、 y 、 z 轴的长度。具体到图 1(a) 中, B_1 代表一个房间, B_2 为一个实验桌。为方便起见, 我们把房间的一角作为坐标原点。

1.2 脉冲响应计算

从光源发射出来的光要经过 k 次反射才能到达接收机, 因此脉冲响应 $h_E(t; S, R)$ 可表示为

$$h_E(t; S, R) = \sum_{k=0}^{\infty} h_E^{(k)}(t; S, R), \quad (5)$$

式中, $h_E^{(k)}(t; S, R)$ 为光信号从 S 发出经过 k 次反射后到达 R 的路径的脉冲响应分量。未经反射直接到达接收机 ($k=0$) 的可视 (LOS) 脉冲响应分量为

$$h_E^{(0)}(t; S, R) = V(\vec{r}_S, \vec{r}_R, E) T(\Phi) \times (A_R g(\theta) / D^2) \delta(t - D/c), \quad (6)$$

这里 $D = |\vec{r}_S - \vec{r}_R|$ 为 S 和 R 间的距离, c 为光速。当 S 和 R 间的 LOS 路径未被阻挡时, 可见度函数 $V(\vec{r}_S, \vec{r}_R, E)$ 值为 1, 否则为 0, 其他项遵循前面的规

律。

第 k 次反射的脉冲响应为^[5]

$$h_E^{(k)}(t; S, R) = \int_E \rho_{d\epsilon^r} \times h_E^{(k-1)}(t; S, d\epsilon^r) * h_E^{(0)}(t; d\epsilon^S, R), \quad (7)$$

式中, 积分是对整个环境 E 的积分, ρ 为反射率函数。 $d\epsilon^S$ 和 $d\epsilon^r$ 均代表面积为 dr^2 的微分面, 分别表示光线到达 R 前经过的最后一个反射面元和 S 发出的光经过的第 1 个反射面元。 $d\epsilon^S$ 可以看作一个一阶朗伯“光源”, $d\epsilon^r$ 则可以看作增益函数, 是 $g(\theta) = \cos(\theta) \cdot 1\{\theta < \pi/2\}$ 的“光电探测器”。进一步, 将每个反射面划分成许多个面积为 $(1/P \times 1/P) \text{ m}^2$ 的正方形小面元, P 为每 1 m 长度上被分割的份数。这样, 每个小面元在光线射过来时是作为“光电探测器”, 反射出去时是作为“光源”。因此式 (7) 可近似表示为^[5]

$$h_E^{(k)}(t; S, R) \approx \sum_{i=1}^N \rho_{\epsilon_i^r} h_E^{(k-1)}(t; S, \epsilon_i^r) * h_E^{(0)}(t; \epsilon_i^S, R), \quad (8)$$

式中, ϵ_i^r 和 ϵ_i^S 分别代表第 i 个面元在 $k-1$ 次反射后的“光电探测器”和第 k 次反射后的“光源”。面元的总个数 N 由下式给定:

$$N = 2P^2 \sum_{i=1}^{N_b} (L_{x,B_i} L_{y,B_i} + L_{y,B_i} L_{z,B_i} + L_{x,B_i} L_{z,B_i}), \quad (9)$$

这里 L_{x,B_i} 、 L_{y,B_i} 、 L_{z,B_i} 为第 i 个盒子沿 x 、 y 、 z 轴向的各边长度。

将 $R = \epsilon_i^r$ 代入式 (8) 可以得到:

$$h_E^{(k)}(t; S, \epsilon_i^r) \approx \sum_{j=1}^N \rho_{\epsilon_j^r} h_E^{(k-1)}(t; S, \epsilon_j^r) * h_E^{(0)}(t; \epsilon_j^S, \epsilon_i^r) = \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} h_E^{(k-1)}(t - \tau_{ij}; S, \epsilon_j^r), \quad (10)$$

这里 $\alpha_{ij} = V(\vec{r}_{\epsilon_j^S}, \vec{r}_{\epsilon_i^r}, E) \frac{\rho_{\epsilon_j^r} T(\Phi_{ij}) A_{\epsilon_j^r} g(\theta_{ij})}{D_{ij}^2}$; $\tau_{ij} = D_{ij}/c$ 代表 δ -函数中 S - R 之间光传输产生的时延, Φ_{ij} 、 θ_{ij} 、 D_{ij} 分别代表“光电探测器”对“光源”的夹角, “光源”到“光电探测器”的夹角以及发射点到接收点的距离。

2 红外信道的计算机仿真

2.1 仿真参数的选取

室内物体反射系数如表 1^[5] 所示, 房间格局如图 1(a) 所示。这里假设光源为全向光源, 即发射光束的立体发散角为 2π , 光源为一阶朗伯光源; 接收

机视场 $FOV = \pi/2$; 接收机的光收集面积 $A_r = 10^{-4} \text{ m}^2$ 。

表 1 室内物体反射系数

物体	墙壁	天花板	地面	家具
反射率 ρ	0.8	0.7	0.1	0.4

2.2 计算仿真和分析

一次反射过程如图 2 所示,房间内共有 6 个面,对于高度 $H < 1 \text{ m}$ 的空间,光线反射后无法到达接收机,因此,反射平面为 $H > 1 \text{ m}$ 的 4 面墙壁。

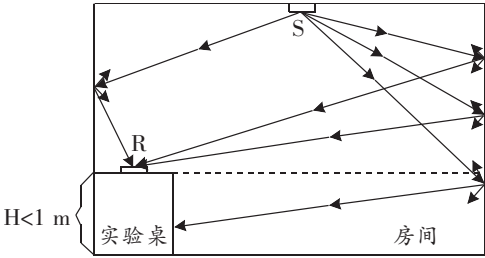


图 2 一次反射示意图

图 3 给出了 $P=100、50、10、5$ 的一次反射脉冲响应曲线,前 3 种情况下曲线基本吻合。 $P=5$ 与前 3 种情况比较,在接近 20 ns 处有轻微数值跳动偏

离。考虑仿真时间与 P 值的大小成反比(见表 2),我们取 $P=10$,这样既能较好地满足仿真精度,又能提高效率。

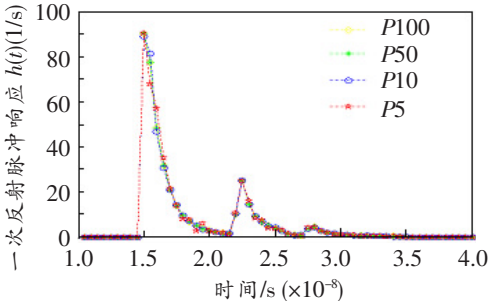


图 3 不同 P 值下的脉冲响应

表 2 不同的 P 值所对应的仿真时间

P	100	50	10	5
耗时 t/s	29.859 4	7.578 1	0.453 1	0.234 4

无家具和有家具两种环境下的仿真如图 4 所示,曲线下的面积表征脉冲响应分量的大小。无家具房间的环境与有家具房间相比有所改变,接收机的坐标变为 $(1,3,0)$,其他参数不变。得到的两种环境的仿真结果如表 3 所示。

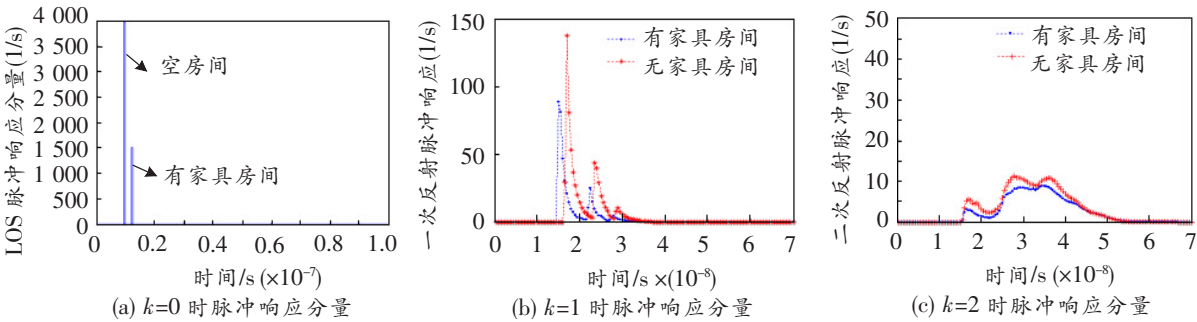


图 4 无家具和有家具两种环境下的仿真

表 3 无家具和有家具两种环境下的仿真结果

环境	脉冲响应分量 量 ($k=0$)	脉冲响应分量 量 ($k=1$)	脉冲响应分量 量 ($k=2$)
无家具空房间	7.534×10^{-7}	3.298×10^{-7}	2.122×10^{-7}
有家具房间	$1.989 4 \times 10^{-6}$	2.1×10^{-7}	1.688×10^{-7}

从表中可见,若忽略更高次的反射波脉冲响应,则在这个非定向可视链接系统中,在有家具的房间里总脉冲响应为 $1.989 4 + 0.21 + 0.168 8 = 2.368 2$, $k=0、1、2$ 时的脉冲响应分量分别占总脉冲响应分量的 84%、8.87% 和 7.13%。空房间 $k=0、1、2$ 三种情况的分量所占比例分别为 58.16%、25.46% 和 16.38%。即 LOS 分量占到大部分,其余分量只占小部分。空房间脉冲响应分量随 k 的增

大,下降幅度比有家具的房间慢,LOS 分量的比例降低。这是由于没有家具,发射机发出的光不会受到阻挡,反射到墙上、地面和天花板的光均能较好地到达接收机,而且发射机和接收机之间距离的增加,使得非可视分量增加。因此,提高发射机和接收机之间的距离和增加室内家具的数量可以使非可视分量在总的接收功率中所占的比例增大,使系统的可连通性增强。图 4(b)的曲线在不同时延下 3 个峰值与反射的墙面相对应,4 面墙中,对于发射机和接收机来说,有两面墙是对称的,因此峰值重合在一起,只呈现出 3 个峰值。在图 4(c)中,光传输的路程增大使得脉冲响应时延及其范围随着 k 值的增大而增大,不同的时延下,响应强度也不相同。