第 54 卷 第 8 期 2005 年 8 月
1000-3290/2005/54(08)/3610-06

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.54, No.8, August, 2005

基于 Phong 模式的分裂 Monte Carlo 模拟红外室内信道脉冲响应函数

张海涛　崔瑞祯　王东生　闫　平　陈　刚　柳　强

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子研究中心,摩擦学国家重点实验室,北京　100084)

(2004 年 11 月 23 日收到;2005 年 2 月 28 日收到修改稿)

介绍了基于 Phong 模式的 Monte Carlo 方法.该方法能够对红外室内通信的重要性能参数——信道脉冲响应函数进行快速有效的计算,可应用于包括漫反射、镜面反射以及粗糙度介于这两种反射之间的表面反射情形的信道中.相对于经典的有限元法,在高次反射时具有更为明显的优势,不但计算速度快,而且计算结果也更接近真实信道环境.该方法的使用,能够为设计高性能红外系统提供更为可靠的参数.

关键词:红外室内通信,脉冲响应函数,分裂 Monte Carlo,Phong 模式

PACC:4230Q,4215D,1240E

1. 引　言

作为信息载体的红外光波,具有信道容量大、带宽宽、无需频率使用申请、抗电磁干扰能力强、相邻房间之间信号互不干扰等诸多优点,为室内高速多媒体通信提供了一种潜在的手段[1,2].红外室内通信的几乎所有计算,包括多路径传输引起的波形畸变、误码率分析等都基于信道的脉冲响应函数,即发射光为时间脉冲函数 $\delta(t)$时,接收器接收到的光信号是时间脉冲响应函数 $h(t)$.$h(t)$的正确计算对于高速室内红外通信的性能预测起着至关重要的作用.计算 $h(t)$的常用方法是有限元法,主要通过将各反射表面细分成若干个足够小的单元,按照反射次数进行迭代计算[3,4].该方法计算量按照细分单元总数随反射次数呈倍数增长,计算效率非常低.由于信道表面的辐射模式是辐射光子的统计分布函数,每次反射可看作二次辐射子光源,因而 $h(t)$的计算可借助在随机过程中广泛使用的 Monte Carlo 方法[5,6]来提高效率.事实上,Lopez-Hernandez 等[7]已证明了 Monte Carlo 方法较有限元法在 $h(t)$的计算中的效率优势.但其信道模型中只考虑了用 Lambert 模式近似的漫反射和镜面反射,并不足以囊括室内表面多样的反射特性,所以应用范围受到限制.

2. 基于 Phong 模式的分裂 Monte Carlo (SMC)方法

文献[8,9]分别实验验证了 Phong 模式能够对各种反射特性进行有效近似,包括镜面反射、漫反射以及表面粗糙度介于二者之间的反射类型.其使用的 Phong 模式由两部分组成(如图 1 所示):以表面法线方向 N 回转对称的漫反射部分和以镜面反射方向 S 回转对称的反射部分(又称为光泽部分),辐射强度表达式为[8,9]

$$I = \rho\frac{G_s}{\pi}[r_d\cos(\beta) + (1 - r_d)\cos^m(\beta - \theta)], \tag{1}$$

式中,r_d 表示信号漫反射部分占总反射光功率的比例,$(0\leqslant r_d\leqslant 1)$,$G_s$ 为平均入射功率,ρ 为反射系数,θ 为入射角,β 为光线出射方向 E 与表面法线方向 N 的夹角,指数 m 显示表面辐射方向性,m 越大辐射越集中在镜面反射方向,表面光泽性就越明显.为了使(1)式与物理意义更相符合,本文对(1)式作了一些小的修正,

$$I = \rho\frac{G_s}{\pi}\left[r_d\cos(\beta) + (1 - r_d)\frac{m+1}{2}\cos^m(\alpha)\right], \tag{2}$$

式中,增加的系数$(m+1)/2$ 是为了使能量守恒,α 为出射方向 E 与镜面反射方向 S 的夹角,α 替换了(1)式中的 $\beta-\theta$,将原表达式从入射平面扩展到整

个立体空间(出射方向 E 在入射平面时,$\alpha=\beta-\theta$).漫反射及标准的镜面反射分别为 $r_d=1$ 和 $r_d=0$ 时的 Phong 模式的特殊情形.

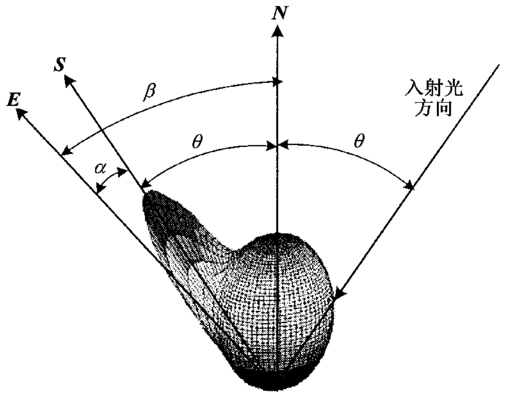

图 1　Phong 模式示意图

图 1 表明 Phong 模式没有 Lambert 模式那样的统一回转对称轴,很难如 Lopez-Hernandez[7] 那样使用一般的 Monte Carlo 方法来产生新的随机出射光线,因为'二次辐射子光源'的光线随机出射方向 E 与表面法线的夹角 β 大于某一给定角度 B 的概率 $P(\beta\geqslant B)$的表达式是一个非常复杂的三角函数,在由均匀随机函数转换成光线出射方向的过程中需解超越方程.考察(2)式可以发现,虽然辐射强度分布没有统一的回转对称轴,但等号右端第一、第二项能够分离开来,可分别看作指数为 1 和 m 的广义 Lambert 体,其回转对称轴分别为 N 和 S.即每条入射光线对应的出射光线分裂成两条,出射方向的概率密度分别按方向 N 和 S 回转对称.这种基于 Phong 模式的 Monte Carlo 方法这里简称为 SMC.下面说明其具体实施步骤.

设指数为 n 的广义 Lambert 体光线出射方向 E 的方位角为β,则辐射强度表达式为

$$I=\frac{n+1}{2\pi}\rho G_s\cos^n(\beta). \tag{3}$$

以入射点为坐标原点,辐射强度回转对称轴为 z 轴,光线出射的旋转角为 ω,则出射光线方位角 β 大于等于Φ 的概率为

$$P(\beta\geqslant\Phi)=1-\frac{1}{\rho G_s}\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\omega\int_0^{\Phi}\frac{(n+1)\rho P_s}{2\pi}\times\cos^n\beta\sin\beta\mathrm{d}\beta=\cos^{n+1}(\Phi). \tag{4}$$

计算时假定 $P(\beta\geqslant\Phi)$是一个在[0,1]区间上的均匀随机数.令 μ,ν 分别为在[0,1]和[0,2π]上的均匀随机数,则 Lambert 模式随机出射光线的方向矢量 E 由μ,ν 产生,即

$$\boldsymbol{E}=(x,y,z)=\left(\sqrt{1-\sqrt[n+1]{\mu}}\cos(\nu),\ \sqrt{1-\sqrt[n+1]{\mu}}\sin(\nu),\sqrt[n+1]{\mu}\right). \tag{5}$$

然后将 E 通过坐标变换转换成室内统一坐标体系下的方向矢量 $\boldsymbol{e}$.

利用上述广义 Lambert 体出射光线的随机产生算法,即可对 Phong 模式近似下的信道的 $h(t)$用 SMC 方法进行快速计算.

设发射光源、接收器的位置矢量分别为 $\boldsymbol{T},\boldsymbol{R}$,表面法线方向矢量分别为 $\boldsymbol{n}_t,\boldsymbol{n}_r$.发射光源为指数等于 n 的 Lambert 体,总功率为 G,接收器有效感光面积为 A_R,视场为 F.发射光源由 N 条随机光线组成,由(5)式产生光线随机出射的方向矢量 $\boldsymbol{e}_{i0}$,其中下标变量 i 表示第 i 条光线,第二个下标用整数 k 标注,表示第 k 次反射,$k=0$ 表示从发射光源出射.按照一般的 Monte Carlo 方法,跟踪到达接收器的那些光线行经的路程和携带的功率,将同一时间段到达的光线功率累加,从而得到脉冲响应函数 $h(t)$.但这种方法由于光线在欲考察的有限次反射内,到达接收器的概率非常小,大约是 10^6 光线中有一条到达接收器,所以计算上的浪费非常惊人.不过,若在发射器随机产生光线前,先计算发射器通过直接链路到达接收器的概率 P_o,可以使计算效率大为提高.其中

$$P_o=\frac{n+1}{2\pi}\left(\frac{\boldsymbol{R}-\boldsymbol{T}}{|\boldsymbol{R}-\boldsymbol{T}|}\cdot\boldsymbol{n}_t\right)^n\frac{A_R\boldsymbol{n}_r\cdot(\boldsymbol{T}-\boldsymbol{R})}{|\boldsymbol{R}-\boldsymbol{T}|^3}\times\mathrm{rect}\left[\frac{1}{F}\arccos\left(\frac{\boldsymbol{T}-\boldsymbol{R}}{|\boldsymbol{T}-\boldsymbol{R}|}\cdot\boldsymbol{n}_r\right)\right], \tag{6}$$

式中 $\mathrm{rect}(x)$表示矩形函数,当$|x|\leqslant 1/2$ 时,$\mathrm{rect}(x)=1$,其余为零.接收器接收到的直接来自发射器的光功率为 $G\cdot P_o$.

接着再产生随机发射光线,每条光线携带的功率应为 $G(1-P_o)/N$,为简化计算,可近似取 G/N.这种处理会使 $h(t)$值偏大,而且误差会随着发射次数的增加而增加.但由于 P_o(一般为 10^{-6}的数量级)很小,且光线功率以各次反射系数的乘积为倍数,衰减随反射次数增加而增大,所以这个误差基本可以忽略不计.发射光线到达 Phong 模式的反射表面后,分裂成两条出射光线,出射方向均按(5)式产生,只是 z 轴的方向分别为N 和 S,前者表示漫反射部分,在(5)式中取 $n=1$,携带功率为总出射功率的 r_d 倍;后者表示光泽部分,在(5)式中取 $n=m$,携带功率为总出射功率的$(1-r_d)$倍.最后将各自产生的出

射矢量 E 分别变换到统一坐标体系中.

用 P_{ik} 表示光线 i 在第 k 次反射时与表面交点的位置矢量,设反射系数为 ρ_{ik},随机出射方向矢量为 e_{ik},则有

$$\boldsymbol{P}_{ik} = \boldsymbol{P}_{[i/2](k-1)} + l\boldsymbol{e}_{i(k-1)}$$

$$(i = 1,2,\cdots,2^{k-1}N;k = 1,2,\cdots,K;\boldsymbol{P}_{i0} = \boldsymbol{T}), \quad (7)$$

式中[]表示向正无穷方向取整.光线在每次反射后都一分为二,所以第 k 次反射后的光线总数变为 2^kN.参量 $|l|$ 表示 $\boldsymbol{P}_{ik}$ 与 $\boldsymbol{P}_{i(k-1)}$ 的距离,将(7)式代入室内各反射平面甚至曲面方程,即可解得一组 l 的值,最小的正 l 是光线在第 $k-1$ 次与第 k 次反射之间所行经的距离.利用 $\boldsymbol{P}_{i0} = \boldsymbol{T}$ 和 $\boldsymbol{e}_{i0}$ 的初始条件以及(5)式可递推出光线各次随机反射时的位置矢量 $\boldsymbol{P}_{ik}$.令 $\boldsymbol{d}_{ik} = \boldsymbol{R} - \boldsymbol{P}_{ik}$,$\boldsymbol{P}_{ik}$ 处的表面法线方向矢量为 $\boldsymbol{n}_{ik}$,若 $|\boldsymbol{d}_{ik}|^2 \gg A_{\mathrm{R}}$ 时,则光线 i 在第 k 次反射时通过直接链路到达接收器的概率 $P(i,k)$ 为

$$P(i,k) = \frac{1}{2\pi}\left[2r_{\mathrm{d}}\left(\frac{\boldsymbol{d}_{ik}\cdot\boldsymbol{n}_{ik}}{|\boldsymbol{d}_{ik}|}\right) + (1-r_{\mathrm{d}})(m+1)\right.$$
$$\left.\times\left(\frac{\boldsymbol{d}_{ik}\cdot\boldsymbol{S}_{ik}}{|\boldsymbol{d}_{ik}|}\right)^m\right]\frac{A_{\mathrm{R}}(-\boldsymbol{d}_{ik}\cdot\boldsymbol{n}_{\mathrm{r}})}{|\boldsymbol{d}_{ik}|^3}$$
$$\times\mathrm{rect}\left[\frac{1}{F}\arccos\left(\frac{-\boldsymbol{d}_{ik}\cdot\boldsymbol{n}_r}{|\boldsymbol{d}_{ik}|}\right)\right]$$
$$(i = 1,2,\cdots,2^{k-1}N;k = 1,2,\cdots,K), \quad (8)$$

式中 S_{ik} 表示光线 i 在第 k 次反射时的镜面反射方向,

$$\boldsymbol{S}_{ik} = \boldsymbol{e}_{[i/2](k-1)} - 2[\boldsymbol{e}_{[i/2](k-1)}\cdot\boldsymbol{n}_{ik}]\cdot\boldsymbol{n}_{ik}. \quad (9)$$

另外,当 $k=1$ 时,$\boldsymbol{P}_{ik}(i=1,2,\cdots,N)$ 处的总出射功率 G_{i1} 为

$$G_{i1} = \frac{G}{N}\rho_{i1}. \quad (10a)$$

当 $k=2,3,\cdots,K$ 时,$\boldsymbol{P}_{ik}(i=1,2,\cdots,2^{k-1}N-1)$ 处的总出射功率为

$$G_{ik} = \rho_{ik}G_{[i/2](k-1)}\cdot(r_d)_{[i/2](k-1)}, \quad (10b)$$

$$G_{(i+1)k} = \rho_{(i+1)k}G_{[i/2](k-1)}\cdot[1-(r_d)_{[i/2](k-1)}]. \quad (10c)$$

光线从发射开始经 k 次反射后到达接收器行经的路程 $L_{ik}(i=1,2,\cdots,2^{k-1}N)$ 为

$$L_{ik} = \begin{cases} |\boldsymbol{P}_{ik} - \boldsymbol{T}| + |\boldsymbol{d}_{ik}| & (k=1), \\ |\boldsymbol{P}_{[i/2^{k-1}]1} - \boldsymbol{T}| + \sum\limits_{j=2}^{k}|\boldsymbol{P}_{[i/2^{k-j}]j} - \boldsymbol{P}_{[i/2^{k-j+1}](j-1)}| + |\boldsymbol{d}_{ik}| & (k=2,3,\cdots,K). \end{cases} \quad (11)$$

房间的各种反射表面都可由各种参数的 Phong 模式表示,则经过 K 次反射后的脉冲响应函数为

$$h(t) = GP_{\mathrm{o}}\delta\left(t - \frac{|\boldsymbol{R}-\boldsymbol{T}|}{c}\right) + \sum_{k=1}^{K}h_k(t), \quad (12)$$

式中,$h_k(t)$ 表示各次反射对应的脉冲响应曲线,c 为光在空气中的速度.

$$h_k(t) = \sum_{i=1}^{2^{k-1}N}G_{ik}P(i,k)\delta\left(t - \frac{L_{ik}}{c}\right).$$

信道表面若均为漫反射或者镜面反射,只需将(8),(10)式中 $P(i,k)$ 和 G_{ik} 的表达式取成 $r_{\mathrm{d}}=1$ 或 $r_{\mathrm{d}}=0$,(12)式中的变量 i 取值区间变为$[1,N]$.若 $0<r_{\mathrm{d}}<1$,则计算量将为 $r_{\mathrm{d}}=0,1$ 时的 $2(2^K-1)/K$ 倍,如 $K=4$ 时,为 7.5 倍,不过其高效性仍是有限元法无法比拟的.

3. 计算结果

使用 SMC 方法对比考察两种近似信道结构 A 和 B.结构 A 的信道参数为:房间大小为 10 m×10 m×3 m,以地板的一个墙角为坐标原点,地板长度方向、宽度方向分别为 x,y 轴,房间的高度方向为 z 轴,则 $\boldsymbol{T}=(5.0\ \mathrm{m},5.0\ \mathrm{m},3.0\ \mathrm{m})$,$\boldsymbol{n}_{\mathrm{t}}=(0,0,-1)$,$\boldsymbol{R}=(2.5\ \mathrm{m},2.5\ \mathrm{m},0.0\ \mathrm{m})$,$\boldsymbol{n}_{\mathrm{r}}=(0,0,1)$,发射、反射均为指数 1 的 Lambert 体,各墙壁表面的反射系数为 0.8.另外,$F=180°$,$A_{\mathrm{R}}=1\ \mathrm{cm}^2$,$G=1\ \mathrm{W}$,$\tau=0.2\ \mathrm{ns}$.结构 B 除了天花板为反射系数 0.8,$r_{\mathrm{d}}=0.001$,$m=280$ 的玻璃外,其余参数与结构 A 同.

图 2 是结构 A 的计算结果.该结果与有限元法得到的结果[10]一致.图 2(a)示出接收器检测到的从发射光源直接照射的光功率及第 1、第 2、第 3、第 4 次反射时的光功率与 $h(t)$ 功率总和的比值 η(分别

为49.34%，3.98%，25.47%，9.12%，12.08%）以及功率曲线，由于各墙的反射系数均为 0.8，以至于第 3、第 4 次反射贡献的功率仍占较大的比重，甚至都大于第 1 次反射贡献的功率．图 2(b)示出不同总反射次数 K 对应的 $h(t)$ 曲线，可以看出，K 越大 $h(t)$ 覆盖的时间范围就越宽．图 2(c)是图 2(b)中各 $h(t)$ 对应的频谱响应幅值，$K=2,3,4$ 时，频率越高响应幅度差别就越小，意即高次反射的影响主要集中在低频部分．图 2(d)是将不同 K 值下的频谱分别按照各自的零频归一化后的幅值曲线，信道的 -3dB 带宽在 $K=1$ 时已经超过本图显示范围，$K=2,3,4$ 时分别为 10，8，6 MHz．由此可知，反射次数如果取得不够高，信道带宽的估计将会偏大．随反射次数按 2 的倍数增长的 SMC 方法相对按有限元总数的倍数增长的有限元法，将随着反射次数的增加，计算效率具有更明显的优势．

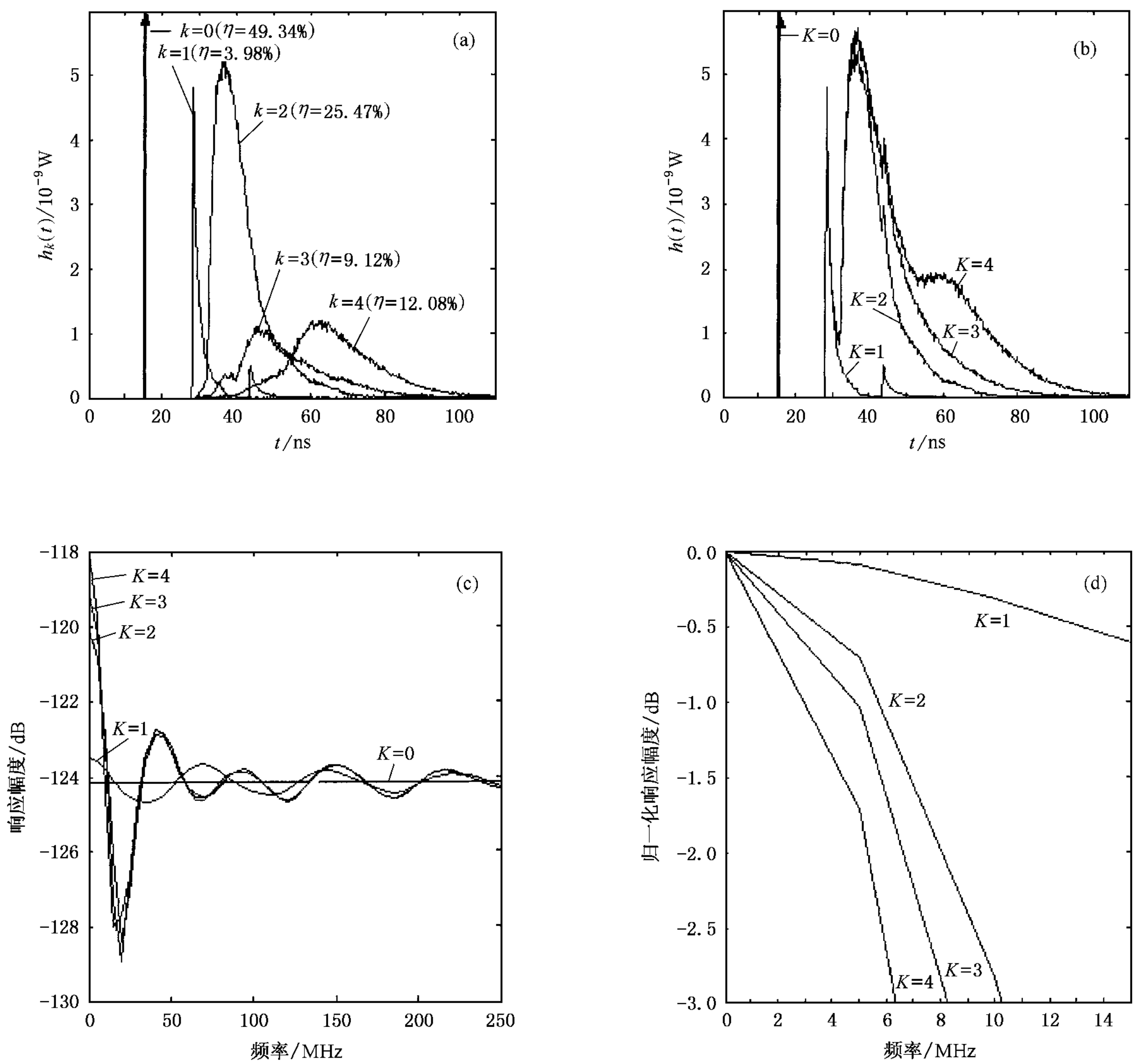

图 2　结构 A 计算结果　(a)为各次反射对 $h(t)$ 的贡献，(b)为取不同的总反射次数 K 时的 $h(t)$，(c)为(b)中各 $h(t)$ 对应的频谱，(d)为归一化频谱

图 3 是结构 B 的计算结果．图 3(a)是 $k=0$—4 时的 η 值及贡献 $h(t)$ 的功率曲线．图 3(b)是 K 取 4 时，结构 A 和结构 B 的 $h(t)$ 曲线比较．从图 3(b)可以看出：由于天花板不参与第 1 次反射的贡献，所以两条曲线在大约 35 ns 以前是重合的；第 2 次以后的反射，由于结构 B 的天花板的镜面反射部分很强，所以曲线不像结构 A 那样光滑，且两条曲线在除直接链路外的第二个峰值处差别明显．图 3(c)是不同 K 值下的 $h(t)$ 对应的频谱响应幅值曲线，高次反射的影响仍然集中在低频部分．图 3(d)是不同 K 值下按零频归一化后的频谱，-3dB 带宽在 $K=1$ 时超过本图读出范围，$K=2,3,4$ 时分别为 11，9，7 MHz．结

构 B 只有一个非 Lambert 反射表面,结论就与结构 A 明显不同.由此可看出使用 Phong 模式近似反射特性的重要性,如果不考虑实际表面的各种反射特性而简单地用 Lambert 模式近似,就会失去理论预测的真正意义.

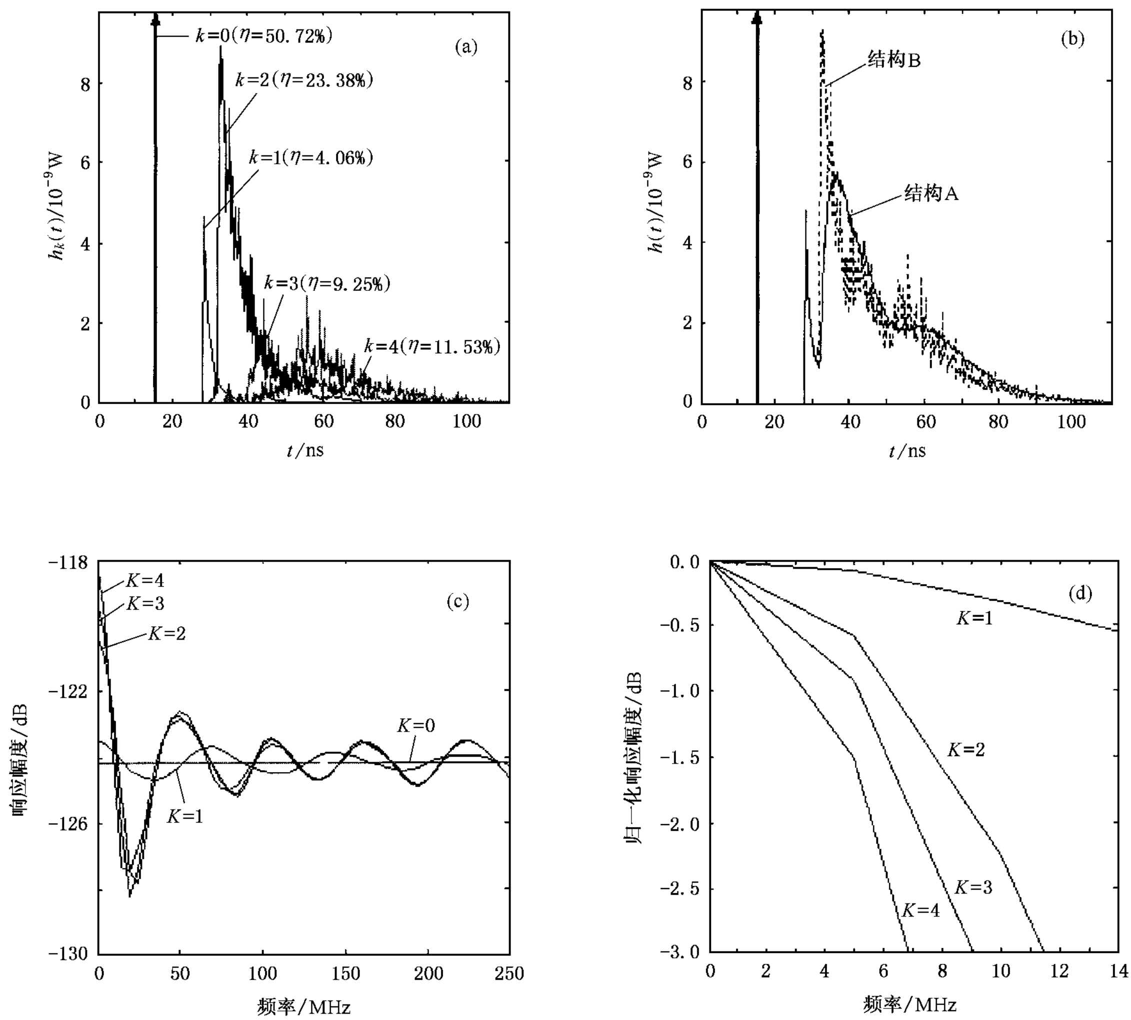

图 3 结构 B 计算结果 (a)为各次反射对 $h(t)$的贡献,(b)为与结构 A 的 $h(t)$比较($K=4$),(c)为取不同的总反射次数 K 时的 $h(t)$对应的频谱,(d)为归一化频谱

4. 结 论

模拟脉冲响应函数的准确程度,取决于模型的信道光学特性与实际相符的程度.Phong 模式能够较全面地描述各种室内信道表面的反射特性,包括漫反射、镜面反射以及介于二者之间的光泽表面的反射情形,能够较真实地模拟现实室内红外通信环境.基于 Phong 模式,采用 SMC 方法能够快速完成信道脉冲响应函数的计算,为进一步的通信性能评估和预测提供可靠的基础.文中发射光源假设的是广义 Lambert 体,实际使用时并不局限于此,对于高斯分布、均匀分布等发射光源可用类似的方法计算.

[1] Elmirghani J M H 2003 *IEEE Commun. Mag.* **41** 48
[2] Boucouvalas A 2003 *IEE P-Optoelectron.* **150** 425
[3] Barry J R, Kahn J M 1995 *Appl. Opt.* **34** 3764
[4] Lomba C R, Valadas R T, Oliveira Duarte A M 1994 *International Zurich Seminar on Digital Communications* (Zurich: Springer-Verlag) p285

[5] Liu Z L, Zhang X F, Yao K L *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 2115

[6] Wang W M, Niu Y C, Chen J H *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1520

[7] Lopez-Hernandez F J, Perez-Jimenez R, Santamaria A 2000 *Opt. Eng.* **39** 2775

[8] Lomba C R, Valadas R T, Oliveira Duarte A M 1998 *IEE P-Optoelctron.* **145** 191

[9] Yang H, Lu C 2000 *IEE P-Optoelectron.* **147** 301

[10] Wong K K, O'Farrell T *The 11th IEEE International Symposium on Indoor and Mobile Radio Communications* (Vol. 2) (New York: IEEE) p933

Split Monte Carlo for impulse responses on the infrared indoor channels on the basis of Phong's model

Zhang Hai-Tao Cui Rui-Zhen Wang Dong-Sheng Yan Ping Chen Gang Liu Qiang

(*State Key Laboratory of Ttribology, Center for Photonics and Eelectronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

(Received 23 November 2004; revised manuscript received 28 February 2005)

Abstract

A split Monte Carlo (SMC) algorithm, based on the Phong's model, for the estimation of the impulse response on the infrared indoor channels is presented. It can be applied to the indoor channel including various reflection patterns, including diffuse, mirror and other non-Lambert reflections. The simulation of the indoor optical channel by SMC method based on the Phong's model can benefit significantly the design of high performance infrared systems. The calculation is much faster than the classical deterministic method, and the speed advantage is more obvious at a large number of reflections.

Keywords: infrared indoor channel, impulse response, split Monte Carlo, Phong's model

PACC: 4230Q, 4215D, 1240E