

# 一种适用于 SAR 图像的 2 维 Otsu 改进算法

朱 俊 王世唏 计科峰 栗 毅

(国防科技大学电子科学与工程学院,长沙 410073)

**摘 要** Otsu 法是图像阈值分割中的经典算法之一,在图像处理中得到广泛的应用。针对原始 2 维 Otsu 法直方图区域划分上的缺陷和运算速度慢的缺点,分析了适用于 SAR 图像相干斑乘性噪声的直方图区域划分方法,提出了一种更符合实际图像模型的阈值选取准则。实验结果表明,该改进算法的分割效果良好,运算速度也有很大提高。

**关键词** 阈值分割 Otsu 法 2 维直方图 最大类间方差 合成孔径雷达(SAR)

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)01-0014-05

## Improved 2D Otsu Algorithm for SAR Images

ZHU Jun, WANG Shi-xi, JI Ke-feng, SU Yi

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** As one of the classic threshold methods for image segmentation, Otsu algorithm has been widely applied in image processing. Based on the analysis of the original 2D Otsu which has the disadvantages such as histogram area partition and time consuming, this paper introduces a new method of area partition in terms of speckle noise in SAR images, and brings forward a new rule of threshold selection which fits the image model better. The experiments show that the segmentation effect of the improved algorithm is better and its computational speed has been greatly improved.

**Keywords** threshold segmentation, Otsu algorithm, 2D histogram, maximum between-class variance, SAR

## 1 引 言

图像分割是将一幅图像分割成若干个区域的集合,区域之间互不交叠,且每个区域内部的像素之间都具有某些一致性和相似性。图像分割是图像处理中的重要步骤,目标检测、特征提取、目标识别等很多应用,都依赖于图像分割的质量<sup>[1-2]</sup>。阈值法是图像分割中的一大类常用方法,其直观性和易实现性使它在图像分割中得到了广泛应用。阈值法利用图像中目标与背景在灰度特性上的差异,通过选取合适的灰度阈值来分割图像。目前已有几十种阈值选取算法,比较经典的算法有:双峰法、Otsu 法、最大熵法、最小错误法等<sup>[3]</sup>。

Otsu 方法利用图像的 1 维灰度直方图,以目标和背景的类间方差最大为阈值选取准则,所以又称最大类间方差法<sup>[4]</sup>。Otsu 法在图像质量较好的情况下,可以取得令人满意的效果。但当图像的噪声较强时,由于该方法仅仅考虑了像素自身灰度,而没有考虑周围像素,即没有充分利用像素间的相关性和统计信息,因此噪声的存在会极大地影响分割效果。针对这一问题,有人在原 1 维 Otsu 法的基础上提出了 2 维 Otsu 法<sup>[5-6]</sup>,该方法以像素灰度和邻域均值组合的 2 维向量表示 2 维直方图,既考虑了像素自身灰度信息,也考虑了像素的邻域空间灰度信息,抗噪性有了很大增强。该方法的缺点是计算量以指数快速增长,因此又有人对 2 维直方图提出了不同的区域划分方法和阈值选取准则<sup>[7-9]</sup>,以降低 2

基金项目:武器装备预研重点基金项目(9140A03010407KG0113)

收稿日期:2007-10-31;改回日期:2008-03-14

第一作者简介:朱俊(1984 ~ ),男,现为国防科技大学遥感信息处理专业硕士研究生。主要研究方向为 SAR 图像处理。E-mail:zhujun tenny@gmail.com

维 Otsu 法的计算量。

上述几种 2 维 Otsu 法考虑的都是加性噪声模型,并不符合 SAR 图像相干斑的乘性噪声模型。有鉴于此,提出了一种适用于 SAR 图像的 2 维 Otsu 改进算法。该算法在分析叠加乘性噪声的 2 维直方图特点的基础上,建立新的适用于相干斑乘性噪声的直方图区域划分方法,然后提出一种更符合实际图像模型的阈值选取准则,最后通过实验加以验证。实验结果表明,该改进算法的分割效果优于原始算法,运算速度也有很大提高。

## 2 2 维 Otsu 法

### 2.1 原始的 2 维 Otsu 法

设一幅灰度级为  $L$  的图像,在像素点  $(x_0, y_0)$  处的灰度值为  $f(x_0, y_0)$ ,该点周围  $N \times N$  邻域的平均灰度值为  $g(x_0, y_0)$ 。设满足  $f=i$  和  $g=j$  的像素个数为  $h(i, j)$ ,并将  $h(i, j)$  归一化到灰度值表示范围内,由此得到 2 维直方图图像  $H(f, g)$ ,如图 1(a) 所示。

若图像像素总数为  $M$ ,则点  $(i, j)$  处的 2 维联合概率密度为

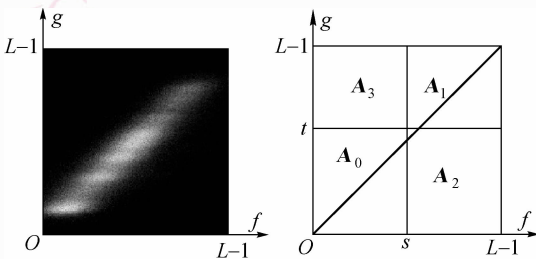
$$p_{ij} = p(i, j) = \frac{h(i, j)}{M} \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} h(i, j) = M, \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{ij} = 1。$$

2 维直方图的均值向量为

$$\boldsymbol{\mu} = [\mu_i, \mu_j] = \left[ \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} ip_{ij}, \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} jp_{ij} \right] \quad (2)$$

给定 2 维阈值向量  $[s, t]$ ,用正交直线对  $f=s, g=t$  即可将 2 维直方图分割成 4 部分,对角线附近的区域  $A_0$  和区域  $A_1$  分别对应于背景和目标(或目标和背景),远离对角线的区域  $A_2$  和区域  $A_3$  对应于边缘和噪声<sup>[5]</sup>,如图 1(b) 所示。



(a) 2 维直方图图像 (b) 正交直线对分割

图 1 原始的 2 维 Otsu 法  
Fig.1 The original 2D Otsu

区域  $A_0$  和区域  $A_1$  的出现概率  $\omega_{0,1}$  及均值向量  $\boldsymbol{\mu}_{0,1}$  分别为

$$\omega_0 = \sum_{A_0} p_{ij} = \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} p_{ij} \quad (3)$$

$$\omega_1 = \sum_{A_1} p_{ij} = \sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} p_{ij}$$

$$\boldsymbol{\mu}_0 = [\mu_{0i}, \mu_{0j}] = \left[ \sum_{A_0} ip_{ij}/\omega_0, \sum_{A_0} jp_{ij}/\omega_0 \right] \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\mu}_1 = [\mu_{1i}, \mu_{1j}] = \left[ \sum_{A_1} ip_{ij}/\omega_1, \sum_{A_1} jp_{ij}/\omega_1 \right]$$

原始的 2 维 Otsu 法假设图 1(b) 中区域  $A_2$  和区域  $A_3$  上所有概率都忽略不计,即满足  $\omega_0 + \omega_1 \approx 1$ ,将类间方差  $BCV$  定义为

$$BCV = \omega_0(\boldsymbol{\mu}_0 - \boldsymbol{\mu})(\boldsymbol{\mu}_0 - \boldsymbol{\mu})^T + \omega_1(\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu})(\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu})^T \quad (5)$$

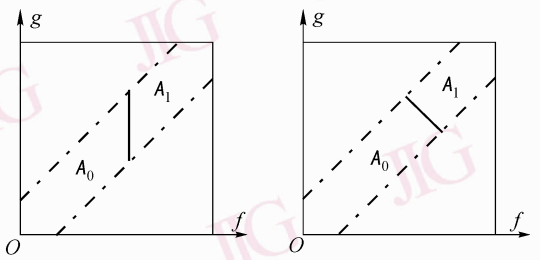
最佳阈值即为  $BCV$  取最大值时所对应的 2 维阈值向量

$$[s_0, t_0] = \arg \max_{\substack{1 \leq s \leq L-1 \\ 1 \leq t \leq L-1}} \{BCV\} \quad (6)$$

### 2.2 1 维阈值选取准则

原始的 2 维 Otsu 法假设图 1(b) 中区域  $A_2$  和区域  $A_3$  上所有概率都忽略不计,但实际上由图 1(a) 的 2 维直方图可以看出,区域  $A_2$  和区域  $A_3$  在靠近对角线的小分子区域内仍有不少  $p_{ij} \neq 0$  的亮点。计算时将这此点全忽略,会影响分割结果,而如果考虑这些点,则会增加计算量。

由图 1(a) 可以看出,2 维直方图的亮点几乎都分布在对角线附近的一个条带内,文献[7]、[8]基于这种条带分布特点提出了 1 维阈值选取准则:先确定一条等宽条带,再用一直线作为阈值向量对条带进行分割,分割后的两部分区域  $A_0$  和区域  $A_1$  即分别对应背景和背景。



(a) 垂直直线分割 (b) -45° 直线分割

图 2 文献[7]、[8]的 2 维直方图分割

Fig.2 2D histogram partition in Reference[7]&[8]

文献[7]以  $f=s$  的垂直直线分割,如图 2(a) 所示;而文献[8]以  $f=(s+t)-g$  的  $-45^\circ$  直线分割,

如图 2(b) 所示。条带之外的广大黑色区域(对应于  $p_{ij} \approx 0$ ) 不需要再考虑, 从而缩小了区域的计算范围, 而且这两种算法中的阈值从原来的 2 维向量  $[s, t]$  降为 1 维向量  $s$  (文献[8]中的  $(s+t)$  可看作一个整体  $s$ ), 因此极大地降低了 2 维 Otsu 法的运算量。

### 3 2 维 Otsu 改进算法

#### 3.1 叠加乘性噪声的 2 维直方图特点分析

显然, 当图像没有任何噪声干扰时, 在目标和背景内部的像素之间相关性很强, 邻域均值和像素灰度应该满足  $g \approx f$ , 即  $p_{ij} \neq 0$  的亮点几乎都分布在 2 维直方图图像  $H(f, g)$  对角线附近的一个等宽条带  $g \leq f + c$  和  $g \geq f - c$  内 ( $c \geq 0$ ), 图 3(a) 给出了 Lena 图 (图像处理中的标准测试图) 的 2 维直方图图像。邻域尺寸  $N$  越大, 亮点分布越散, 条带越宽,  $c$  越大; 反之, 亮点分布越密,  $c$  越小。当  $N=1$  时  $g=f$ , 亮点都分布在对角线上 (此时  $c=0$ )。图 3(a) 中邻域尺寸取  $N=5$ 。

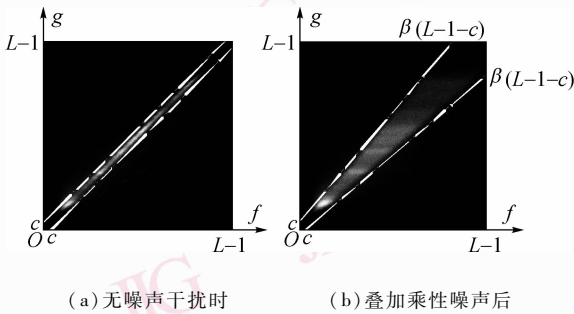


图 3 2 维直方图图像 (Lena 图)  
Fig. 3 2D histogram image

当图像叠加乘性噪声 (均值为 1, 方差为  $\sigma^2$ ) 后, 由统计理论, 正态分布下  $[-3\sigma, +3\sigma]$  的范围内已覆盖足够多 (99%) 数据,  $f$  的波动范围可认为是  $(1 \pm 3\sigma)f$ , 则对角线条带相应地扩大为

$$\begin{aligned} g &\leq (1 + 3\sigma)f + c \\ g &\geq (1 - 3\sigma)f - c \end{aligned} \quad (7)$$

令  $\alpha = 1 + 3\sigma > 1, \beta = 1 - 3\sigma < 1$ , 有  $\alpha < 1/\beta$ 。为方便对角线对称计算进行如下变换:

$$\begin{aligned} g &\leq \alpha f + c \leq \frac{f}{\beta} + c \\ g &\geq \beta f - c \approx \beta(f - c) \end{aligned} \quad (8)$$

所以条带扩大为  $g \leq f/\beta + c$  和  $g \geq \beta(f - c)$  ( $c \geq 0$ ), 即变为一条开口前小后大的非等宽条带, 如图 3(b)

所示。乘性噪声越严重,  $\beta$  越小, 条带后端开口就越大。图 3(b) 中邻域尺寸仍然取  $N=5$ , 乘性噪声方差取  $\sigma^2 = 0.01$ 。

#### 3.2 改进的 1 维阈值选取准则

由统计理论, 若随机变量的方差为  $\sigma^2$ , 则  $N^2$  个独立同分布的随机变量进行平均处理后方差降为  $\sigma^2/N^2$ 。图像邻域均值的方差比单点灰度值的方差小, 即邻域均值受噪声的影响相对较小, 所以邻域均值比单点灰度值稳定, 且邻域尺寸  $N$  越大, 均值越稳定。从而可以认为, 在邻域均值基本不变的情况下, 单点灰度值因噪声干扰而波动。

从图 1(a) 和图 3(b) 中可以看出, 2 维直方图具有水平方向的纹理。而图中像素灰度  $f$  为水平横轴, 正是由于单点灰度值在噪声干扰下左右波动导致亮点在水平方向上扩散, 从而产生水平方向的纹理。由此可见, 与图 2 中的垂直直线分割和  $-45^\circ$  直线分割相比, 对 2 维直方图以  $g=t$  的水平直线进行分割, 更符合 2 维直方图的实际图像模型, 如图 4 所示。

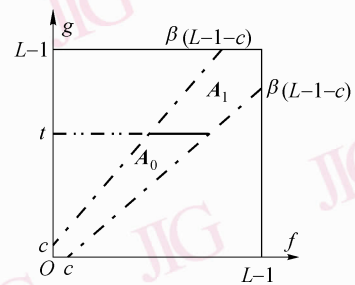


图 4 水平直线分割 2 维直方图  
Fig. 4 2D histogram partition by horizontal line

#### 3.3 改进分割算法流程

改进分割算法流程如图 5 所示。



图 5 2 维 Otsu 改进算法流程  
Fig. 5 The improved 2D Otsu procedure

实际图像处理中噪声方差  $\sigma^2$  是未知的,不能直接用  $\beta=1-3\sigma$  计算,确定条带参数  $c$  和  $\beta$  的步骤如下:

(1) 由于  $c$  与  $N$  成正比,且  $N=1$  时  $c=0$ ,可用邻域个数  $N^2$  估计条带截距宽度  $2c+1$ ,即先估计  $c = \frac{(N^2-1)}{2}$ ;

(2) 由于  $\beta$  越小,条带包含区域越大,可根据已确定的  $c$ ,从  $\beta=1$  开始计算条带内所包含的像素比例  $(\omega_0 + \omega_1)$ ,若比例较小,则减小  $\beta$  重新计算,直到条带内包含足够多像素(满足  $\omega_0 + \omega_1 \approx 1$ )。

### 3.4 算法复杂度分析

根据式(3)和式(4),可以利用2维直方图中区域  $A_0$  和区域  $A_1$  的面积来估计其累加运算量。

在图1所示的原始算法中,对于给定的阈值向量  $[s, t]$ ,需要作  $st + (L-s)(L-t)$  次累加运算,若遍历整个2维直方图  $H(f, g)$ ,则总累加运算次数为

$$N_1 = \sum_{s=1}^{L-1} \sum_{t=1}^{L-1} [st + (L-s)(L-t)] \quad (9)$$

当  $L=256$  时,  $N_1 = 2.13 \times 10^9$ 。

在图4所示的改进算法中,对于给定的阈值  $g = t$ ,需要作  $L^2 - \beta(L-c)^2$  次累加运算,即非等宽对角线条带的面积,则总累加运算次数为

$$N_2 = \sum_{t=1}^{L-1} [L^2 - \beta(L-c)^2] \quad (10)$$

式中  $c$  和  $\beta$  的取值与噪声干扰情况和邻域尺寸  $N$  有关。由于将式(9)的2维循环降为式(10)的1维循环求解,所以运算量极大地降低。

## 4 实验结果及分析

为检验本文改进算法的性能,分别采用原始1维Otsu法、原始2维Otsu法和本文改进算法对一幅实际SAR图像进行分割实验。实验SAR图像为某地试车场的局部图( $320 \times 160$ 大小),图上有6个待分割的车辆目标,如图6(a)所示。

图6(b)是原始1维Otsu法的分割结果,求得分割阈值为  $T=84$ 。可以看出,由于相干斑噪声的严重影响,分割效果极差,6个目标没有一个被分割出来。

图6(c)是原始2维Otsu法的分割结果,邻域尺寸取  $N=7$ ,求得分割阈值  $f=120, g=104$ 。此阈值下  $\omega_0 + \omega_1 \approx 99.5\%$ ,忽略的0.5%像素根据邻域优势点确定类别,即通过比较该点邻域中区域  $A_0$  和区域  $A_1$  的点数目,将该点分类到数目占优的区域中去。可以看出,6个车辆目标虽然都被成功分割出来,但错分点比较多,表现为黑色背景中的白色非目标杂点。

图6(d)是本文改进算法的分割结果,邻域尺寸取  $N=7$ ,得  $c=24$ ,若要求条带中包含98%的像素,计算可得  $\beta=0.60$ ,最终求得分割阈值  $g=126$ ,忽略的2%像素仍然根据邻域优势点确定类别。从实验结果可以看出,6个车辆目标都被成功分割出来,而且黑色背景也很干净,几乎没有错分的白色杂点。

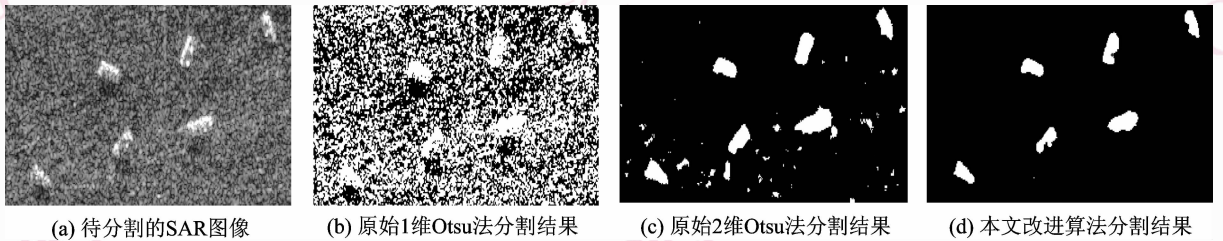


图6 各Otsu算法的分割结果比较

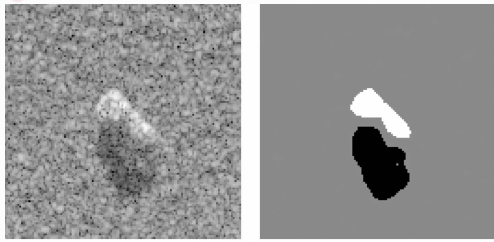
Fig. 6 Segmentation result of Otsu algorithms for comparison

比较各算法的分割结果,原始2维Otsu法和本文改进算法都明显优于原始1维Otsu法,且本文改进算法比原始2维Otsu法效果更好。运算时间相比,将  $c=24$  和  $\beta=0.60$  代入式(10),得  $N_2 = 8.48 \times 10^6$ ,所以理论上  $N_2 \approx 0.40\% N_1$ 。但由于本文改进算法主要是在求最佳阈值的步骤节省了时间,其他

步骤(如求均值图像和计算2维直方图等)与原始2维Otsu法基本相同,因此实际运算时间的比例要大于上述理论值。在相同实验环境下5次测试的平均时间为原始2维Otsu法  $T_1 \approx 29.72$  s,本文改进算法  $T_2 \approx 0.53$  s,得  $T_2 \approx 1.78\% T_1$ 。另外由于本文改进算法并没有对累加计算公式(3)和式(4)做出

改动,所以针对原始算法的一些快速算法也适用于本文改进算法,如文献[10]中的“建立查找表”快速算法。

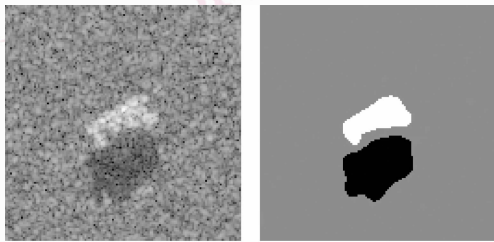
利用本文改进算法的思想,若选取多个分割阈值,很容易将算法扩展到多类分割。以 MSTAR 的两幅 SAR 图像切片(128 × 128 大小)为例,图 7(a)是 BMP2 型装甲车,图 8(a)是 T72 型坦克,图 7(b)和图 8(b)是对应的分割为目标、目标阴影、背景共 3 类的结果图。从实验结果可以看出,算法分割效果良好,有利于后续的目标识别等更深层次处理。



(a) MSTAR原图 (b) 分割结果图

图 7 BMP2 型装甲车

Fig. 7 BMP2 armored car



(a) MSTAR原图 (b) 分割结果图

图 8 T72 型坦克

Fig. 8 T72 tank

## 5 结 论

本文在原始 2 维 Otsu 法基础上,分析了叠加乘性噪声的 2 维直方图特点,建立了新的适用于 SAR 图像相干斑乘性噪声的直方图区域划分算法——非等宽条带划分法。该算法尽可能多地包含了直方图对角线附近的背景和目标点,减少了远离对角线的边缘和噪声点的影响,同时还极大地缩小了区域的计算范围。新提出的阈值选取准则以  $g = t$  的水平直线分割直方图,与其他阈值选取准则相比,该准则

更符合实际图像模型。实验结果表明,本文的改进算法是有效的,其分割效果优于原始算法,运算速度也有很大提高。

## 参考文献 (References)

- Gonzales R C, Woods R E. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 460-507.
- Zhang Y J. Image Processing and Analysis [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 1999: 179-215. [章毓晋著. 图像处理和分析(图象工程上册) [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 179-215.]
- Han S Q, Wang L. A survey of thresholding methods for image segmentation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24 (6): 91-94, 102. [韩思奇, 王蕾. 图像分割的阈值法综述 [J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24 (6): 91-94, 102.]
- Otsu N. A threshold selection method from Gray-Level histogram [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9 (1): 62-66.
- Liu J Z, Li W Q, Tian Y P. Automatic thresholding of gray-level pictures using two-dimensional Otsu method [A]. In: Proceedings of China 1991 International Conference on Circuits and Systems [C], Shenzhen, China, 1991: 325-327.
- Liu J Z, Li W Q. The automatic thresholding of gray-level pictures via 2D Otsu method [J]. Acta Automatica Sinica, 1993, 19 (1): 101-105. [刘健庄, 栗文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割法 [J]. 自动化学报, 1993, 19 (1): 101-105.]
- Lu R, Shen Y. Image Threshold segmentation method based on an improved 2-D histogram [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26 (10): 1487-1490. [芦荟, 沈毅. 一种改进的二维直方图的图像阈值分割方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26 (10): 1487-1490.]
- Hao Y M, Zhu F. Fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10 (4): 484-488. [郝颖明, 朱枫. 二维 Otsu 自适应阈值的快速算法 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10 (4): 484-488.]
- Liang G M, Liu D H, Li B, et al. Improvement of two-dimension adaptive thresholding segmentation algorithm for microscopic cellular images [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8 (7): 764-768. [梁光明, 刘东华, 李波等. 用于显微细胞图象的二维自适应阈值分割算法的优化 [J]. 中国图象图形学报(A 版), 2003, 8(A) (7): 764-768.]
- Wang H Y, Pan D L, Xia D S. A fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33 (9): 968-971. [汪海洋, 潘德炉, 夏德深. 二维 Otsu 自适应阈值选取算法的快速实现 [J]. 自动化学报, 2007, 33 (9): 968-971.]