

# 基于细菌视紫红质膜的用于滤除亮背景 光学滤波器的特性分析

郭宗霞<sup>1</sup>, 陈桂英<sup>1</sup>, 张春平<sup>1</sup>, 王勇<sup>1</sup>, 顾立群<sup>1</sup>,  
田建国<sup>1</sup>, 张光寅<sup>1</sup>, SONG Q W<sup>2</sup>, 沈彬<sup>3</sup>, 富光华<sup>3</sup>

(1. 南开大学物理学院光子学中心, 天津 300071;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, Syracuse University, Syracuse NY 13244, USA;

3. 天津医学高等专科学校, 天津 300052)

**摘要:**利用细菌视紫红质膜的互补抑制调制透射特性建立了新型光学滤波器,可用于光学图像非相干亮背景的处理.我们演示了这种新型滤波器并对它的特性进行了理论分析.计算结果表明,处理后的图像质量(对比度,透射光强及其空间分布)受膜参数(浓度, M态寿命)和偏置光强的影响.透射光强及其空间分布的弯曲度随膜浓度的变大而变小,对比度先升高至最大值后降低至0. M态寿命变大时,透射光强及其空间分布的弯曲度都变大,对比度增大至一稳定值.透射光强随偏置光强的增大而减小,但其空间分布的弯曲度保持不变,对比度可以增大至1.当膜浓度, M态寿命和偏置光强过大时,处理后的图像将发生畸变.

**关键词:**细菌视紫红质膜;去除亮背景处理;膜参数;偏置光强;图像质量  
**中图分类号:** O43 **文献标识码:** A

## CHARACTERS FOR OPTICAL FILTER OF REMOVING BRIGHT- BACKGROUND BASED ON BACTERIORHODOPSIN FILM

GUO Zong-Xia<sup>1</sup>, CHEN Gui-Ying<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>, GU Li-Qun<sup>1</sup>, ZHANG Chun-Ping<sup>1</sup>,  
TIAN Jian-Guo<sup>1</sup>, ZHANG Guang-Yin<sup>1</sup>, SONG Q W<sup>2</sup>, SHEN Bin<sup>3</sup>, FU Guang-Hua<sup>3</sup>

(1. Photonics Center, Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, Syracuse University, Syracuse NY 13244 USA;

3. Tianjin Medical College for Continuing Education, Tianjin 300052, China)

**Abstract:** Special property of complementary suppression modulated transmission (CSMT) of bacteriorhodopsin (bR) film was used to establish a new kind of optical filter, which can be used to remove incoherent bright-background in optical image. This new kind of optical filter was demonstrated and its behavior was analyzed theoretically. The calculated results showed that the quality (the contrast, the transmitted intensity and the space distribution) of the processed image was affected by the parameters (concentration and lifetime of M state) of bR film and the intensity of the bias light. With the increasing of bR film concentration, the transmitted intensity and the curvature degree of the space distribution of the transmitted intensity decreased, and the contrast increased to the maximum and then decreased to zero. By prolonging the lifetime of M state, the transmitted intensity, the curvature degree of the space distribution of the transmitted intensity increased and the contrast increased to the stable value. Accompanying the increase of the intensity of the bias light, the transmitted intensity decreased, the space distribution was not changed, and the contrast can be increased to 1. But when the concentration of bR film, the lifetime of M state and the intensity of the bias light were too large, the processed image might be distorted.

**Key words:** bR film; removing bright-background; film parameters; intensity of bias light; image quality

### 引言

在光学图像处理过程中,有些图像具有亮背景,

它使图像的最小光强变大,降低了图像的原始对比度.亮背景处理在文字处理,图像识别,军事目标的处理以及医学临床诊断前的预处理等方面都有很重

要的实用价值. 因此, 如何去除亮背景的干扰一直是光学信息处理中的重要问题.

细菌视紫红质 (bacteriorhodopsin, 简称 bR) 分子是从嗜盐菌紫膜中提取的光驱动质子泵分子<sup>[1,2]</sup>, 是一种新型的非线性生物光学材料, 具有良好的光学和物理特性, 已经被应用于实时空间光调制器<sup>[3]</sup>等光子学领域. 当蓝光和黄光同时照射 bR 膜时, 具有互补抑制调制透射特性<sup>[4]</sup>. 这种特性已经被用于图像相减相加<sup>[5]</sup>等方面, 也可用于非相干亮背景处理<sup>[6]</sup>, 其基本原理和实验已在文献 6 中做了介绍.

在理论上, 利用 bR 膜进行亮背景处理后的图像的对比度达到 1, 并且有用信息不失真. 实际上, bR 膜并不是完全的互补抑制线性透射, 存在非线性区, 这将使得处理后的图像发生畸变. 非线性区的大小由 bR 膜的参数和偏置光强决定, 所以 bR 膜参数和偏置光强影响处理后的图像的质量. 如果 bR 膜和偏置光强选择不合适, 很有可能使处理后的图像失真, 所以在亮背景处理过程中, 选择合适的 bR 膜及偏置光强是非常重要的. 本文主要分析 bR 膜的主要参数 (M 态寿命, 膜浓度) 和偏置光强对处理后的图像质量 (对比度, 透射光强及其空间分布) 的影响, 为非相干亮背景滤除的设计和膜参数的选择提供依据, 使处理后的信息更接近有用信息.

## 1 实验

### 1.1 亮背景滤除原理

bR 分子在光照后产生异构化, 经一系列中间态后, 返回基态 (B) 而完成光循环. 在所有中间态中, M 态的寿命最长, 且吸收峰 (412nm) 较其他中间态远离 B 态的吸收峰 (568nm). 当黄光和蓝光同时照射 bR 膜时, M 态的许多分子不再通过驰豫过程返回基态, 而是通过 412nm 光的激发跃迁至高能态后再快速返回基态. 通常 bR 的光循环可以简化为 B 态和 M 态之间的两态光色系统, 并可以解释 bR 膜的大部分光学特性. 由 Beer-Lambert 定律可知, 当黄光和蓝光同时照射 bR 膜, 黄光和蓝光的透射光强分别为<sup>[6]</sup>:

$$I_y' = I_y \cdot \exp(-\Delta_1 Nd) - \frac{C}{2\varepsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y)\lambda_y\tau} [1 - \exp(-\Delta_1 Nd)] \ln\left(\frac{I_y'}{I_y}\right) - \frac{\lambda_b I_b'}{\lambda_y} [\exp(-\Delta_1 Nd)] \quad (1)$$

$$I_b' = I_b \cdot \exp(-\Delta_2 Nd) - \frac{C}{2\varepsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)\lambda_b\tau} [1 - \exp(-\Delta_2 Nd)] \ln\left(\frac{I_b'}{I_b}\right) - I_y \frac{\lambda_y}{\lambda_b} [\exp(-\Delta_2 Nd)] \quad (2)$$

式中  $\Delta_1 = \frac{2\varepsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y) \cdot \varepsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y)}{\varepsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y) + \varepsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y)}$ ,  $\Delta_2 = \frac{2\varepsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b) \cdot \varepsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)}{\varepsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b) + \varepsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)}$ ,  $C = \frac{N_a hc}{\Phi}$ ,  $N_a$  为阿弗加德罗常数,  $h$  为普朗克常数,  $\Phi$  为量子产额,  $c$  为光速,  $d$  为 bR 膜的厚度,  $I_y, I_y', I_b$  和  $I_b'$  分别是黄光和蓝光的入射光强和透射光强,  $\varepsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y), \varepsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y), \varepsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b)$  和  $\varepsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)$  分别是黄光和蓝光正向和反向的摩尔消光系数,  $N$  为 bR 膜的摩尔浓度,  $\lambda_b$  和  $\lambda_y$  分别是蓝光和黄光的波长,  $\tau$  为 M 态寿命. 此时,  $I_y'$  和  $I_b'$  都是非线性透射的,  $I_y'$  设为定值 OC,  $I_y'$  和  $I_b'$  随  $I_b'$  的变化情况分别如图 1 中实线 a 和 b 所示.

黄光照射主要引起 bR 分子由 B 态到 M 态的跃迁, 而蓝光照射主要引起 bR 分子由 M 态到 B 态的跃迁,  $\varepsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y)$  和  $\varepsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)$  可以被忽略不计, 黄光和蓝光透射可以看作是线性的, 式 (1) 和 (2) 可以简化为:

$$I_y' = I_y - \frac{\lambda_b I_b'}{\lambda_y} - \frac{CNd}{2\lambda_y\tau} \quad (3)$$

$$I_b' = I_b - \frac{\lambda_y I_y'}{\lambda_b} - \frac{CNd}{2\lambda_b\tau} \quad (4)$$

在这种情况下, 同样设定  $I_y'$  为定值 OC,  $I_y'$  和  $I_b'$  随  $I_b'$  的变化情况分别如图 1 中虚线 c 和 d 所示. 当  $I_b'$  低于黄光透射阈值光强 ( $I_{y'}$ ) 时,  $I_y'$  随  $I_b'$  增大线性下降, 当  $I_b'$  高于  $I_{y'}$  时,  $I_y'$  为零; 当  $I_b'$  低于蓝光透射阈值光强 ( $I_{b'}$ ) 时,  $I_b'$  为零, 当  $I_b'$  高于  $I_{b'}$  时,  $I_b'$  随  $I_b'$  的增大线性上升.

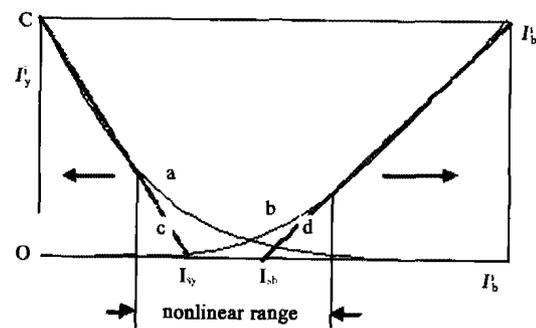


图 1 非线性透射情况 (实线 a, b) 和线性透射情况 (虚线 c, d) 下  $I_y'$  和  $I_b'$  随  $I_b'$  变化的示意图

Fig. 1 The schematic of  $I_y'$  and  $I_b'$  as a function of  $I_b'$  for non-linear (solid curves a, b) and linear (dashed lines c, d) transmittance, respectively

假设用黄光承载图像, 其中有用信息为  $S(x, y)$ , 亮背景噪声为  $B(x, y)$ ,  $(x, y)$  为图像的空间坐标, 蓝光作为抑制光同时入射 bR 膜. 这种情况下蓝光的入射光强就是偏置光强. 则入射图像光强的空

间分布为:

$$I_y = S(x, y) + B(x, y) \quad (5)$$

为了使得处理后的图像仅保留有用信息  $S(x, y)$ , 也就是要求  $I_y = S(x, y)$ , 即

$$S(x, y) = S(x, y) + B(x, y) - \frac{\lambda_b I_b}{\lambda_y} - \frac{CNZ}{2\lambda_y \tau} \quad (6)$$

可得到偏置光强:

$$I_b = \frac{\lambda_y}{\lambda_b} \left( B - \frac{CNZ}{2\lambda_y \tau} \right) \quad (7)$$

此时亮背景噪声  $B(x, y)$  完全被抑制, 透射光强就是有用信息  $S(x, y)$ , 实现非相干亮背景的处理。

## 1.2 实验

实验装置如图 2 所示, 实验中用到的 bR 膜参数:  $d=0.2\text{mm}$ ,  $N=3\text{mmol/ml}$ ,  $\tau=7\text{s}$ . 实验所用模型为隐藏在云层中的五个飞机模型(图 3(a)), 其中飞机模型为有用信息, 云层为亮背景噪声. 黄光通过模型后照射 bR 膜, 光强均匀分布的蓝光作为抑制光同时照射 bR 膜, 处理后的图像由照相机来记录. 慢慢增大蓝光光强, 透射黄光光强逐渐减小, 亮背景噪声光强逐渐被去掉, 对比度逐渐增大, 飞机模型可以被看到(图 3(b)). 当蓝光光强继续增大到一定强度时, 亮背景噪声完全被滤除, 虽然有用信息(飞机模型)也降低了同样的强度, 但是对比度增大, 隐藏的飞机模型完全被显示出来(图 3(c)).

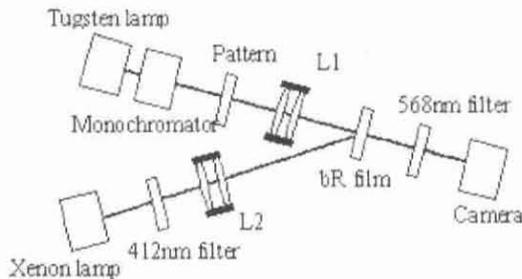


图 2 实验装置图  
Fig. 2 The experimental setup

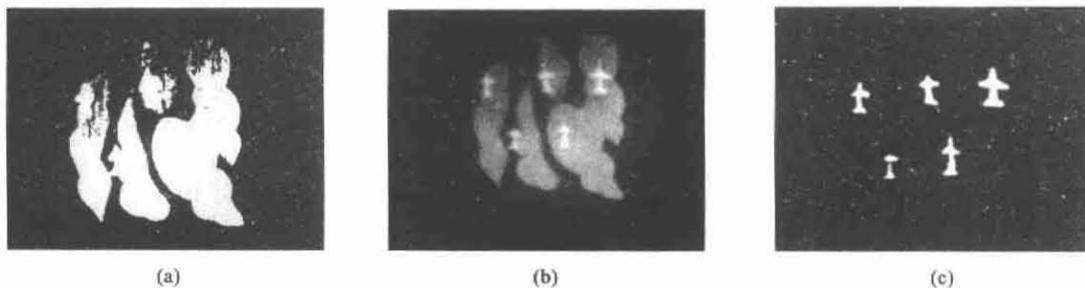


图 3 图像亮背景处理的照片。(a)亮背景噪声未被滤除 (b)噪声部分被滤除 (c)噪声完全被滤除  
Fig. 3 (a)the transparent object pattern with plane models and bright-background (b)the bright-background was removed partly (c)the bright-background was removed thoroughly

## 2 分析

在以下的计算中,  $N$  和  $d$  以  $Nd$  的形式存在, 固定  $d$  为  $0.2\text{mm}$  而只讨论  $N$  对处理后图像的影响. 用到的参量如下:  $\phi=0.65$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $\lambda_b=412\text{nm}$ ,  $\lambda_y=568\text{nm}$ ,  $\varepsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y)=54000$ ,  $\varepsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y)=5000$ ,  $\varepsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b)=46000$  及  $\varepsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)=6000$ .

### 2.1 bR 膜参数对处理后图像对比度 $P$ 的影响

假设由黄光承载的输入图像信息是一维的, 其空间分布为  $I_y(x) = 5 + \cos(x)$ , 其中有用信息为  $S(x) = 1 + \cos(x)$ , 亮背景噪声为  $B(x) = 4$ ,  $x$  为图像的空间坐标. 处理后图像的对比度  $P$  为:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

式(8)中  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别为处理后图像的最大和最小的透射光强. 通过公式(1)可计算  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$ , 进而由公式(8)计算出 bR 膜参数 ( $N, \tau$ ) 和偏置光强 ( $I_b$ ) 对处理后图像对比度  $P$  的影响.

$\tau$  的变化主要引起两透射阈值光强附近非线性区大小的变化, 进而影响处理后图像的质量, 即引起  $P$  的变化. 图 4(a) 和图 4(b) 分别给出不同偏置光强和不同膜浓度的情况下  $P$  随  $\tau$  的变化情况. 在图 4(a) 中,  $N=3\text{mmol/ml}$ , 曲线 1, 2, 3 和 4 分别对应  $I_b=1, 1.5, 2.5$  和  $3\text{mW/cm}^2$ . 在图 4(b) 中,  $I_b=3\text{mW/cm}^2$ , 曲线 1, 2, 3 和 4 分别对应  $N=1, 2, 2.5$  和  $3\text{mmol/ml}$ . 由图 4 可以看出, 增大  $\tau$  可以提高处理后图像的对比度, 但当  $\tau$  增大到一定值时,  $P$  随  $\tau$  的变化变得很缓慢, 趋向于一稳定值. 由图 4(a) 可知,  $\tau$  相同时,  $I_b$  越大, 对应的  $P$  随之增大. 由图 4(b) 可知,  $\tau$  相同时,  $N$  越大, 对应的  $P$  越大, 但是当  $\tau$  很短的时候,  $P$  随  $N$  的变化则不遵从这一规律.

图 5 给出了  $P$  随  $N$  变化的示意图, 当  $N$  较小时,  $P$  随  $N$  的增加而增加, 但是变化较缓慢. 当  $N$  继续增加时,  $P$  迅速升高至最大值  $P_{\max}$ , 再增大  $N$  时,  $P$

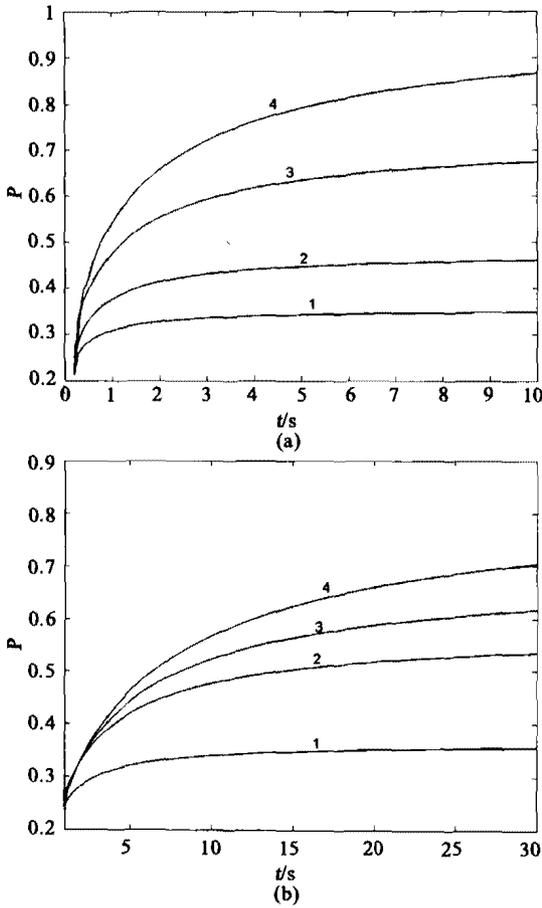


图4  $P$  随  $\tau$  的变化, (a) 不同  $I_b^i$ , (b) 不同  $N$   
Fig. 4  $P$  as a function of  $\tau$  for (a) different  $I_b^i$  and (b) different  $N$

很快降低, 当  $N$  非常大的时候,  $P$  趋向于 0. 这是因为  $N$  很大的时候, 被滤除的光强较大, 有用的信息也被滤除, 且空间分布的弯曲度变得很小, 处理后的图像发生了很大的畸变. 图 5(a) 给出了不同  $\tau$  下  $P$  随  $N$  变化的情况, 其中  $I_b^i = 2.5 \text{ mW/cm}^2$ , 曲线 1, 2, 3, 4 分别对应  $\tau = 1\text{s}, 5\text{s}, 10\text{s}, 15\text{s}$ . 可以看出  $\tau$  越大,  $P_{\max}$  越大, 相应于  $P_{\max}$  的膜浓度也越大, 但是对比度的增大量变小. 图 5(b) 给出了不同  $I_b^i$  下  $P$  随  $N$  变化的示意图, 其中  $\tau = 15\text{s}$ , 曲线 1, 2, 3 和 4 分别对应  $I_b^i = 1, 1.5, 2, 2.5 \text{ mW/cm}^2$ ,  $I_b^i$  越大,  $P_{\max}$  越大, 相应的  $N$  越小,  $P$  随  $I_b^i$  的增大几乎均匀增大.

由图 4(a) 和图 5(b) 可看出,  $P$  随  $I_b^i$  的增大而均匀增大, 亮背景噪声被滤除的较多. 可以看出  $I_b^i$  对  $P$  的影响大于  $N$  对  $P$  的影响, 而  $N$  对  $P$  的影响大于  $\tau$  对  $P$  的影响. 由图 4 和图 5 可知, bR 膜参数和偏置光强影响处理后图像的对比度.  $P$  随  $\tau$  的增大而增大直至一个稳定值,  $N$  太小和太大都使得  $P$  变

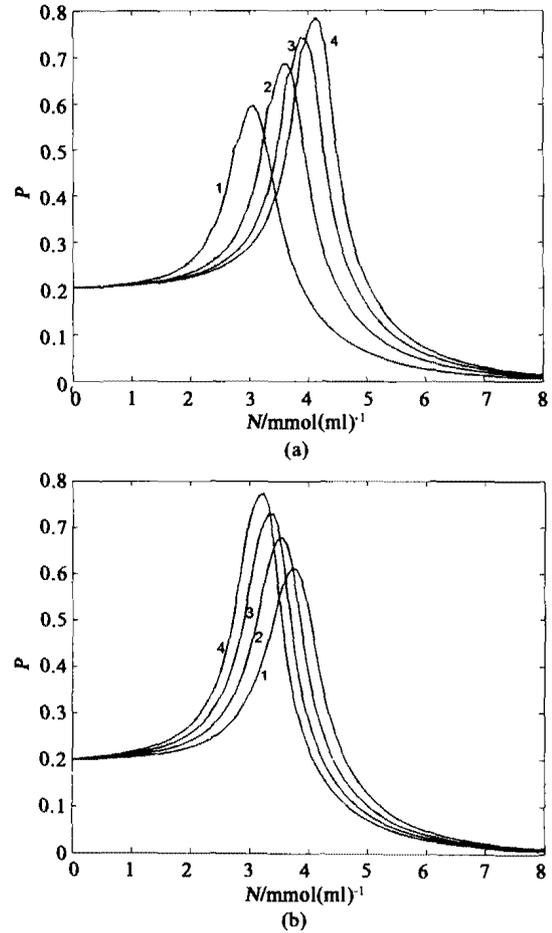


图5  $P$  随  $N$  的变化, (a) 不同  $\tau$ , (b) 不同  $I_b^i$   
Fig. 5  $P$  as a function of  $N$  for (a) different  $\tau$  and (b) different  $I_b^i$

小, 存在一个最佳膜浓度使得  $P$  达到  $P_{\max}$ .

## 2.2 bR 膜参数和偏置光强对透射光强的影响

假设同样由黄光承载输入信号, 其中有用信号为  $S(x) = 2 + 2\sin(x)$ , 亮背景噪声为  $B(x) = 4$ , 输入信号为  $I_y^i = S(x) + B(x)$ . 由蓝光做偏置光. 由公式(1)可知,  $I_y^i$  受到  $I_b^i$  和膜参数 ( $Nd$  和  $\tau$ ) 的影响. 图 6(a), (b) 和 (c) 分别给出了不同  $I_b^i$ , 不同  $\tau$  和不同  $N$  情况下处理后图像的透射光强的空间分布示意图, 其中虚线对应输入的有用信号的空间分布. 在图 6(a) 中,  $N = 2 \text{ mmol/ml}$ ,  $\tau = 10\text{s}$ , 曲线 1, 2, 3 和 4 分别对应  $I_b^i = 2, 2.5, 3.3$  和  $3.6 \text{ mW/cm}^2$ . 在图 6(b) 中,  $N = 2.5 \text{ mmol/ml}$ ,  $I_b^i = 3 \text{ mW/cm}^2$ , 曲线 1, 2, 3 和 4 分别对应  $\tau = 5\text{s}, 10\text{s}, 15\text{s}$  和  $25\text{s}$ . 在图 6(c) 中,  $\tau = 15\text{s}$ ,  $I_b^i = 3 \text{ mW/cm}^2$ , 曲线 1, 2, 3 和 4 分别对应  $N = 1, 2, 3$  和  $4 \text{ mmol/ml}$ .

由图 6(a) 可知,  $I_b^i$  越大,  $I_y^i$  越小, 但是  $I_y^i$  的空间分布保持不变, 且  $I_y^i$  均匀减小,  $P$  均匀变大. 如果  $I_b^i$  选择的合适, 亮背景可以被完全滤除, 畸变最小, 处

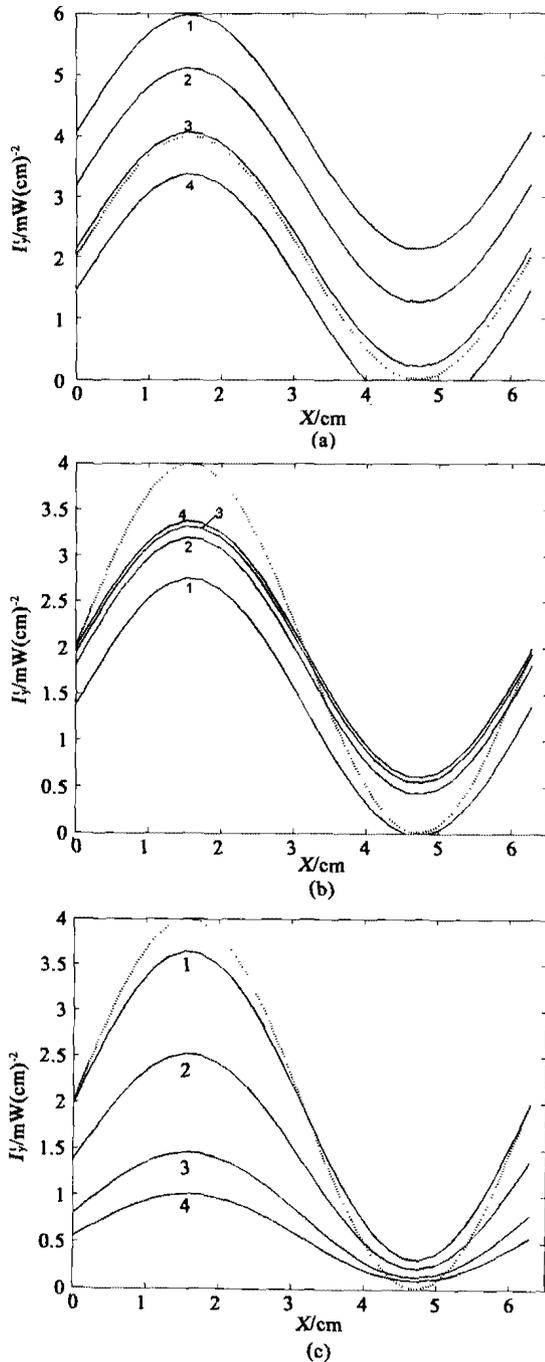


图6 处理后图像的  $I_s$  的空间分布, (a) 不同  $I_b$ , (b) 不同  $\tau$  及 (c) 不同  $N$

Fig. 6 The space distribution of  $I_s$  under (a) different  $I_b$ , (b) different  $\tau$  and (c) different  $N$

理后的信号与输入的有用信号最接近(图6(a), 曲线3);但是当  $I_b$  过大时,有用信息也被滤除,使得处理后的图像发生畸变(图6(a), 曲线4). 由图6(b)可知,增大  $\tau$  时,  $I_s$  变大,  $I_s$  的空间分布的弯曲度变大,  $P$  变大,但  $I_s$  的增加量降低. 当  $\tau$  较大时,处理后的图像几乎保持不变(图6(b), 曲线3,4),  $P$  几乎

保持不变. 图6(c)给出了不同  $N$  情况下  $I_s$  的空间分布的情况,  $N$  升高,  $I_s$  及其空间分布的弯曲度降低,  $I_s$  的变化量降低,但是  $I_s$  的空间分布弯曲度的变化量变大,所以  $N$  较小时,  $P$  随之变大(图6(c), 曲线1,2),  $N$  再增大  $P$  降低(图6(c), 曲线3), 当  $N$  很大时,  $I_s$  的空间分布的弯曲度很小,处理后的图像有较大的畸变,  $P$  降至很小(图6(c), 曲线4).

### 3 结语

利用 bR 膜的互补抑制调制透射的特性, 建立新式滤波器模型, 实验演示了光学图像非相干亮背景的滤除.  $N$  增大时,  $I_s$  及其空间分布的弯曲度都降低, 亮背景滤除的较彻底,  $P$  增大; 存在最佳  $N$ , 使得  $P$  达到最大值; 但是当  $N$  太大时, 空间分布的弯曲度非常小, 处理后的图像有较大的畸变,  $P$  降低至 0. 增大  $\tau$  时,  $I_s$  及其空间分布的弯曲度都增大,  $P$  增大; 但当  $\tau$  很大时,  $P$  变化非常缓慢, 处理后的图像基本保持不变,  $P$  趋向于一稳定值.  $I_b$  的大小对  $I_s$  的空间分布几乎没有影响, 但是  $I_s$  随  $I_b$  的增大而减小,  $P$  增大, 但如果  $I_b$  太大, 不但亮背景噪声被处理, 有用信息也可能被处理, 使得处理后的图像发生畸变. 计算结果和实验结果相一致. 在实际的应用中, 根据亮背景噪声的不同, 选择合适的 bR 膜和偏置光强使得处理后的图像的对比度增大而其畸变很小, 更接近有用信息, 实现高质量的亮背景滤除.

### REFERENCES

- [1] Oesterhelt D, Stoerkenius W. Rhodopsin-link protein from the purple membrane of *Halobacterium halobium* [J]. *Nature (London)*, 1971, **233**: 149—152.
- [2] Birge R R. Photophysics molecular electronic applications of the rhodopsins [J]. *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 1990, **41**: 683—733.
- [3] Song Q W, Zhang C P, Blumer R, et al. Chemically enhanced bacteriorhodopsin thin-film spatial light modulator [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1373—1375.
- [4] Thoma R, Hampp N, Brauchle C, et al. Bacteriorhodopsin films as spatial light modulators for nonlinear-optical filtering [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**: 651—653.
- [5] Gu L Q, Zhang C P, Zhang G Y, et al. Bacteriorhodopsin based photonic logic gate and its applications to gray level image subtraction [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **131**(15): 25—30.
- [6] Zhang C P, Gu L Q, Chen G Y, et al. A novel optical filter of removing bright-background using enhanced bacteriorhodopsin thin film [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(12): 2161—2164.