

一种基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型及其在图像增强中的应用

刘琦 王丽丹 段书凯

An adaptive three-Gauss model based on memristive cross array and its application in image enhancement

Liu Qi Wang Li-Dan Duan Shu-Kai

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 127301 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.127301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.127301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 Ni 电极和 $ZrO_2/SiO_2/ZrO_2$ 介质的 MIM 电容的导电机理研究

Conduction mechanisms of MIM capacitors with $ZrO_2/SiO_2/ZrO_2$ stacked dielectrics and Ni electrodes

物理学报.2017, 66(8): 087301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.087301>

基于串并联磁控忆阻器的耦合行为研究

Research of coupling behavior based on series-parallel flux-controlled memristor

物理学报.2015, 64(23): 237303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.237303>

Ti/HfO₂/Pt 阻变存储单元中的氧空位聚簇分布

Cluster distribution for oxygen vacancy in Ti/HfO₂/Pt resistive switching memory device

物理学报.2015, 64(20): 207302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.207302>

忆阻器及其阻变机理研究进展

Research progress of memristors and memristive mechanism

物理学报.2014, 63(18): 187301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.187301>

Ni/HfO₂/Pt 阻变单元特性与机理的研究

Electric characteristics and resistive switching mechanism of Ni/HfO₂/Pt resistive random access memory cell

物理学报.2014, 63(14): 147301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.147301>

一种基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型及其在图像增强中的应用*

刘琦 王丽丹[†] 段书凯

(西南大学电子信息工程学院, 非线性电路与智能信息处理重庆市重点实验室, 重庆 400715)

(2017年1月11日收到; 2017年3月31日收到修改稿)

在视觉图像处理中, 可用三高斯模型来模拟视网膜神经节细胞的感受野, 这可以在一定程度上对图像信息, 比如图像的边缘、细节等信息进行增强. 但是在对大量的图像进行处理时, 为了达到比较理想的效果, 就需要人为地来改变模型中的相关参数, 这是一个十分耗时的过程. 基于此, 本文提出一种基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型. 这种模型是在传统三高斯模型的基础上, 根据所需处理图像的局部特征, 利用忆阻交叉阵列的特性动态地改变模型参数, 以达到对局部图像最优增强的目的, 从而使整幅图像的增强效果更好. 首先, 根据图像的局部亮度信息来确定忆阻器所需施加的脉冲电压的极性以及宽度; 然后, 根据所得忆阻值得到对应模型中参数的值; 最后, 可以得到局部增强模板, 从而实现增强. 本文分别选取了彩色和灰度图像进行了测试, 定性和定量实验结果均表明, 这种改进的三高斯模型不仅能够对图像边缘进行有效的增强, 而且还可以极大地提高图像的对比度和清晰度, 为忆阻器在图像处理方面的应用提供了新方向.

关键词: 自适应, 三高斯模型, 忆阻交叉阵列, 图像增强**PACS:** 73.40.Rw, 84.30.Bv, 84.32.-y, 85.35.-p**DOI:** 10.7498/aps.66.127301

1 引言

图像增强^[1,2]是一种图像处理方法, 它可以把原本不清楚的图像变得清晰, 或者将某些感兴趣的特征进行强调、不需要的特征进行抑制, 从而提高图像质量, 加强图像的有用信息. 根据处理过程所在空间的不同, 图像增强可分成两大类: 频率域法和空间域法. 频率域法是一种间接的处理方法, 是在某种变换域内相应地对图像的变换系数进行修正, 然后再转换到原来的空间中; 空间域法是一种直接的处理方法, 它可以对图像中的像素点直接进行操作.

人类视觉系统能够高效地对图像进行处理, 不管是从处理时间还是处理效果来看, 传统的图像增

强技术都远不及人类视觉系统. 近年来, 越来越多的人开始重视基于视觉机制的图像处理方法^[3-7], 人类视觉系统的研究将会被逐渐应用到图像处理技术中, 同时也为图像增强提供了新思路.

在人类视觉系统^[8,9]中, 当视网膜上一定区域受到刺激时, 与这个区域联系的隔层神经细胞的活动将会被激活, 相应的神经从而会产生发放变化, 我们称视网膜神经节细胞的这一区域为该视网膜神经节细胞的感受野. 1965年, 由Rodieck^[10]提出的双高斯差(DOG)函数模型, 认为感受野是由一个同心圆构成的, 这个模型对这样的结构及感受野的空间特性进行了成功的模拟, 并且也很好地模拟了感受野在受到小光点刺激时所表现出的性质. 随着对哺乳动物的视网膜神经节细胞感受野的深入研究, Li等^[11]在DOG模型的基础上, 又提

* 国家自然科学基金(批准号: 61571372, 61672436, 61372139)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: XDJK2016A001, XDJK2014A009)和新世纪优秀人才支持计划(批准号: 教技函[2013]47号)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ldwang@swu.edu.cn

出了一种非经典感受野的三高斯模型, 提出神经节细胞的感受野是由三个区域组成的同心圆结构, 即由中心兴奋区、周边抑制区和外围去抑制区共同组合而成. 非经典感受野模型既能对低空间频率的信息损失进行补偿, 又能对边缘进行有效增强, 该特性对于传递图像的亮度信息和灰度梯度信息起着极其重要的作用. 随后, 由多项电生理实验的结果可知, 视网膜神经节细胞的感受野对外界刺激的响应会随外界刺激的不同发生变化, 这种变化可以通过多次实验得到, 比如, 当对感受野所施加的外界刺激对比度降低时, 其中心兴奋区半径会随之变大^[12,13]. 这是一种自适应的机制, 如果把它加入到传统的三高斯模型中, 那么原来的静态模型将会变为动态模型, 这样将更加符合人眼的特性^[14].

场景的亮度值^[15,16]和输入图像的局部对比度^[17]等信息都可以作为图像增强的因素. 根据感受野对外界刺激的响应随时间动态变化的现象, 本文采用局部对比度 (*Con*) 作为一个局部信息, 根据图像中不同位置 *Con* 的大小对传统三高斯模型的中心兴奋区敏感度进行取值, 从而对局部图像进行自适应增强. 由人眼的视觉感知特性可知, 如果令一幅图像中的暗处更暗、亮处更亮, 这样就可以使一幅图像的局部对比度得到提高. 所以, 本文又采用被处理点处的亮度值 (*Lum*) 作为另一个局部信息, 根据不同位置 *Lum* 的不同对传统三高斯模型中抑制区半径的值进行动态调整.

忆阻器^[18,19]是一种具有非易失性的元器件, 其阻值受控于元件两端所施加的电源强度、电源极性以及电源的供电时间. 并且, 若去掉其两端施加的电压, 它依然可以保持掉电时的忆阻值. 许多研究表明, 当幅度不同、宽度相同的电压脉冲施加到忆阻器两端时, 其阻值会发生连续变化, 利用这一原理可以实现图像的存储^[20-22].

本文提出的基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型是通过忆阻器的连续输入输出特性来改变三高斯模型中的参数所形成的一种自适应的模型. 它可以根据图像某一像素点的局部信息来调节对应的忆阻交叉阵列在该点的忆阻器两端脉冲电压的极性和宽度, 从而可以调节忆阻器的阻值, 这样就可以利用忆阻值的大小来改变三高斯模型中所对应参数的大小, 然后确定图像的局部增强模板, 对图像进行局部增强, 进而实现整幅图像的增强.

2 基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型

三高斯模型^[11]结构如图 1 所示.

传统三高斯函数模型的公式为

$$G(x, y) = A_1 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma_1^2}\right) - A_2 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma_2^2}\right) + A_3 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma_3^2}\right), \quad (1)$$

其中, *G* 为三高斯模型; *A*₁, *A*₂, *A*₃ 分别表示中心兴奋区、周边抑制区和外围去抑制区的峰值系数; σ_1 , σ_2 , σ_3 分别表示中心兴奋区、周边抑制区和外围去抑制区的尺度参数. 三高斯模型的空间结构如图 2 所示.

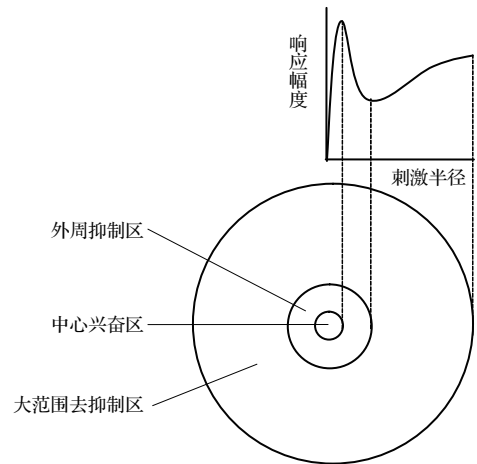


图 1 三高斯函数模型结构示意图

Fig. 1. Schematic structure of three-Gaussian function model.

我们知道, 视网膜神经节细胞的感受野对外界刺激的响应会随着外界刺激的不同而发生动态变化: 当感受野接受的外界刺激对比度变大时, 其外周区抑制幅度就会减小, 中心兴奋区的兴奋度反而增强; 当感受野接受的外界刺激对比度变小时, 外周抑制区的抑制幅度就会变大, 中心兴奋区的兴奋度反而减弱. 据此, 本文采用局部对比度 *Con* 作为一幅图像的一个局部信息, 根据一幅图像中不同位置 *Con* 的大小对三高斯模型的中心兴奋区的峰值系数 ((1) 式中的 *A*₁) 进行相应的取值.

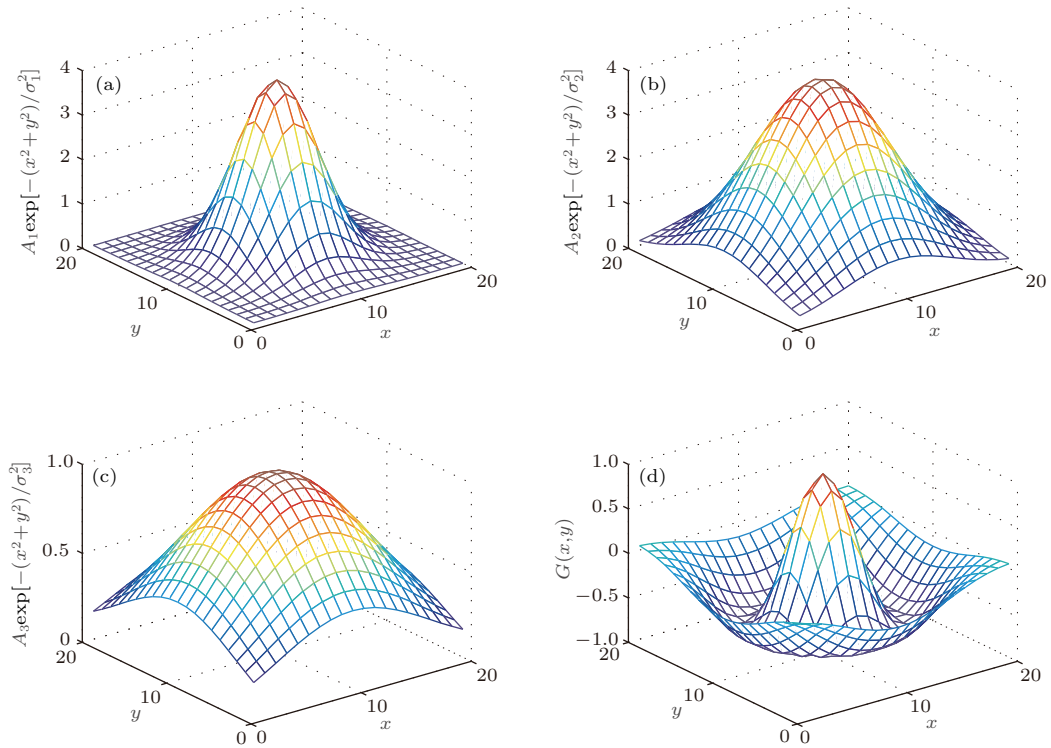


图2 (网刊彩色) 三高斯模型的空间结构 (a) 中间兴奋模型; (b) 四周抑制模型; (c) 边缘兴奋模型; (d) 带去抑制的三高斯模型

Fig. 2. (color online) Spatial structure of three-Gaussian function model: (a) Intermediate exciting model; (b) surrounding inhibition model; (c) edge exciting model; (d) three Gauss model with disinhibition.

这里, 局部对比度 Con 为: 在一幅图像中, 选取一个被处理点, 以这个点为中心取该点的邻域大小为 3×3 , 这个邻域内所有像素值的标准差即为 Con .

本文选取的另一个局部特征为图像中被处理点的亮度值 Lum . 由人眼的视觉感知特性可知, 在一幅图像中, 令暗处越暗、亮处越亮, 能够提高这个图像的局部对比度. 所以, 可以根据不同位置的亮度值对该点的三高斯模型中外周抑制区的半径 ((1) 式中的 σ_2) 进行自适应调整. 当被处理点的亮度值较大时, 减小 σ_2 的值, 中心兴奋区的抑制作用就会减弱, 从而可以增加被处理点的亮度值, 即可以实现亮处更亮; 当被处理点的亮度值较小时, 增大 σ_2 的值, 中心兴奋区的抑制作用就会增强, 从而可以降低被处理点的亮度值, 即可以实现暗处更暗.

由于传统的三高斯模型中参数是固定的, 需要人为地调整三高斯模型中的参数, 不利于处理大量的信息. 本文根据上述三高斯模型中的参数随图像 Con 和 Lum 的不同而变化的原则, 引入忆阻器的交叉阵列来控制传统的三高斯模型中的参数. 通过

调节脉冲电压的宽度和极性调节忆阻器的阻值来表示中心兴奋区的峰值系数 A_1 与 Con 、周边抑制区尺度参数 σ_2 与 Lum 的数学关系. 当施加正脉冲时, 忆阻值减小; 当施加负脉冲时, 忆阻值增加, 并且可以通过调节电压脉冲的宽度来实现忆阻值的连续调节.

本文选用的忆阻器模型是惠普忆阻器 [18], 如图 3 所示. 它是由夹在两个铂电极之间的两层 TiO_2 薄膜构成的: 一层是绝缘层, 其中钛和氧比例是 1 : 2, 即 TiO_2 , 称为非掺杂层; 另一层为缺失了部分氧原子的 TiO_2 , 可以描述为 TiO_{2-x} (x 约为 0.05), 称为掺杂层. 当在忆阻器的两端施加电压时, 在电场的作用下, 其掺杂层中的氧空位会发生漂移, 这将导致掺杂层和非掺杂层之间边界的移动, 从而引起忆阻器有效忆阻值的改变. 其阻值可表示为

$$R_{MEM}(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x), \quad (2)$$

式中,

$$x = \frac{W}{D} \in (0, 1), \quad (3)$$

x 是忆阻器的掺杂层厚度与 TiO_2 薄膜总厚度之比,

它是忆阻器的内部状态变量, 其中, D 表示 TiO_2 薄膜的厚度, 其大小近似为 10 nm , W 表示掺杂层的厚度, 在电场的作用下, W 会发生相应的变化, 施加正向电压时, W 将会增大, 忆阻器的阻值变小, 施加负向电压时, W 将会减小, 忆阻器的阻值变大; R_{MEM} 是忆阻器的有效忆阻值; R_{ON} 和 R_{OFF} 分别对应 $W = 0$ 和 $W = D$ 时忆阻器的极限值. 忆阻器两端电压与电流的关系可以表示为

$$v(t) = R_{\text{MEM}}(x)i(t). \quad (4)$$

两种掺杂层之间的边界可以移动, 其移动速率取决于多种因素, 比如薄膜厚度、掺杂层的电阻、流过的电流等.

$$\frac{dx}{dt} = ki(t), \quad k = \frac{\mu v R_{\text{ON}}}{D^2}, \quad (5)$$

其中, $\mu v \approx 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ 是所有离子的平均漂移率; k 是一个比例因子, 为掺杂层和非掺杂层之间的边界的移动速度与流经电流之比.

图 4 为施加宽度不同、极性不同的电压脉冲时忆阻值的变化规律. 图 4(a) 为当忆阻器两端输入宽度相同、幅度不同的正电压脉冲时忆阻值的变化情况. 由图 4(a) 可知: 当给忆阻器两端施加正电压脉冲时, 忆阻值减小的情况与电压脉冲的幅度成正比. 图 4(b) 为当忆阻器两端输入的是幅度相同、宽度不同、正负交替的电压脉冲时忆阻值的变化情况: 施加正电压时, 忆阻值减小, 而且减小的幅度与电压脉冲的宽度成正比, 宽度越宽, 减小越多; 施加负电压时, 忆阻值增加, 而且增加的幅度与电压脉冲的宽度成正比, 宽度越宽, 增加越多. 由以上规律可知, 可以通过施加宽度不同、极性不同、大小不同的脉冲电压来调节忆阻值的大小.

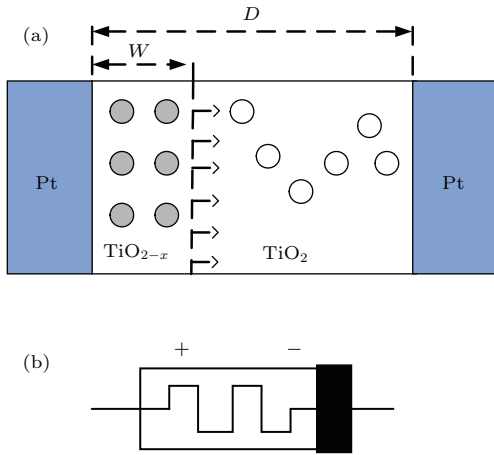


图 3 惠普忆阻器模型 (a) 结构图; (b) 器件符号
Fig. 3. Model of HP memristor: (a) Structure diagram; (b) device symbol.

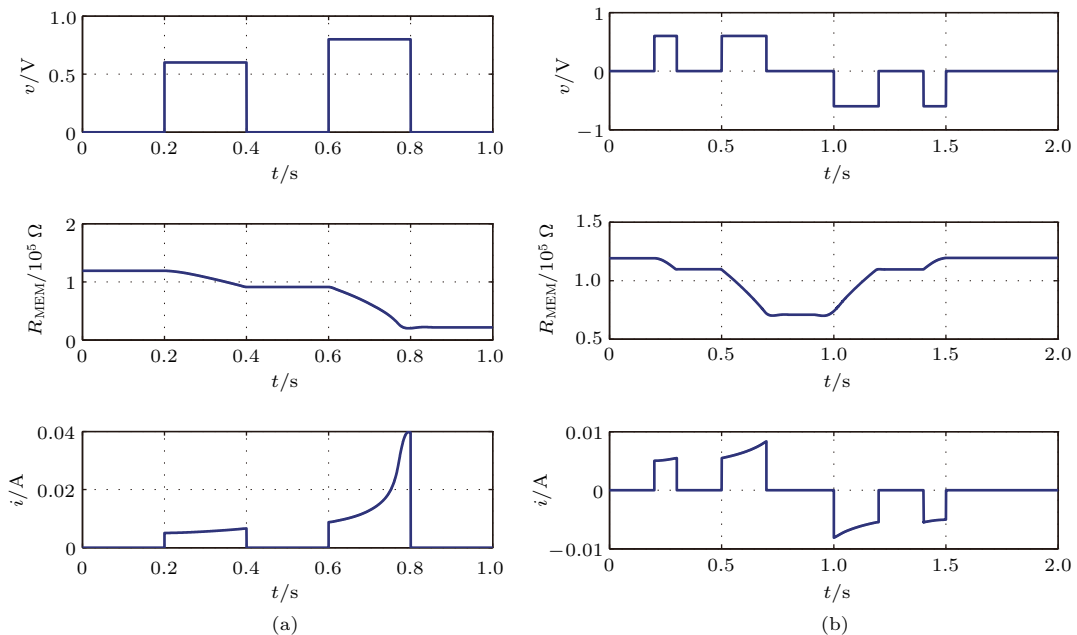


图 4 电压脉冲对忆阻器的影响 (a) 宽度相同、幅度不同的输入电压; (b) 幅度相同、宽度不同的输入电压
Fig. 4. Effects on the memristor with different input voltages: (a) Input voltages with identical duration but different amplitude; (b) input voltages with identical amplitude but different duration.

忆阻交叉阵列是一种具有并行处理能力的结构, 它由水平纳米线和垂直纳米线构成, 在交叉点放置忆阻器. 图5是大小为 4×4 的忆阻交叉阵列图, 其结构示意图如图5(a), 存储结构图如图5(b). 它包含以下几个部分: 交叉阵列、读写控制和读电路模块、行列开关选择器、电压转换器. 实验表明, 忆阻器具有连续输入输出的特性, 理论上拥有无数个连续的阻值状态, 从而可以记忆一幅图像中某个像素点处的灰度值或者局部特征值. 通过改变忆阻器两端所施加的脉冲电压的极性及其宽度来改变忆阻器的阻值大小, 从而实现存储操作. 如图5(a)所示的交叉阵列, 若一个像素点处的相应特征值用一个忆阻器来存储, 则该阵列就能够对一幅大小为

4×4 的简单图像的相关信息存储. 对于大量的图像信息, 我们可以根据图像大小或者要求适当地增加忆阻交叉阵列的行和列来实现存储.

利用忆阻交叉阵列存储图像的相关信息时, 输入图像的信息可以通过电压转换器转换为幅度相同、宽度不同的电压脉冲, 我们可以通过控制忆阻器进行写操作的时间来获得所需要的不同宽度的电压脉冲.

本文采用忆阻交叉阵列来调节图像的每一个像素点处所需要的三高斯模型的相应参数, 每一个交叉点处的忆阻器对应一个像素点, 存储该点的相关信息, 并进行自适应调节. 可以通过调节电压脉冲的宽度来实现忆阻值的连续调节, 如图6所示.

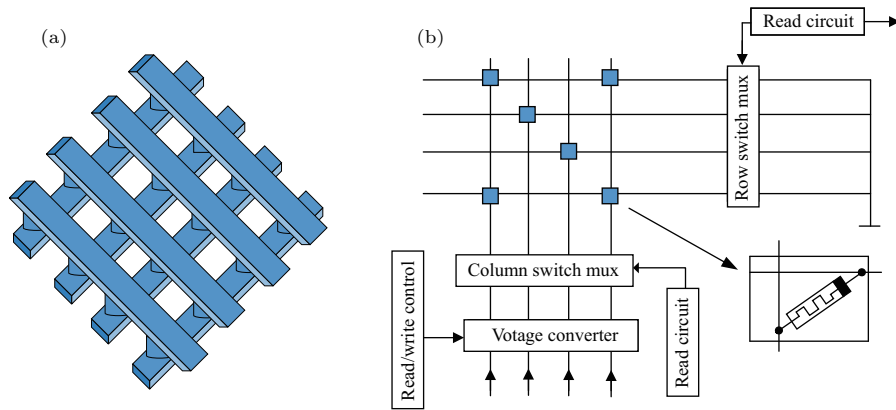


图5 忆阻器交叉阵列 (a) 交叉阵列结构示意图; (b) 存储结构
Fig. 5. Memristive crossbar array: (a) Structure diagram; (b) storage structure.

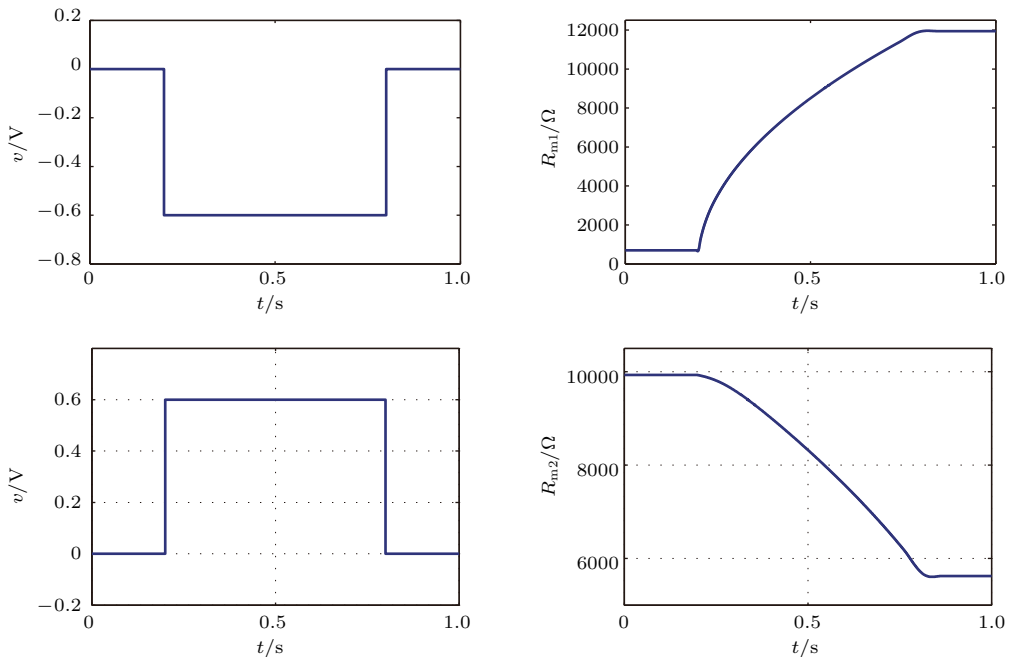


图6 忆阻值在正负电压脉冲下的变化
Fig. 6. Changes of memristance under positive and negative voltage.

当施加电压为大小恒定的负电压脉冲时, 忆阻值的大小 R_{m1} 与施加的脉冲宽度 Δt 成正比; 当施加电压为大小恒定的正电压脉冲时, 忆阻值的大小 R_{m2} 与施加的脉冲宽度 Δt 成反比. A_1 和 σ_2 与忆阻值之间的关系表示如下:

$$A_1 = 5.8 + \frac{1}{R_0 - R_{\text{init}}} R_{m1}, \quad (6)$$

$$\sigma_2 = 1.25 - \frac{0.1}{R'_0 - R'_{\text{init}}} R_{m2}, \quad (7)$$

其中, R_{init} , R_0 分别为 Con 取最小值和最大值时对应的忆阻值; R'_{init} , R'_0 分别为 Lum 取最小值和最大值时对应的忆阻值; R_{m1} , R_{m2} 分别对应每一个像素点处的 Con 与 Lum 所对应的忆阻值.

3 灰度图像自适应增强的实现及其结果分析

对灰度图像增强的具体步骤如下.

步骤 1 图像滤波. 为了降低原始图像中的噪声干扰, 选取维纳滤波器对原始图像进行平滑滤波, 这里滤波器滑动窗口的大小为 3×3 .

步骤 2 灰度图像归一化处理. 对滤波后的图像进行灰度归一化处理.

步骤 3 确定忆阻器两端所需要施加的脉冲电压的宽度. 首先计算以被处理点为中心的邻域内的像素值的标准差 Con , 其次获取被处理点的像素值 Lum . 由数据可知, Con 和 Lum 数值的大小分布在 $[0, 1]$ 内, 分别对应于忆阻器施加的脉冲电压的宽度.

步骤 4 确定自适应增强模板, 对归一化之后的图像进行处理. 在步骤 3 中, 被处理点处的 Con 和 Lum 的值已经得到, 从而可以得到每一点所对应的脉冲电压宽度, 根据 (6) 和 (7) 式得到模板参数 A_1 和 σ_2 , 进而得到该点处的增强模板, 然后应用此模板对局部图像进行自适应增强.

步骤 5 增强整幅图像. 依次进行局部增强处理, 从而得到整幅图像的增强结果.

3.1 实验结果与分析

本文分别选取 Lena 图像和 Goldhill 图像作为测试图像, 分别经过直方图均衡化、传统的三高斯模型和本文提出的基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型进行处理, 观测其增强效果. 图 7 是增强

效果对比图, 可以看到: 直方图均衡化处理方法能够使原图像的明暗对比在一定程度上得到提升 (例如 Lena 图像中帽子上的纹路), 但是也存在很大的不足, 经过直方图均衡化处理后的图像在边缘轮廓和局部细节的增强上没有达到比较好的效果, 损失了许多细节信息 (例如 Goldhill 图像中房顶和墙面纹路的丢失); 传统的三高斯模型在图像边缘轮廓增强方面有比较好的效果, 但在局部则会存在很多过增强现象 (例如 Lena 图像中帽子前端部分和 Goldhill 图像中远处树林部分), 并且, 图像的明暗对比并不能得到有效的提升; 本文提出的基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型在处理图像时, 不仅可以使图像的明暗对比和清晰度极大地提高, 还能够保持传统的三高斯模型对图像边缘信息的有效增强.

另外, 还可以通过增强前后图像直方图的状态来评价图像的一些性质: 对于明亮图像, 其直方图在灰度级高的一侧分布比较多; 对于低对比度图像, 其直方图窄而集中于灰度级的中部; 对于高对比度图像, 其直方图覆盖的灰度级很宽而且像素的分布并非十分不均匀, 只有少量的垂线比其他高许多. 所以从直观上来看: 如果一幅图像其像素在全部可能的灰度级都有分布并且分布均匀, 那么这样的图像有比较高的对比度和多变的灰度色调. 由图 7 可知: 经过直方图均衡化处理后, 其直方图尖端过多; 三高斯增强结果的直方图则倾向于灰度级过高的一侧; 而自适应的三高斯增强后图的像素分布在全部可能的灰度级中, 并且分布相对比较均匀. 这说明经本文提出的方法处理过的图像有较高的对比度和多变的灰度色调.

3.2 灰度图像增强效果的客观评价

为了对增强效果进行精确地比较, 本文采用文献 [23] 提出的一种经过改进的客观评价指标 EME . 文献 [24] 中首次提出这一评价指标的概念, 通过比较灰度图像增强前后的 EME 的值来表征对比度的变化, 从而判断图像增强的效果.

计算 EME 值时, 一般把图像平均分成若干个相同大小的局部图像, 然后对任意一个局部图像计算出它的最大像素值 $V_{\max,k,l}$ 和最小像素值 $V_{\min,k,l}$. 这里选取的局部图像大小为 16×16 .

EME的定义式如下:

$$EME = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_2} \sum_{k=1}^{k_1} 20 \ln \frac{V_{\max,k,l}}{V_{\min,k,l} + k}, \quad (8)$$

其中, 设置参数 k 是为了防止式中的分母为零, 在这里 k 取一个很小的值. EME 指标对比结果如表 1 所列.

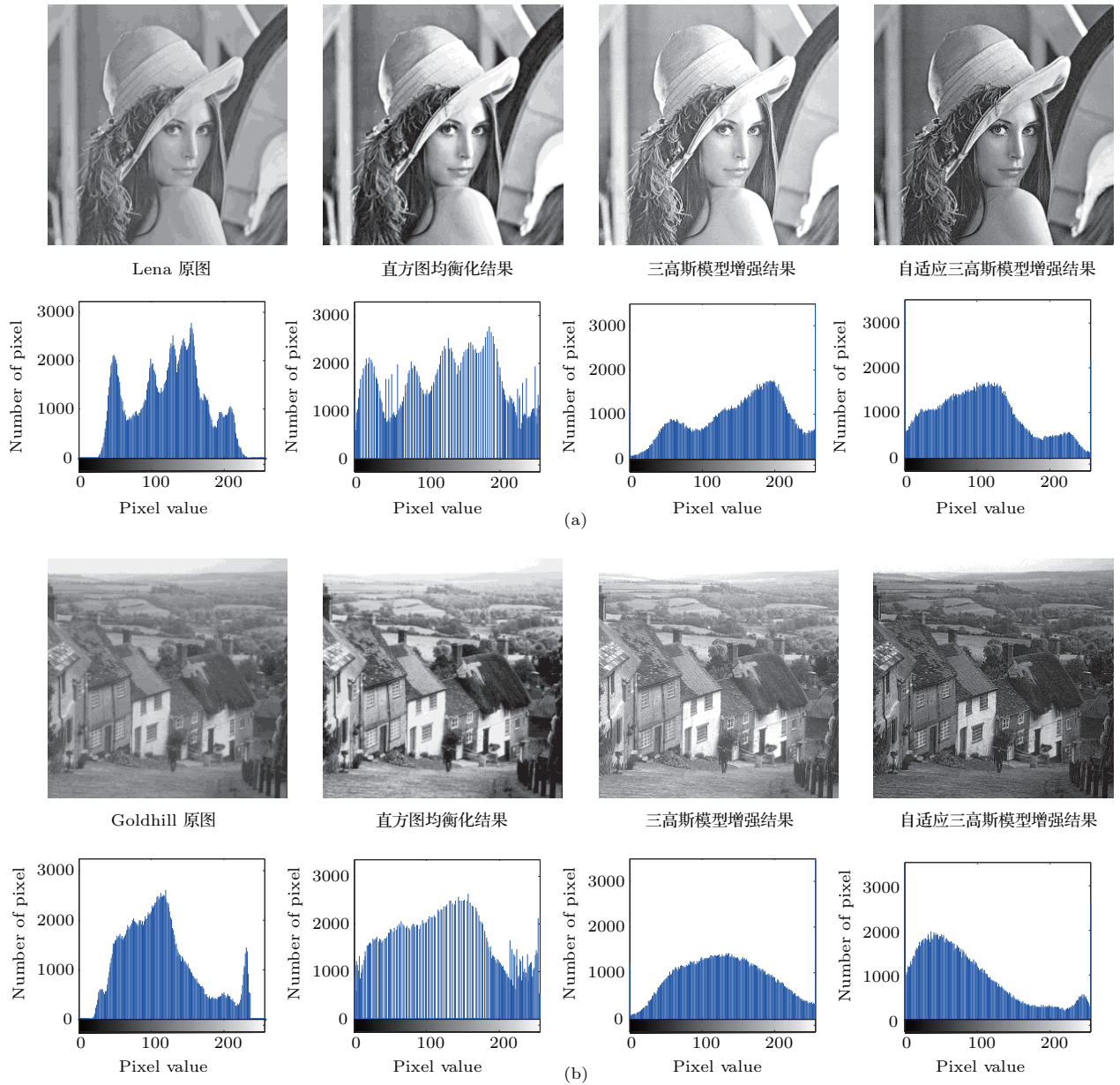


图7 增强效果对比图 (a) Lena 图; (b) Goldhill 图

Fig. 7. Contrast diagrams of enhancement effect: (a) Lena image; (b) Goldhill image.

表1 EME 性能评价

Table 1. Performance evaluation of EME.

图像	EME			
	原始图像	直方图均衡化	三高斯图像增强	基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯图像增强
Lena	14.4360	56.0487	54.0459	96.3381
Goldhill	16.1641	41.1443	81.0056	143.7336

EME 的值越大说明图像的平均动态范围越大, 增强后的图像具有更好的增强效果. 从表 1 中可以看出, 基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型的图像增强的 EME 值大于三高斯图像增强的 EME 值, 说明本文提出的方法不仅可以对图像边缘进行有效的增强, 而且还能够极大地提高图像的对比度和清晰度.

4 彩色图像自适应增强的实现及其结果分析

彩色图像增强的具体步骤如下.

步骤 1 归一化处理. 对原始图像进行归一化处理.

步骤 2 把彩色图像分为 R, G, B 三个通道, 分别进行处理.

步骤 3 对每一个通道进行图像滤波. 为了降低原始图像中的噪声干扰, 选取维纳滤波器对原始图像的每一个通道进行平滑滤波, 这里滤波器滑动窗口的大小为 3×3 .

步骤 4 确定忆阻器两端所需要施加的脉冲电压的宽度. 首先计算以被处理点 (x, y) 为中心的邻域内的像素值的标准差 Con , 其次获取被处理点 (x, y) 的像素值 Lum . 由相关数据可知, Con 和 Lum 的大小在区间 $[0, 1]$ 内, 分别对应于忆阻器施

加的脉冲电压的宽度.

步骤 5 确定局部增强的模板. 在步骤 4 中, 得到了被处理点处的局部特征 Con 和 Lum , 从而得到每一点所对应的脉冲电压宽度, 根据 (6) 和 (7) 式得到模板参数 A_1 和 σ_2 , 进而得到该点处的增强模板, 接下来应用此模板对该局部图像进行自适应增强, 得到每个通道增强后的图像 S_r, S_g, S_b .

步骤 6 颜色恢复. 通过简单的线性恢复算法调整图像的色彩信息.

4.1 颜色恢复

图像经过三高斯模型对每个通道进行增强后, 需要对颜色进行恢复, 可以利用增强后的亮度图像与原始图像 HSV 颜色空间的亮度进行比较来线性调整恢复增强后图像的 RGB 信息, 即

$$Q_i(x, y) = \frac{S_i(x, y)}{I(x, y)} I_i(x, y), \quad i = r, g, b, \quad (9)$$

其中, $I_i(x, y), i = r, g, b$, 分别对应原始彩色图像的 R, G, B 三个通道; $S_i(x, y), i = r, g, b$, 是增强后彩色图像的对应三个通道; $Q_i(x, y), i = r, g, b$, 是颜色恢复后彩色图像的对应三原色分量.

4.2 彩色图像自适应增强的流程

基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯彩色图像增强的流程如图 8 所示.

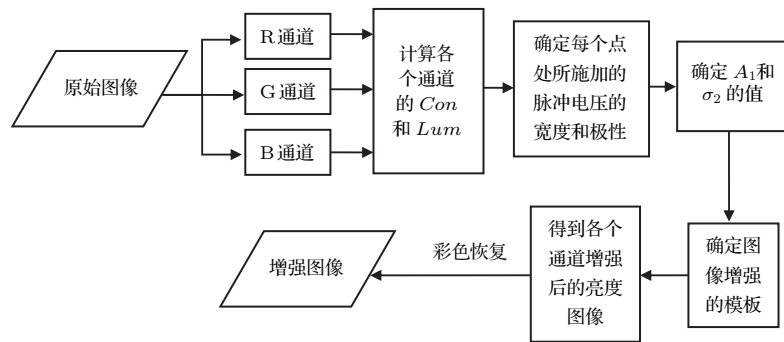


图 8 彩色图像增强的流程图

Fig. 8. Flow chart of the color image enhancement.

4.3 实验结果与分析

这部分选取了两幅图像作为测试图像, 分别经过直方图均衡化、传统的三高斯模型和本文提出的基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型进行处理, 观测其增强效果. 其对比图如图 9 所示, 从左到右

依次是原始图像、三高斯增强后的图像和基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型增强后的图像. 从图 9 结果可以看出, 原始图像整体较暗、颜色不够鲜艳; 而用传统的三高斯模型实现的图像增强, 虽然在一定程度上实现了亮度增强, 但是有的图像增强过亮(如 Lena 图像的帽子前端及帽穗部分), 而有

的图像则增强过弱(如 Couple 图像的墙面及地面部分). 本文提出的彩色图像增强方法则很好地实现了图像的增强, 整体亮度得到了很好的提高, 而且颜色鲜艳, 符合人眼的视觉特性.

本文提出的自适应模型对彩色图像增强后的图像所对应的灰度图像的 EME 值与原图以及传统的三高斯图像增强后的灰度图像的 EME 值的对比如表 2 所列.

EME 的值越大说明图像的平均动态范围越大, 增强后的图像有更好的增强效果. 从表 2 中可以看出, 基于忆阻交叉阵列的自适应三高斯模型的

图像增强的 EME 值大于三高斯图像增强的 EME 值, 说明本文提出的方法在彩色图像的增强上也有较好的效果.

表 2 EME 性能评价

Table 2. Performance evaluation of EME .

图像	EME		
	原始图像	三高斯图像增强	自适应的三高斯图像增强
Lena	15.6737	43.7417	52.6795
Couple	53.4618	121.8812	215.2534



图 9 (网刊彩色) 效果对比图

Fig. 9. (color online) Contrast diagrams of enhancement effect.

5 结 论

本文对三高斯模型中的参数 A_1 和 σ_2 进行控制, 提出一种自适应的基于忆阻交叉阵列的三高斯模型, 根据图像的局部特征, 引入忆阻器的交叉阵列. 忆阻器是一种具有记忆功能的非线性电阻, 是一种不需要能源的存储元器件, 其阻值的变化取决于通过它的电荷量或者磁通量. 利用这个特性, 本文通过改变忆阻器两端电压脉冲的极性和宽度来改变忆阻值, 从而改变三高斯模型中的参数. 本文所提模型将忆阻器的交叉阵列与非经典感受野在

图像处理中的应用结合起来, 并与直方图均衡化、传统三高斯算法相比较, 不仅在灰度图像上得到了比较理想的结果, 同时也在彩色图像上取得了良好的效果. 定性和定量的实验结果均表明, 这种自适应模型不仅能够对图像边缘进行有效的增强, 而且还可以极大地提高图像的对比度和清晰度, 并且为忆阻器在图像处理方面的应用提供了新方向.

参考文献

[1] Li H, Wu W, Yang X M, Yan B Y, Liu K, Jeon G 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 160701 (in Chinese) [李红, 吴炜, 杨

- 晓敏, 严斌宇, 刘凯, Gwanggil Jeon 2016 物理学报 **65** 160701]
- [2] Bi G L, Xu Z J, Zhao J, Sun Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 100701 (in Chinese) [毕国玲, 续志军, 赵建, 孙强 2015 物理学报 **64** 100701]
- [3] He K M, Sun J, Tang X O 2013 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **35** 1397
- [4] Gianini G, Manenti A, Rizzi A 2014 *J. Opt. Soc. Am. A* **31** 2663
- [5] Gianini G, Rizzi A, Damiani E 2016 *Inf. Sci.* **327** 149
- [6] Mccann J J, Parraman C, Rizzi A 2014 *Front. Psychol.* **5** 1
- [7] Wang Y F, Wang H Y, Yin C L, Dai M 2016 *Neurocomputing* **177** 373
- [8] Jobson D J, Rahman Z U, Woodell G A 1997 *IEEE Trans. Image Process* **6** 965
- [9] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A 1997 *IEEE Trans. Image Process* **6** 451
- [10] Rodieck R W 1965 *Vision Res.* **5** 583
- [11] Li C Y, Xing P, Zhou Y X 1991 *Vision Res.* **31** 1529
- [12] Solomon S G, White A J, Martin P R 2002 *J. Neurosci.* **22** 338
- [13] Nolt M J, Kumbhani R D, Palmer L A 2004 *J. Neurophysiol.* **92** 1708
- [14] Xu Z L 2012 *M. S. Thesis* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [许子龙 2012 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [15] Ahn H, Keum B, Kim D, Lee H S 2013 *IEEE Int. Conf. Consum. Electron* **2013** p153
- [16] Zhang E H, Yang H Y, Xu M P 2015 *Appl. Math. Inf. Sci.* **9** 411
- [17] Jang I S, Lee T H, Ha H G, Ha Y H 2010 *International Symposium on Optomechatronic Technologies* Toronto, Canada, October 25–27, 2010 p1
- [18] Wang Y, Yang J, Wang L D, Duan S K 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 237303 (in Chinese) [王颜, 杨玖, 王丽丹, 段书凯 2015 物理学报 **64** 237303]
- [19] Wang L D, Drakakis E, Duan S K, He P F, Liao X F 2012 *Int. J. Bifur. Chaos* **22** 1250205
- [20] Hu X F, Duan S K, Wang L D, Liao X F 2011 *Sci. China: Inf. Sci.* **41** 500 (in Chinese) [胡小方, 段书凯, 王丽丹, 廖晓峰 2011 中国科学: 信息科学 **41** 500]
- [21] Duan S K, Hu X F, Dong Z K, Wang L, Mazumder P 2014 *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst* **26** 1202
- [22] Wang L D, Li H F, Duan S K, Huang T W, Wang H M 2015 *Neurocomputing* **171** 23
- [23] Aгаian S S, Silver B, Panetta K A 2007 *IEEE Trans. Image Process* **16** 741
- [24] Aгаian S S, Lentz K P, Grigoryan A M 2000 *IASTED International Conference on Signal Processing & Communication* Marbella, Spain, September 19–22, 2000

An adaptive three-Gauss model based on memristive cross array and its application in image enhancement*

Liu Qi Wang Li-Dan[†] Duan Shu-Kai

(Chongqing Key Laboratory of Nonlinear Circuits and Intelligent Information Processing, School of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 11 January 2017; revised manuscript received 31 March 2017)

Abstract

In visual image processing, there is a three-Gauss model used to simulate the receptive field of retinal ganglion cells, which can realize image enhancement to a certain extent, such as image edge and information about details. However, in dealing with a large number of image data, it is necessary to manually adjust the parameters of the three-Gauss model in order to achieve better results, which is a very tedious and time-consuming process. According to this, in this paper we propose an adaptive three-Gauss model based on memristive cross array. Memristor, whose resistance is controlled by size, polarity and power supply time of the power supply, is a kind of non-volatile component. Moreover, if the voltage applied to both ends of memristor is removed, it can still keep the resistance value when the power is off. Many studies show that when voltage pulses with the different amplitudes and the same width are applied to both ends of the memristor, the resistance will change continuously. This principle is adopted to realize image storage. Therefore, it makes use of the characteristics of memristor in this paper. The proposed model is based on the traditional three-Gauss model and changes the model parameters by using the dynamic characteristics of memristive cross array according to the local characteristics of the image to be processed, in order to achieve the purpose of local optimization and make the whole image obtain better enhancement effect. First of all, according to the local brightness information of the image, the polarity and the width of the pulse voltage required by the memristor are determined. Then, the values of the model parameters corresponding to the memristance can be obtained. Finally, the local enhancement template will be available to realize the enhancement. In this paper, the color and gray images are selected. The qualitative and quantitative experimental results show that the proposed adaptive three-Gauss model based on memristive cross array can not only effectively enhance the edge contour of the image, but also greatly improve the image contrast and clarity. Moreover, it provides a new direction for the application of memristor to image processing.

Keywords: adaptive, three-Gaussian model, memristive crossbar array, image enhancement

PACS: 73.40.Rw, 84.30.Bv, 84.32.-y, 85.35.-p

DOI: [10.7498/aps.66.127301](https://doi.org/10.7498/aps.66.127301)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61571372, 61672436, 61372139), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant Nos. XDJK2016A001, XDJK2014A009), and the Program for New Century Excellent Talents in University, China (Grant No. [2013]47).

[†] Corresponding author. E-mail: ldwang@swu.edu.cn