

文章编号: 0253-2239(2006)08-1220-6

基于 P_3 近似的空间分辨漫反射研究*

高宗慧 刘迎** 郭云峰 田会娟

(天津大学理学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 光源附近组织的空间分辨漫反射是近年来生物医学光子学领域的一个研究热点,其目的是发展一种能够测定活体生物组织光学参量的新技术。漫射近似理论研究光源附近组织的空间分辨漫反射具有很大局限性。 P_3 近似理论考虑了相函数的三阶矩,能较准确地描述光源附近组织的光辐射分布。研究了基于 P_3 近似的空间分辨漫反射,从输运理论的 P_N 方程组出发,导出了 P_3 近似方程组和 P_3 近似的格林函数解;阐述了漫射近似与 P_1 近似的关系,给出了外推边界条件下,准直光束近似后的 P_3 近似漫反射率的完整表示,讨论了相函数二阶参量对 P_3 近似漫反射的影响,并与漫射近似和蒙特卡罗模拟结果进行了比较,指出了 P_3 近似的应用范围。

关键词: 医用光学与生物技术; 源和探测器微距; P_3 近似; 漫反射

中图分类号: Q631 文献标识码: A

Study of Spatially Resolved Diffuse Reflection Based on P_3 Approximation

Gao Zonghui Liu Ying Guo Yunfeng Tian Huijuan

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science, Ministry of Education, College of Science, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: Spatially resolved reflection close to light source has drawn great attention in the field of medical optics and photonics recently. This research is considered to develop a new noninvasive technique of measuring the optical properties of intravital biological tissue. It is limited to study the spatially resolved diffuse reflection of tissue close to light source with diffusion approximation. The radiance distribution close to light source can be analyzed by P_3 approximation theory considering the third-order moment of phase function. The spatially resolved diffuse reflection based on P_3 approximation is studied. The equation set of the P_3 approximation and its Green function approximate solution are derived from the P_N equation set of the transport theory. The relationship between P_1 approximation and the diffusion approximation is demonstrated, and a complete solution of P_3 approximation with the extrapolated boundary conditions and collimated beam approximation is obtained. The effects of the second-order parameter on the P_3 approximation diffuse reflection are studied, and the results are compared with them of diffusion approximation and Monte Carlo simulation. The application range of P_3 approximation is presented.

Key words: medical optics and biotechnology; short source-detector separation; P_3 approximation; diffuse reflection

1 引 言

光在生物介质表面的漫反射理论分为解析模型和蒙特卡罗(Monte Carlo)模型两种,目前广泛采用的解析模型是漫射近似。漫射近似是描述光在生物介质中传输的输运方程的一阶近似理论,对于半无限均匀介质,能够给出一个相对简单的空间分辨漫

反射率表达式 $R_{DA}(\rho)^{[1]}$, ρ 表示探测器到光源距离。对于较复杂问题,研究多采用蒙特卡罗模型^[2~4]。解析分析,例如张智、骆清铭等^[5]用数值方法研究了非均匀生物组织中的光子迁移问题,王喜昌等^[6]研究了三层介质的漫射方程求解问题。在漫射近似下, $R_{DA}(\rho)$ 只与生物组织的一阶参量 μ_a (吸收系数)

* 国家自然科学基金(60278004)资助课题。

作者简介: 高宗慧(1981~),女,山西人,天津大学物理系光学专业硕士研究生,主要从事生物医学光子学领域的研究。
E-mail: gaozonghui@163.com

** 通信联系人。E-mail: liaying@tju.edu.cn

收稿日期: 2005-11-02; 收到修改稿日期: 2005-12-27

和 μ'_s (有效散射系数) 有关, ρ 远大于一个输运平均自由程 l_t , $l_t \equiv 1/(\mu_a + \mu'_s)$ 。对于典型的生物组织光学参量: $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$, $\mu'_s = 1 \text{ mm}^{-1}$, $l_t \approx 1 \text{ mm}$, ρ 通常选取大于 6 mm 。

光源附近的空分分辨漫反射的研究对许多实际应用是必要的。例如当需要对局部组织或浅表组织进行测量时, 或需要以内窥方式测量时, 光源与探测器之间的距离 ρ 需要限制在几个毫米^[7]。对于光源附近的漫反射, 漫反射率 $R(\rho)$ 要比 $R_{DA}(\rho)$ 复杂得多。1999 年 Bevilacqua 等^[3] 用蒙特卡罗方法对光源附近约 1 个输运平均自由程的漫反射进行了研究, 指出光源附近组织的光辐射与相函数的前两阶矩有很大关系, 并引入了与相函数二阶矩有关的光学参量 γ 。2001 年 Hull 等^[8] 研究了半无限介质 P_3 的近似解, 显示了 P_3 近似解和漫射近似解在描述

光源附近漫反射的差别。刘迎等人研究了散射相函数及其二阶参量 γ 的性质^[9], 并研究了双参量组合相函数的结构因子对 $R(\rho)$ 的影响^[10]。

本文主要阐述了输运方程的球谐函数解, 从 P_N 方程组出发, 导出了 P_3 近似方程组及其格林函数解; 阐述了漫射近似与 P_1 近似的关系, 给出了外推边界下, 将准直光束作点光源近似后的 P_3 近似漫反射率的完整表示; 研究了二阶参量 γ 对 P_3 近似漫反射率的影响, 并与蒙特卡罗模拟结果进行了比较。

2 输运方程的球谐函数解

辐射强度 $L(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ 定义为介质中任意点 \mathbf{r} 处 \mathbf{s} 方向的平均光功率密度, 根据能量守恒得到

$$\frac{1}{c} \frac{\partial L(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t)}{\partial t} + \mathbf{s} \cdot \nabla L(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t) + \mu_t L(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t) - \mu_s \int_{4\pi} L(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t') p(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\Omega = S(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t), \quad (1)$$

(1) 式称为辐射传输方程或玻尔兹曼 (Boltzmann) 方程, 其中 $S(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t)$ 代表光源项。对于均匀散射介质, 由于对称性, 球谐函数 $Y_{lm}(\Omega)$ 约化为勒让德多项式 $P_l(\eta)$, $\eta = \mathbf{s} \cdot \mathbf{r}$, \mathbf{r} 是 r 轴的轴向单位矢量。将 (1) 式中 $L(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t)$ 、 $p(\mathbf{s}, \mathbf{s}')$ 、 $S(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t)$ 用 $P_l(\eta)$ 展开:

$$\begin{cases} L(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t) = L(r, \eta, t) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2l+1}{4\pi} \varphi_l(r, t) P_l(\eta), \\ S(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t) = S(r, \eta, t) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2l+1}{4\pi} q_l(r, t) P_l(\eta), \\ p(\mathbf{s}, \mathbf{s}') = p(\eta_0) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2l+1}{4\pi} g_l P_l(\eta_0), \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{式中} \quad g_l = 2\pi \int_{-1}^1 p(\eta_0) P_l(\eta_0) d\eta; \quad \varphi_l(r) = 2\pi \int_{-1}^1 L(r, \eta) P_l(\eta) d\eta, \quad (3)$$

其中 $\eta_0 = \cos \gamma = \mathbf{s} \cdot \mathbf{s}'$, $P_l(\eta_0) = P_l(\eta) P_l(\eta') + 2 \sum_{m=1}^l \frac{(l-m)!}{(l+m)!} P_l^m(\eta) P_l^m(\eta') \cos m(\phi - \phi')$, 利用 $P_l(\eta)$ 的正交性, 可以得到

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \varphi_l(r, t)}{\partial t} + \frac{l}{2l+1} \frac{\partial \varphi_{l-1}(r)}{\partial r} + \frac{l+1}{2l+1} \frac{\partial \varphi_{l+1}(r)}{\partial r} + (\mu_t - \mu_s g_l) \varphi_l(r) = q_l(r), \quad l = 0, 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中 $\mu_t = \mu_a + \mu_s$

3 P_1 近似和漫射近似

令 (4) 式中 $l = 1$, 得到 P_1 近似

$$\begin{cases} \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi_0(r, t)}{\partial t} + \frac{\partial \varphi_1(r, t)}{\partial r} + (\mu_t - \mu_s g_0) \varphi_0(r, t) = q_0(r, t), \\ \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi_1(r, t)}{\partial t} + \frac{1}{3} \frac{\partial \varphi_0(r, t)}{\partial r} + (\mu_t - \mu_s g_1) \varphi_1(r, t) = q_1(r, t), \end{cases} \quad (5)$$

漫射近似在 P_1 基础上考虑了下面近似:

1) 令 $q_1(r, t) = 0$, 从(5) 得到

$$D \nabla^2 \varphi_0(r, t) - \mu_a \varphi_0(r, t) = -q_0(r, t) + (1 + 3D\mu_a) \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi_0(r, t)}{\partial t} + \frac{3D}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi_0(r, t)}{\partial t^2} - \frac{3D}{c} \frac{\partial q_0(r, t)}{\partial t}, \quad (6)$$

这一近似, 表明漫射近似将光源处理为点光源。应用漫射近似时, 要求观察点远离光源(通常大于 6~8 个输运平均自由程 l_t), 就是为了满足这个近似条件。

2) 入射源的变化频率小于 1 GHz, (6) 式中右边的最后两项可以忽略

$$D \nabla^2 \varphi_0(r, t) - \mu_a \varphi_0(r, t) = -q_0(r, t) + (1 + 3D\mu_a) \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi_0(r, t)}{\partial t}, \quad (7)$$

3) $3D\mu_a \ll 1$

$$D \nabla^2 \varphi_0(r, t) - \mu_a \varphi_0(r, t) = \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi_0(r, t)}{\partial t} - q_0(r, t), \quad (8)$$

式中 $D^{-1} = 3(\mu_a + \mu'_s)$, 称为漫射系数。这一近似条件限制了漫射近似只能用于高反射率的强散射介质。

(8) 式通常称为漫射方程, 其解是 μ_a 和 μ'_s 的函数。

4 P_3 方程组的格林函数解

令(4) 式中 $l = 3$, 考虑稳态情况下的 P_3 近似

$$\begin{cases} \mu_a \varphi_0 + \varphi'_1 = q_0, \\ \frac{1}{3} \varphi'_0 + (\mu_a + \mu'_s) \varphi_1 + \frac{2}{3} \varphi'_2 = q_1, \\ \frac{2}{5} \varphi'_1 + (\mu_a + \mu'_s \gamma) \varphi_2 + \frac{3}{5} \varphi'_3 = q_2, \\ \frac{3}{7} \varphi'_2 + (\mu_a + \mu'_s \delta) \varphi_3 = q_3, \end{cases} \quad (9)$$

其中 φ'_l 表示 $\varphi_l(r)$ 对 r 的导数, 两个新的参量 γ 和 δ , 称为二阶和三阶光学参量:

$$\gamma = \frac{1 - g_2}{1 - g_1}, \quad \delta = \frac{1 - g_3}{1 - g_1}, \quad (10)$$

令 $q_0 = 1, q_l = 0 (l > 0)$, 并假设解的形式为^[8]

$$\varphi_l(r) = \sum_{j=0}^3 A_{lj} Q_l(v_j r), \quad (11)$$

经过繁琐的推导过程得到

$$\begin{aligned} \varphi_l(r) = & C_- h_l(-v_-) Q_l(-v_- r) + \\ & C_+ h_l(-v_+) Q_l(-v_+ r), \end{aligned} \quad (12)$$

利用(2)式、(11)式和(12)式, 辐射强度为

$$\begin{aligned} L(r, \eta) = & \sum_{l=0}^3 \frac{2l+1}{4\pi} [C_- h_l(-v_-) Q_l(-v_- r) + \\ & C_+ h_l(-v_+) Q_l(-v_+ r)] P_l(\eta), \end{aligned} \quad (13)$$

$L(r, \eta)$ 由两部分组成: 含 $Q_l(-v_- r)$ 项的渐进解和含 $Q_l(-v_+ r)$ 项的瞬变解。 v_+ 和 v_- 分别为

$$\begin{cases} v_+ = \frac{1}{\sqrt{18}} (\beta + \sqrt{\beta^2 - \gamma_a})^{1/2}, \\ v_- = \frac{1}{\sqrt{18}} (\beta - \sqrt{\beta^2 - \gamma_a})^{1/2}, \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \beta & \equiv 27\mu_a(\mu_a + \mu'_s) + 28\mu_a(\mu_a + \mu'_s \delta) + \\ & 35(\mu_a + \mu'_s \gamma)(\mu_a + \mu'_s \delta), \\ \gamma_a & \equiv 3780\mu_a(\mu_a + \mu'_s)(\mu_a + \mu'_s \gamma)(\mu_a + \mu'_s \delta), \\ C_- & = \frac{v_-^5 [3\mu_a(\mu_a + \mu'_s) - v_+^2]}{12\pi\mu_a^2(\mu_a + \mu'_s)(v_+^2 - v_-^2)}, \\ C_+ & = \frac{v_+^5 [3\mu_a(\mu_a + \mu'_s) - v_-^2]}{12\pi\mu_a^2(\mu_a + \mu'_s)(v_-^2 - v_+^2)}, \end{aligned} \quad (15)$$

$h_0(v_j) \equiv 1,$
 $h_2(v_j) \equiv -\frac{1}{2} + \frac{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)}{2v_j^2},$
 $h_3(v_j) \equiv -\frac{9\mu_a(\mu_a + \mu'_s)}{14(\mu_a + \mu'_s \delta)v_j} + \frac{3v_j}{14(\mu_a + \mu'_s \delta)},$
 v_j 分别对应式中的 $-v_-, -v_+, Q_l(x)$ 满足递推关系:

$$\begin{cases} Q_0(x) = \frac{\exp(x)}{x}, \\ Q_l(x) = Q_{l-2}(x) - \frac{2l-1}{x} Q_{l-1}(x), \end{cases} \quad (16)$$

x 对应式中的 $-v_- r, -v_+ r.$

5 半无限介质的 P_3 近似解

入射到半无限介质上的一锥形光束, 可以用一个位于初始散射事件发生位置的各向同性线光源近似^[11], 光源分布为

$$S(z) = \frac{\alpha' \mu'_1}{4\pi} \exp(-\mu'_1 z), \quad (18)$$

α' 表示光源的积分强度。希望用一个简单源分布来代替这个无限线源, 要寻找一个与在空气-组织界面光源具有相同的二阶矩或同时满足具有相同的二阶矩和四阶矩的离散点光源分布来近似这个各向同性无限线源。

设位于 z_0 强度为 α' 的点光源, 其二阶矩与无限线源 $S(z)$ 的二阶矩相等, 即

$$\int_0^{\infty} z \alpha' \mu' \tau \exp(-\mu' \tau z) dz = \int_0^{\infty} z \alpha' \delta(z - z_0) dz, \quad (19)$$

解方程(19)可得 $z_0 = 1/\mu'$, 如图 1 所示。

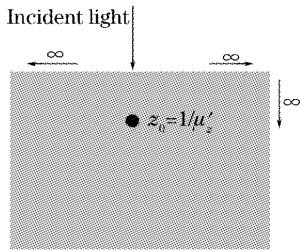


图 1 锥型光束的单个点光源近似

Fig. 1 Single point source approximation of pencil laser beam

当界面处折射率不匹配时,从介质内部照射到边界处的一部分辐射要返回介质内部,因此在介质界面上辐射强度 $L(r, \eta) \neq 0$.应用外推边界条件,在介质外 $z = -z_b$ 的平面上 $L(\rho, z = -z_b) = 0$.为了满足这个边界条件的限制,必须在介质外 $z = -(2z_b + z_0)$ 处引入镜像光源,光源的大小与 $z = z_0$ 处的实光源相同,符号相反。在 P_3 近似中,位于 $z = z_0$ 处的各向同性点源可以按两个分立的光源来看待,分别与 $L(r, \eta)$ 中的渐进解和瞬变解有关,如图 2 所示。与瞬变解相联系的光源必须以外推长度 $z_{b1} = -2AD_{trans}$ 来满足边界条件,其中 $D_{trans} = -\mu_a/v_t^2$, A 为内部反射系数 $A = (1+r_d)/(1-r_d)$, $r_d = -1.440n^{-2} + 0.71n^{-1} + 0.668 + 0.0636n$; 而与渐进解相联系的光源必须以外推长度 $z_{b2} = -2AD_{asympt}$ 来满足边界条件,其中 $D_{asympt} = -\mu_a/v_s^2$ 。因此外推边界条件下的光源函数为

$$S(\rho, z) = \delta(0, z_0) - \delta[0, -(2z_{b1} + z_0)] + \delta(0, z_0) - \delta[0, -(2z_{b2} + z_0)]. \quad (20)$$

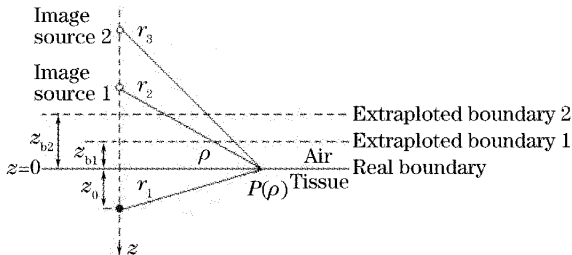


图 2 用于 P_3 近似解的位于 z_0 的各向同性点源与外推长度为 z_{b1} 和 z_{b2} 的两个镜像光源在外推边界条件下的图示
Fig. 2 Illustration of an isotropic light source at z_0 with two image sources, whose extrapolated lengths are z_{b1} and z_{b2} for extrapolated-boundary condition in P_3 approximation

将光源分布函数 $S(\rho, z)$ 与无限介质条件下的格林函数解(13)式取卷积^[12],得到半无限介质中的 P_3 近似解:

$$L(\rho, z, \eta) = \sum_{l=0}^3 \frac{2l+1}{4\pi} \psi_l(\rho, z) P_l(\eta), \quad (21)$$

式中

$$\begin{cases} \psi_l(\rho, z) = \\ C_- h_l(-v_-) [Q_l(-v_- r_1) - Q_l(-v_- r_3)] + \\ C_+ h_l(-v_+) [Q_l(-v_+ r_1) - Q_l(-v_+ r_2)], \\ r_1^2 = \rho^2 + z_0^2, \\ r_2^2 = \rho^2 + (z + z_0 + 2z_{b1})^2, \\ r_3^2 = \rho^2 + (z + z_0 + 2z_{b2})^2. \end{cases} \quad (22)$$

6 半无限介质漫反射率的 P_3 近似解

当介质折射率不匹配时,介质与空气之间存在菲涅耳反射,介质表面漫反射光能量分布为

$$R(\rho; \gamma, \delta) = \int_{\Omega} T_{\text{Fresnel}}(\theta) \cos \theta \times \left[\sum_{l=0}^3 \frac{2l+1}{4\pi} \psi_l(\rho; \gamma, \delta) P_l(\mu) \right] \sin \theta d\theta d\phi, \quad (23)$$

其中 $\mu = \mathbf{s} \cdot \mathbf{r} = \frac{z_0 \cos \theta}{\sqrt{\rho^2 + z_0^2}} + \frac{\rho \sin \theta \sin \phi}{\sqrt{\rho^2 + z_0^2}}$, 式中的坐标变量和单位矢量的说明见图 3。通过积分,上述(23)式可表示为

$$R(\rho; \gamma, \delta) = \sum_{l=0}^3 \frac{2l+1}{4\pi} \psi_l(\rho; \gamma, \delta) S_l(\rho, z_0), \quad (24)$$

式中的 $S_l(\rho; z_0)$ 分别为

$$\begin{aligned} S_0(\rho; z_0) &= k_1, \\ S_1(\rho; z_0) &= k_2 \frac{z_0}{(\rho^2 + z_0^2)^{1/2}}, \\ S_2(\rho; z_0) &= k_3 \frac{3z_0^2}{2(\rho^2 + z_0^2)} + k_5 \frac{3\rho^2}{2(\rho^2 + z_0^2)} - k_1 \frac{1}{2}, \\ S_3(\rho; z_0) &= k_4 \frac{5z_0^3}{2(\rho^2 + z_0^2)^{3/2}} + k_6 \frac{15z_0\rho^2}{2(\rho^2 + z_0^2)^{3/2}} - \\ & k_2 \frac{3z_0}{2(\rho^2 + z_0^2)^{1/2}}, \end{aligned} \quad (25)$$

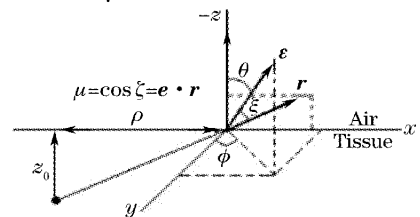


图 3 用于 P_3 近似漫反射计算的坐标系和单位向量
Fig. 3 Coordinates and unit vectors used in calculation of the diffuse reflection in the P_3 approximation

式中的 k_i 值与介质和探测器的折射率,以及探测器的数值孔径有关。若探测器使用光纤接收光信号,假设组织相对空气界面折射率为 1.4,探测器的数值孔径角为 1,可得 k_i 值分别为 1.480, 1.280, 1.117, 0.985, 0.181, 0.148。

7 二阶参量 γ 对 P_3 近似漫反射率的影响

与漫射近似不同, P_3 近似漫反射率不仅与散射介质的一阶参量有关,还与介质的二阶参量 γ 和三阶参量 δ 有关。图 4 为二阶参量对漫反射率的影响。图中曲线具有相同的一阶参量: $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$, $\mu'_s = 1 \text{ mm}^{-1}$ (因此运输平均自由程 $l_t \approx 0.99 \text{ mm}$), 其中三条 P_3 近似 $R(\rho; \gamma, \delta)$ 曲线的三阶参量相同 $\delta = 1.56$, 二阶参量分别为 $\gamma = 1.0, 1.2, 1.4$ 。图 4 显示曲线在 $\rho = l_t$ 处有相同的值, γ 的影响主要在 $\rho < l_t$ 区域, 不同 γ 值的 P_3 近似的 $R(\rho; \gamma, \delta)$ 之间有很大差别, 比相应区域漫射近似的 $R_{DA}(\rho)$ 值大很多。用 $E(\rho) = |R(\rho; \gamma, \delta) - R_{DA}(\rho)| / R_{DA}(\rho)$ 描述这个差别, $E(\rho = 0.6)$ 高达 50%。 γ 的影响其次在 $3l_t > \rho > l_t$ 区域, 具有不同 γ 值的 P_3 近似 $R(\rho; \gamma, \delta)$ 曲线不重合, 并且明显小于此区域的漫射近似结果, $E(\rho)$ 达到 20%。

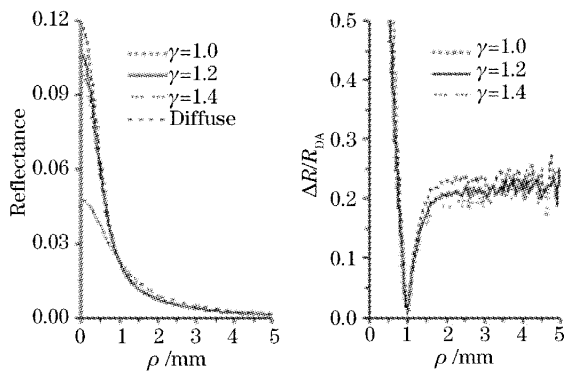


图 4 参量 γ 对漫反射率的影响。 $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$, $\mu'_s = 1 \text{ mm}^{-1}$, $\delta = 1.56$

Fig. 4 Effect of the second-order parameter γ on the diffuse reflectivity with identical first-order parameters $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$, $\mu'_s = 1 \text{ mm}^{-1}$, and third-order parameter $\delta = 1.56$

前面提到漫射近似适用区域为 $\rho > 6l_t$, 因此 P_3 近似能够比漫射近似更好地描述光源附近的漫反射光分布。图 5 为用蒙特卡罗方法得到的模拟计算结果 $R_{MC}(\rho)$ 。计算时采用了组合亨耶-格林斯坦 (Heney-Greenstein) 相函数, 其二阶和三阶参量的

取值与上面相同, 即 $\gamma = 1.4, \delta = 1.56$ 。对比曲线 $R(\rho; \gamma, \delta)$ 和 $R_{MC}(\rho)$, 发现在 $\rho > 0.4l_t$ 区域, $R(\rho; \gamma, \delta)$ 和 $R_{MC}(\rho)$ 有相同的变化趋势。

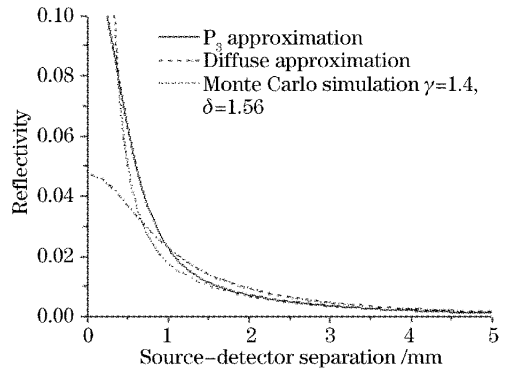


图 5 一阶参量为 $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$ 时, $\mu'_s = 1 \text{ mm}^{-1}$ 的 P_3 近似、蒙特卡罗模拟、漫射近似的漫反射率比较。 P_3 近似和蒙特卡罗模拟的高阶参量为 $\gamma = 1.4, \delta = 1.56$

Fig. 5 Comparison between P_3 approximation, Monte Carlo simulation and diffusion approximation for the diffuse reflectivity with $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$, $\mu'_s = 1.00 \text{ mm}^{-1}$. High-order parameters of P_3 approximation and Monte Carlo simulation are $\gamma = 1.4, \delta = 1.56$

参 考 文 献

- 1 Alwin Kienle, Michael S. Patterson. Improved solutions of the steady-state and the time-resolved diffusion equations for reflectance from a semi-infinite turbid medium[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(1): 246~254
- 2 Wang Jiangang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Monte-Carlo simulations for light propagation in striated scattering medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 346~350 (in Chinese) 王建岗, 王桂英, 徐至展. 光在分层散射介质中传输行为的蒙特卡罗模拟研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 346~350
- 3 Frédéric Bevilacqua, Christian Depeursinge. Monte Carlo study of diffuse reflectance at source-detector separations close to one transport mean free path[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(12): 2935~2945
- 4 Alwin Kienle, Florian K. Forster, Raimund Hibst. Influence of the phase function on determination of the optical properties of biological tissue by spatially resolved reflectance[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(20): 1571~1573
- 5 Zhang Zhi, Luo Qingming, Zeng Shaoqun *et al.*. A numerical method for photon migration in heterogeneous bio-tissue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 860~863 (in Chinese) 张 智, 骆清铭, 曾绍群 等. 非均匀生物组织中光子迁移的数值方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 860~863
- 6 Wang Xichang, Gong Yanjun, Song Dongcao *et al.*. The spatially resolved scattered reflection of three-layered matched media diffusion equation in the steady-state[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 377~381 (in Chinese) 王喜昌, 宫彦军, 宋东草 等. 平稳状态下匹配介质三层漫射方程的空间分辨漫反射[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 377~381
- 7 Zhang Xiaojuan, Liu Ying. The characteristic length of tissue and its application in spatial-resolved diffuse reflectance close to source[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(1): 124~128 (in Chinese)

- 张小娟, 刘 迎. 组织的特征长度微距空间分辨漫反射[J]. 光子·激光, 2005, **16**(1): 124~128
- 8 Edward L. Hull, Thomas H. Foster. Steady-state reflectance spectroscopy in the approximation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(3): 584~599
- 9 Liu Ying, Zhang Xiaojuan, Hu Youzhou. Phase function of tissue and the properties of second-order optical parameter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 877~880 (in Chinese)
- 刘 迎, 张小娟, 胡佑周. 生物组织的散射相函数及其二阶光学参量的性质[J]. 光学学报, 2004, **24**(7): 877~880
- 10 Zhang Xiaojuan, Liu Ying, Gao Zonghui. Spatial-resolved diffuse reflectance of tissue close to source[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(4): 571~575 (in Chinese)
- 张小娟, 刘 迎, 高宗慧. 光源附近组织的空间分辨漫反射研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 571~575
- 11 Richard C. Haskell, Lars O. Svaasand, Tsong-Tsch Tsay *et al.*. Boundary conditions for the diffusion equation in radiative transfer[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2727~2741
- 12 Jean-Michel Tualle, Jérôme Prat, Eric Tinet *et al.*. Real-space Green's function calculation for the solution of the diffusion equation in stratified turbid media[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(11): 2046~2055
- 10 Zhang Xiaojuan, Liu Ying, Gao Zonghui. Spatial-resolved diffuse reflectance of tissue close to source[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005,

征 订 启 事

《中国激光》增刊

第十七届全国激光学术会议于 2005 年 10 月 19~22 日在四川绵阳富乐山大酒店召开。本次会议由中国光学学会与中国电子学会联合主办。共有 350 多名来自高校、研究所以及公司激光领域的研究人员参加了本次会议。

本次大会共收到论文 330 篇,《中国激光》将其中的优秀论文 126 篇汇编成册,以增刊形式出版了《第十七届全国激光学术会议论文集》,为广大激光工作者提供了一份有价值的参考资料。

按照研究方向,论文集分为激光物理、非线性光学、高能固体激光与超短脉冲激光、新型激光器、激光技术及晶体材料、激光应用、光束传输、激光薄膜及元器件等专栏。较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果,显示了激光科学技术对国家十一五规划、国家 863 计划、国家 973 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

论文集共计 462 页,进口雅光纸精印,定价 100 元。欢迎订阅。

《光学手册》

这是我国编写的第一本基础性大型光学手册。本书顾问为著名光学专家龚祖同,主编为李景镇。

本书为 16 开,1541 页,定价 100 元。全书有 2700 多个公式,1400 余幅插图和 400 多个数据表格,230 万字。是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。本书能使读者在较短时间内全面了解某门光学分科的主要内容,查阅公式、数据省时省力。

电话:021-69918427

电子信箱:gexiaohong@siom.ac.cn

地址:上海 800-211 信箱

邮政编码:201800

联系人:葛晓红