

文章编号: 0253-2239(2006)09-1377-5

用遗传算法反演类上皮组织模型的偏振散射光谱*

邓 勇 鲁 强 骆清铭**

(华中科技大学生物医学光子学教育部重点实验室, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 基于生物组织的粒状模型以及光谱对米氏(Mie)散射体形态的灵敏性, 构建了类上皮组织模型的偏振后向散射光谱反演模型。针对反演模型的多参量、多极值、非线性, 涉及到非常复杂的三角函数计算, 模型空间极小的特点, 采用每代保留最优个体的浮点遗传算法对类上皮组织模型的偏振后向散射光谱反演。对编码策略、适值调整策略及选择策略进行了讨论。研究表明: 经过 70 代反演迭代, 每个参量的相对误差趋于稳定, 最小的达到 0.02% 左右, 最大的不超过 3%。采用基于实数编码的遗传算法能从偏振散射光谱中同时反演获得表层粒子的形态参量, 具有全局收敛性和良好的反演精度与抗噪声能力。

关键词: 医用光学与生物技术; 偏振光散射光谱; 遗传算法; 类上皮组织模型

中图分类号: Q631; O436.2 文献标识码: A

Inversion of Polarized Light Scattering Spectra of Epitheliumlike Tissue Phantom by Genetic Algorithm

Deng Yong Lu Qiang Luo Qingming

(Division of Biomedical Photonics, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Polarized light backscattering spectra inversion model is established for epitheliumlike tissue phantom based on particles model of biological tissue and sensitivity of spectra to Mie scatters morphology. This inversion model is of multiple parameters, multiple extreme values and nonlinear, complicated trigonometric calculation is involved, and the model space is limited. Thus, floating genetic algorithms (FGAs), which reserves the optimal unit for every epoch, are applied to invert polarized light backscattering spectra for epitheliumlike tissue phantom. The strategies for encode, fitness adjusting and selection are discussed. The results indicate that, with 70 iteration epochs the relative error for every parameter inclines to be stable, about 0.02% for the minimal and less than 3% for the maximal. The genetic algorithm based on real encode can obtain the morphological parameters of the upper layer simultaneously by inverting the polarized light backscattering spectra, with global convergence, high inversion precision and robustness.

Key words: medical optics and biotechnology; polarized light scattering spectra; genetic algorithms; epitheliumlike tissue phantom

1 引 言

研究表明 85% 以上的癌症都源于覆盖体表或体腔内表的上皮组织^[1]。癌症的最早期称原位癌, 此时组成上皮组织的上皮细胞异常增生累及上皮全层, 但还未通过皮肤或粘膜下面的基底膜侵犯到周围组织。

原位癌如能被及时发现、尽早切除或给予适当治疗, 完全可以治愈。原位癌的检测对癌症的早发现、早治疗具有极其重要的意义。目前临床普遍采用生理切片活检的癌症检测方法, 不仅给病人带来极大的痛苦, 而且在癌症部位确定、早期发现等方面具有很大

* 国家自然科学基金(60440420131, 30470460)和国家科技攻关计划(2005BA711A04)资助课题。

作者简介: 邓 勇(1966~), 女, 湖北宜昌人, 华中科技大学副教授, 博士后, 主要从事生物医学光学成像的研究。

E-mail: ydeng_1992@126.com

** 通信联系人。E-mail: qluo@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2005-09-12; 收到修改稿日期: 2006-02-05

的局限性。偏振散射光谱术具有快速、无损的特点,近几年来备受关注,成为早期癌症检测的热点研究内容之一。在偏振散射光谱测量中,上皮细胞核视作类似球体的米氏(Mie)散射体,发育异常或癌变时,相对折射率增加,平均尺寸增大^[2~4]。

从探测的光谱数据中精确定量地获得细胞核的形态信息,光谱反演是研究的一个重要方面。而基于米氏理论计算的光谱反演是一个多参量的非线性反演问题,涉及到非常复杂的三角函数计算。在理论上归结为求第一类弗雷德雷姆(Fredholm)积分方程,是一个典型的不适定问题。一些研究都是基于给定细胞核的相对折射率,采用最小二乘逼近^[5]的 Tikhonov 正则方法^[6]。这两种方法易陷入局部极值,且强烈地依赖于初始模型的选取。本文将具有全局搜索能力的遗传算法应用于类上皮组织

模型的偏振后向散射光谱的反演,计算结果表明,该方法具有良好的精度和收敛稳定性。

2 数学模型

生物组织可看作离散的粒子模型。虽然组织散射体的尺寸分布还未完全确定,但是有实验表明正态分布或修正的对数正态分布能够重现生物组织的散射特性^[7~11]。线偏振入射后,类上皮组织模型的表层可看作单层的米氏散射体,对光信号的单次散射仍然保持其偏振性,其后向散射光谱随米氏散射体大小、分布及相对折射率不同而不同。文献[12]研究了表层粒子尺寸及其分布,介质的相对折射率的微小变化对光谱曲线波纹结构的幅值、频率,散射强度的影响,其问题模型可表示为

$$I_{//}^s(\lambda) = I_{//}^i(\lambda) \int_{\Delta\Omega} d\Omega \int_{\Delta\Omega_0} d\Omega_0 \int_{\Delta D} [S_2(\theta, \lambda, n_r, D)]^2 f(D) dD, \quad \lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}], \quad (1)$$

其中 $\Delta\Omega$ 、 $\Delta\Omega_0$ 分别是散射光收集角、入射光的立体角, ΔD 是粒子尺寸范围, $f(D)$ 是散射体的尺寸分布函数, λ 为入射光波长。从上面的模型中看出, $S_2(\theta, \lambda, n_r, D)$ 与散射波长、折射率和散射体尺寸参量有关,可通过米氏理论计算出^[13]。如果入射和收集角足够小,且 $\Delta\Omega = \Delta\Omega_0$, 则(1)式简化为

$$I_{//}^s(\lambda) = I_{//}^i(\lambda) \int_{\pi}^{\pi-\theta_0} \int_{\Delta D} [S_2(\theta, \lambda, n_r, D)]^2 \sin \theta f(D) dD d\theta, \quad (2)$$

且 $\theta_0 = \sqrt{\Delta\Omega/\pi}$ 。对 λ 离散化,将 $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})$ 等分 $M-1$ 分,用 λ_i 表示各分点,则

$$\lambda_i = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) / (M - 1), \quad (3)$$

对任一波长,(2)式变为

$$I_{//}^s(\lambda_i) = I_{//}^i(\lambda_i) \int_{\pi}^{\pi-\theta_0} \int_{\Delta D} [S_2(\theta, \lambda, n_r, D)]^2 \sin \theta f(D) dD d\theta, \quad (4)$$

对核函数离散化,将 (D_{\min}, D_{\max}) 等分 $N-1$ 分,将 $(\pi - \theta_0, \pi)$ 等分则

$$D_j = (D_{\max} - D_{\min}) / (N - 1), \quad \theta_k = \theta_0 / M, \quad (5)$$

通过高斯(Gauss)求积公式,则(4)式变为

$$I_{//}^s(\lambda_i) = I_{//}^i(\lambda_i) * \frac{\theta_0}{M} \times \frac{D_{\max} - D_{\min}}{N - 1} \sum_{k=1}^M \left\{ \sum_{j=1}^N \{ \omega_j [S_2(\theta, \lambda, n_r, D)]^2 f(D_j) \} \right\} \sin \theta_k, \quad (6)$$

且

$$\omega_1 = \omega_N = 1/2, \quad \omega_2 = \omega_3 = \dots = \omega_{N-1} = 1. \quad (7)$$

显然散射光强随波长的变化 $I(\lambda)$ 可用光谱仪直接测量得到,因此粒子的正态分布及相对折射率可通过对方程(6)反演得到。这样问题可归结为根据一组测量(或预测值),反演出散射体的形态信息参量。由于含有三个参量,以及大量的级数计算,所以偏振光谱的反演问题均属于多参量、多极值、非线性的优化问题。对该模型的优化问题,可转换为如下泛函表示:

$$\min \left\{ J(D, \sigma, m) = \sum_{i=1}^n [I_c(\lambda_i, D, \sigma, m) - I_{\text{pre}}(\lambda_i)]^2 \right\}, \quad (8)$$

式中 I_c 为根据米氏理论的计算值, I_{pre} 为实际记录值。

3 反演方法及结果分析

3.1 遗传算法

遗传算法基于概率统计原理,能够求解任意复杂形式的完全非线性反演问题。它直接以个体适应度作为搜索信息,而无需目标函数的导数值等其他一些辅助信息。通常设计遗传算法,主要包括以下几个步骤,即编码方式、适值函数确定、选择策略、交叉策略、变异策略等^[12]。由于每代保留最优个体的浮点遗传算法具有很好的稳定性,其计算速度和精度都优于简单二进制遗传算法^[13],所以本文采用浮点编码方式,针对(8)式的反演进行浮点遗传算法(GA)的优化。

3.1.1 编码策略

基于偏振光谱的反演包含了三个参变量,编码长度为 3。各参量的取值由先验知识确定。但是直径为 d 的粒子和标准偏差 σ 之间存在约束 $d > 3\sigma$,且直径的粒子小,标准偏差小,反之则相反。为了加快收敛速度,防止产生一些偏离实际情况的编码。采用两种方案处理,一种是建立一个筛选函数,即符合约束的编码保留,否则丢去;另一种是建立一个调整函数,对不满足即采用一个变换规则,对产生的编码进行适当调整。前一种方法,经过反演计算,效率较低,所以采用后一种方法,调整规则为

$$\begin{aligned} \text{if } d < C_0 \times \sigma Yd < d_{\min} + C_1 \Delta d, \\ d^* &= d, \\ \sigma^* &= k_1 \exp\left(\frac{d - d_{\min} - \Delta d}{d + d_{\min} + \Delta d}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{if } d \geq d_{\min} + C_1 \Delta d Y\sigma < \sigma_{\min} + C_2 \Delta \sigma, \\ d^* &= d, \\ \sigma^* &= k_2 \exp\left(\frac{d - d_{\min} - \Delta d}{d + d_{\min} + \Delta d}\right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{且 } \begin{cases} \Delta d = (d_{\max} - d_{\min})/2, \\ \Delta \sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2, \end{cases} \quad (12)$$

表 1 浮点算法的反演结果($D=8.04 \mu\text{m}, \sigma=0.03, n=1.19$)

Table 1 Results from floating genetic algorithm (FGA) ($D=8.04 \mu\text{m}, \sigma=0.03, n=1.19$)

Noise /%	Diameter $D / \mu\text{m}$	Standard deviation σ	Relative refractive index n	Objective function
0	8.0814	0.031623	1.1826	0.046216
0.5	8.0344	0.030064	1.1911	0.001256
2	8.0758	0.030202	1.1839	0.037477
5	8.0793	0.031215	1.1829	0.103680

为了分析该优化算法的反演精度稳定性,对噪声为 0.5%、5%时一次反演过程中三个参量的相对误差随迭代次数的变化情况进行分析。结果如图 1 所示,可看出经过 70 代迭代,每个参量的相对误差完全趋

其中 $C_0、C_1、C_2、K_1、K_2$ 根据实际情况取值,分别取为 5、0.8、0.6、1、1。

3.1.2 适值调整及选择策略

在对群体规模选择前,为了保证进化阶段群体的多样性,防止进入局部最优,而在晚期阶段又要突出优良个体,拉开群体之间的档次,我们对每个个体进行适值调整。本文采用模拟退火思想调整适值,即用吉布斯分布采样对模型空间各点加权,迭代过程中逐渐降温以突出能量函数的作用。调整后选择概率为

$$P_s = \exp(f_i/T) / \sum_i^N \exp(f_i/T), \quad (13)$$

式中 f_i 为个体适值, N 为群体规模, T 为控制参量,随进化代数变化,这里取

$$T = T_0 \times \frac{\ln 2}{\ln(t+1)}, \quad (14)$$

T_0 取为 30, t 为进化代数。

通常的选择策略主要有适应值比例选择、玻尔兹曼(Boltzman)选择、排序选择、联赛选择等形式等^[14]。本文采用基于适应度的比例选择,用轮盘赌方式实现,保证每一个个体都有被选择的机会,这样既可以提高整个种群的平均适值,又不会破坏种群的多样性。同时采用精英选择策略,防止当前群体的最佳个体丢失。

3.2 反演结果

经过多次反演试验,算法的控制参量选择为:1) 群体规模为 100;2)交叉概率为 0.65;3)变异概率为 0.03。对于直径 $D=8.04 \mu\text{m}$,标准偏差 $\sigma=0.03$,相对折射率 $n=1.19$ 的预测光谱,表 1 给出采用本文的算法策略。在不同噪声条件下,经过 70 代迭代,随机得到的一次反演结果。从表 1 中可以看出,当预测值叠加不同的噪声时,反演结果的最大相对误差在 3%左右。

于稳定,最小的达到 0.02%左右。图 2 给出了当不同噪声时,最优个体目标函数随迭代次数的收敛过程。经过多次反演试验,经过 40 代进化,最大噪声与最小噪声的目标函数的绝对差值已经小于 0.1,显然该算

法有很强的抗噪声能力。此外,算法迭代过程中,最优个体稳定性如何,直接决定统计平均的精度。图3表示叠加10%噪声时个体最佳适应度,平均适应度

以及样本方差的一次反进化过程,当进化代数达到70代时,样本方差趋于零,最佳个体适应度与平均适应度渐进相等,最优个体达到稳定状态。

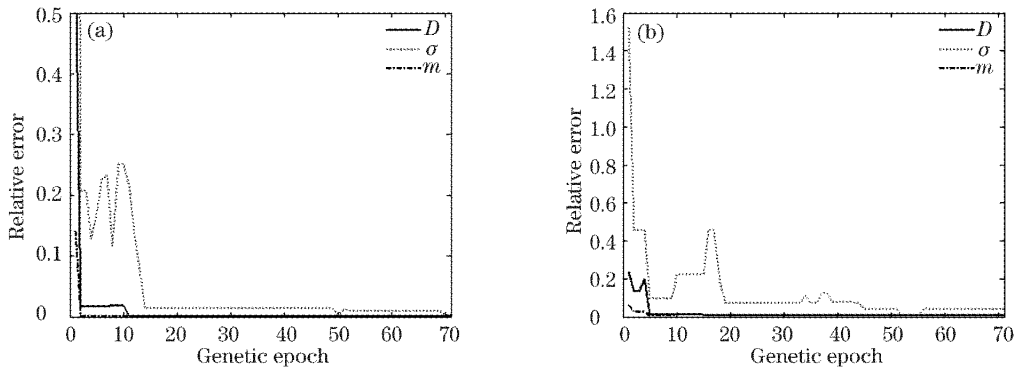


图1 叠加0.5% (a), 5% (b)噪声相对误差进化过程

Fig. 1 Genetic curves of the relative error with iteration epochs process for 0.5% (a), 5% (b) noises

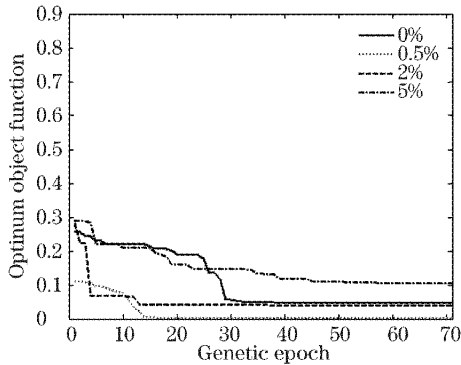


图2 叠加不同噪声时最优目标函数进化过程

Fig. 2 Genetic curves of the optimal objective iteration epochs processes for different noises

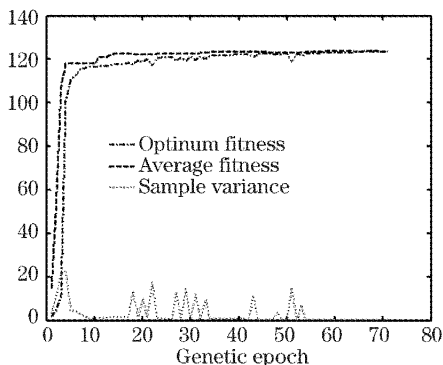


图3 叠加10%噪声时群方差、优化适值、平均适值进化过程

Fig. 3 Genetic curves of the sample variance, optimum fitness and average fitness for 10% noises

4 结 论

本文针对类上皮组织模型的偏振后向散射光谱

反演模型的多参量、多极值、非线性,且涉及到非常复杂的三角函数计算,模型空间极小的特点。采用每代保留最优个体的浮点遗传算法对类上皮组织模型的偏振后向散射光谱进行反演优化,能同时获得表层粒子的尺寸分布及折射率信息。研究表明,经过70代反演迭代,每个参量的相对误差趋于稳定,最小的达到0.02%左右,最大的不超过3%。因此基于实数编码的遗传算法能从偏振散射光谱中同时反演获得表层粒子的形态参量,具有全局收敛性,良好的反演精度和抗噪声能力,并且参量反演结果是唯一和稳定的。

参 考 文 献

- 1 L. T. Perelman, V. Backman, M. Wallace *et al.*. Observation of periodic fine structure in Reflectance from biological tissue: a new technique for measuring nuclear size distribution[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(3): 627~630
- 2 T. M. Johnson, J. R. Mourant. Polarized wavelength-dependant measurements of turbid media[J]. *Opt. Express*, 1999, **4**(6): 200~216
- 3 Vadim Backman, Rajan Gujar, Kamran Badizdegan *et al.*. Polarized light scattering spectroscopy for quantitative measurement of epithelial structures *in situ*. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 1999, **5**(4): 1019~1027
- 4 V. Backman, *et al.*. Diagnosing cancers using spectroscopy[J]. *Nature*, 2000, **406**(6): 35~36
- 5 Rajan S. Gurjar, Vadim Backman, Lev T. Perelman *et al.*. Imaging human epithelial properties with polarized light-scattering spectroscopy[J]. *Nature Medicine*, 2001, **7**(11): 1246~1248
- 6 Huabei Jiang, Guillermo, Lihong V. Wang. Particle sizing in concentrate suspensions by use of steady-state continuous-wave photon-migration techniques [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(5): 394~396
- 7 J. R. Mourant, Vadim Backman, Lev T. Perelman. Characterizing mammalian cells and cell phantoms by polarized backscattering fiber-optic measurements[J]. *Appl. Opt.*, 2001,

- 40(28): 5114~5123
- 8 Konstantin Sokolov, Javier Galvan, Alexey Myakov *et al.*. Realistic three-dimensional epithelial tissue phantoms for biomedical optics[J]. *J. Biomedical Optics*, 2002, 7(1): 148~156
- 9 Arjen Amelink, Martin P. L. Bard, Jiak A. Burgers *et al.*. Single-scattering spectroscopy for the endoscopic analysis of particle size in superficial layers of turbid media[J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(10): 4006~4101
- 10 Rebekah Drezek, Martial Guklland, Tomas Collier *et al.*. Light scattering from cervical cells throughout neoplastic progression; influence of nuclear morphology, DNA content, and chromatin texture[J]. *J. Biomedical Optics*, 2003, 8(1): 7~16
- 11 Jessica C. Ramella-Roman, Paulo R. Bargo, *et al.*. Evaluation of spherical particle sizes with an asymmetric illumination microscope[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.*, 2003, 9(2): 301~306
- 12 Yong Deng, Luo Qingming, Lu Qiang. Polarized light backscattering spectra for epitheliumlike tissue phantom[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(4): (in Chinese)
- 13 H. C. van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: Dover, 1957. 40~59
- 14 Zhou Mng, Sun Shudong. *The Genetic Algorithms and Application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999 (in Chinese)
- 周 明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- 15 She Chunfeng, Yang Huazhong, Hu Guanzhang *et al.*. The convergence of floating genetic algorithms and its application in model parameter extraction[J]. *Acta Electronica*, 2000, 28(3): 133~136 (in Chinese)
- 余春峰, 杨华中, 胡冠章 等. 浮点遗传算法的收敛性及其在模型参数提取问题中的应用[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 133~136
- 16 Li Mingqiang, Kou Jisong, Lin Dan *et al.*. *The Foundation Theory and Application of the Genetic Algorithms* [M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese)
- 李敏强, 寇纪淞, 林 丹 等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002

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