

图像纹理的灰度共生矩阵计算问题的分析

薄 华, 马缚龙, 焦李成

(西安电子科技大学自动化系, 陕西西安 710071)

摘 要: 图像的灰度共生矩阵 (GLCM) 已被理论证明并且实验显示它在纹理分析中是一个很好的方法, 广泛用于将灰度值转化为纹理信息。然而, 由于 GLCM 是像素距离和角度的矩阵函数, 因此完整的 GLCM 的计算, 其参数的选取范围很广, 这样 GLCM 的计算量很大, 通常是不能这样用的。为了解决这个问题, 本文应用马尔可夫链的性质, 从理论上证明了 GLCM 的计算结果, 当像素距离足够大的时候趋于一致性。这样只需较少的参数值就可以完整的描述图像的纹理特征。最后, 通过对 Brodatz 纹理库中自然纹理图像和几幅 SAR 图像进行仿真, 仿真结果验证了上述结论。

关键词: 灰度共生矩阵 (GLCM); 纹理分析; 马尔可夫链; 合成孔径雷达 (SAR)

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 01-0155-04

Research on Computation of GLCM of Image Texture

BO Hua, MA Fu-long, JIAO Li-cheng

(Department of Automation, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM) has been proved to be a promising method for image texture analysis. However, the parameters in computing the GLCM of an image can be selected from a wide range, which results in a large amount of computation to be needed and makes it difficult to analyze the image textures. To simplify the computation of GLCM, we analyze the computation of GLCM by using Markov Chain property. We prove that GLCM is independent of distance and angle when distance is large enough. According to our analysis, the computation of GLCM is simplified by reducing the number of selected values of distance and angle. Finally, we give simulation results on natural texture images and SAR images to validate the theoretical analysis.

Key words: gray level co-occurrence matrix; texture analysis; markov chain; synthetic aperture radar

1 引言

纹理特征是一种不依赖于颜色或亮度而反映图像中同质现象的视觉特征^[9], 它是物体表面共有的内在特性。纹理特征包含了物体表面结构组织排列的重要信息以及它们与周围环境的联系^[10]。因此, 纹理特征在图像检索和图像分类中得到了广泛的应用。合成孔径雷达 (SAR) 由于其全天候观测和高分辨率的特点已经成为当前遥感观测的重要手段, 在资源、环境、考古以及军事等方面得到了广泛的应用。SAR 图像不仅有丰富的纹理信息, 而且由于 SAR 图像缺乏空间信息, 纹理对 SAR 图像分类提供了最好的特征, 因此对 SAR 的纹理分析也一直是人们关注的问题。

图像的灰度共生矩阵 (GLCM) 已被理论证明并且实验显示它在纹理确定上是一个很好的方法, 广泛用于将灰度值转化为纹理信息。GLCM 的概念是在 1973 年由 Haral-

ick 提出的, 它描述了在角度 θ 方向上相距 s 的两个像素, 其灰度分别为 i 和 j 的频率相关矩阵 $p_{ij}(s, \theta)$ ^[6]。的选择为 4 个离散的方向: $0^\circ; 45^\circ; 90^\circ; 135^\circ$ ^[6, 7, 8], 而 s 则是 $1 \sim size(image)$ 。但通常不同的作者对 θ 和 s 的有不同的选取方式, 比较常见的, s 选为 $s = \{0, 4, 8, \dots, 32\}$ ^[8] 或者只选择 $s = 1$ ^[7]。而这样的选择没有理论支持, 因此是否可以完整的描述纹理的特征也不得而知。而如果选择所有的值, 那么巨大的计算量给纹理分析带来了困难。

马尔可夫随机场 (MRF) 可以对图像进行建模和解释^[11]。一幅图像如果满足马尔可夫性质, 那么就可以用马尔可夫随机场来描述, 它表达了图像数据的空间概率分布是和点的位置没有关系的。在文献 [4] 中, 作者证明了 MRF 模型可用于描述很广范围的图像, 包括 SAR 图像。

本文应用马尔可夫随机场的性质, 从理论上证明了 GLCM 的计算并不需要选取所有的参数, 同样可以完整的

描述图像的纹理特征.并且对 Brodatz纹理库中的自然纹理和几幅 SAR 图像进行仿真,验证了上述结论.这样, GLCM 的简化计算得到支持,从理论上保证纹理计算的完整性和简约性,这对于纹理的分析是非常有用的.

2 GLCM 计算的理论分析

在文献 [1] 中, J A Modestino 和 Zhang 提出了用马尔可夫随机场模型对图像进行建模和解释的方法,文献 [2] 也用隐马尔可夫模型进行图像元素间空间概率关系的建模.一幅图像如果满足性质: $f(s|L(s)) = f(s|N_s)$ (Markov 性), 其中 $L(s)$ 是除点外所有像点的集合, N_s 是点 s 的邻域, 那么该图像灰度的空间分布可以用 Markov 随机场模型来描述.它表达了图像数据的空间概率分布是和点的位置没有关系的.也可以理解为某个像素只与邻域的像素相关, 而与邻域以外的像素相关性很小, 在计算时可以忽略.

在计算 GLCM 时, 角度通常选择为 $\theta = \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$, 对于每个固定的值, Markov 随机场都可以简化为一阶的马尔可夫过程, 即马尔可夫链. 马尔可夫链的定义是: 如果 $\{X_t, t=1, 2, \dots\}$ 是马尔可夫链, 那么随机变量 X_t 满足马尔可夫性质:

$$P_{ij} = P(X_{t+1} = j | X_t = i, X_{t-1} = i_{t-1}, \dots, X_1 = i_1) = P(X_{t+1} = j | X_t = i) \quad (1)$$

根据性质 $P(AB) = P(A|B)P(B)$, 可以得到:

$$P(X_1 X_2 \dots X_k) = P(X_k | X_1 X_2 \dots X_{k-1}) P(X_1 X_2 \dots X_{k-1}) = P(X_k | X_{k-1}) P(X_1 X_2 \dots X_{k-1}) = P(X_1) \prod_{i=1}^{k-1} P(X_{i+1} | X_i) \quad (2)$$

将角度 $\theta = 0^\circ$, 像素相距 $s = n - 1$ 的共生矩阵元素 $P_{ij}(s)$ 表示为 $P(X_1 = i, X_n = j)$. 那么,

$$P(X_1 = i, X_n = j) = P(X_1 = i) P(X_n = j | X_1 = i) = P(X_1 = i) \prod_k P(X_n = j | X_{n-1} = k) P(X_{n-1} = k) = P(X_1 = i) \prod_k P(X_n = j | X_{n-1} = k, X_1 = i) P(X_{n-1} = k)$$

应用马尔可夫链的性质:

$$P(X_n = j | X_{n-1} = k, X_1 = i) = P(X_n = j | X_{n-1} = k)$$

这样, 我们可以得到:

$$P(X_1 = i, X_n = j) = P(X_1 = i) \prod_k P(X_n = j | X_{n-1} = k) \times P(X_{n-1} = k) = P(X_1 = i) P(X_n = j) \quad (3)$$

对于纹理一致的图像来说, $P(X_n = j)$ 的值与 n 无关, 是近似相等的, 因此从理论上讲, 对于任意的 n , $P(X_1 = i, X_n = j)$ 也是近似相等的. 然而, 马尔可夫随机场描述的邻域的概念并不是指紧邻的区域, 二维图像的邻域系统 $N^o = \{N_s^o, s \in S\}$ 的定义是: $N_s^o = \{r \in S: 0 < |s - r|^2 \leq o\}$, 这里 r 是指 s 的邻域像素, $|s - r|$ 是两点之间的欧几里得距离, 邻域由邻域的阶数 o 定义. 下面我们给出邻域分别为 1, 2 和 8 的图.

从图 1 我们可以看到, 邻域的范围不只局限于周围紧邻的点, 距离为 8, 相距为 2 个像素的点仍然有相关性.

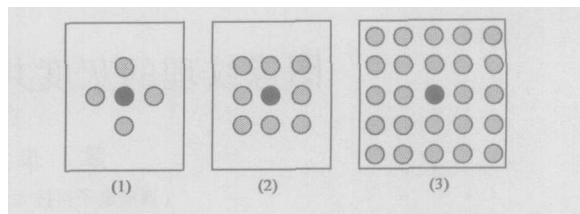


图 1 邻域: 其中 $\bullet = s$, $\circ = r$; (1) 一阶邻域 $O = 1$; (2) 二阶邻域 $O = 2$; (3) 八阶邻域 $O = 8$

随着邻域阶数的增大, 即像素间距增大, 其间的相关性会减小. 因此, 对公式 (3) 的说明应该是当大于某个值的时候才是成立的, 而当较小时, 其 GLCM 的计算结果是随或变化的.

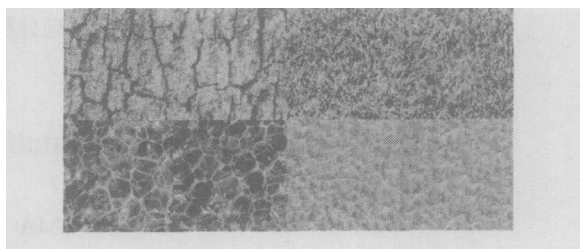


图 2 Brodatz 图库中的自然纹理图像. 从左到右, 第一行分别是树皮 (1, 2) 和草 (1, 2), 第二行分别是气泡 (1, 2) 和猪皮 (1, 2)

同时, 既然邻域是一个四周的概念, 因此对于 θ 取任意的值, 比如 $\theta = 45^\circ$, 仍然可以根据随机场的概念简化为一阶马尔可夫链, 得到与式 (3) 相同的证明结果. 因此, 可以认为从式 (3) 得到的结论是与 θ 的取值无关的.

下面通过仿真实验验证上述结论.

3 Brodatz 纹理库图像的纹理计算仿真实验

由于 GLCM 的计算结果是一个很大的矩阵, 不易进行比较, 通常是将 GLCM 矩阵之间的比较简化为一些数值的比较, 而保留共生矩阵的特征. 文献 [5] 提供由共生矩阵产生的 6 个常用的纹理特征值: 对比度: $Con = \sum_{i,j} |i - j|^2 P_{ij}$, 熵: $Ent = - \sum_{i,j} P_{ij} \times \log P_{ij}$, 角度的二次力矩或能量: $Asm = \sum_{i,j} (P_{ij})^2$, 均等性: $Ham = \sum_{i,j} P_{ij} / [1 + (i - j)^2]$, 不相似性: $Dis = \sum_{i,j} |i - j| P_{ij}$, 相关性: $Cor = \{ \sum_{i,j} (i - \mu_x) (j - \mu_y) \times P_{ij} \} / (\sigma_x \sigma_y)$.

首先提供 Brodatz 纹理库中的 4 幅图像, 大小为 640×640 , 分别分割生成 8 幅纹理图, 图像大小为 256×256 , 如下图所示. 相似的纹理应有相似的计算结果, 不同的纹理计算结果有应差异.

下面分别计算像素距离为 s 的 6 个特征值, 计算结果如图 3 所示:

上面的结果显示, 当 s 较小, 即像素距离较近时, GLCM 的计算结果是随着 s 的增大迅速变化的; 当 s 较大时, 计算结果趋于稳定. 这和我们上面证明的结论是一致的.

为了验证公式 (3) 的结论是与方向无关的, 下面给出

像素距离为 $s = 1 \sim 80$, $\theta = 45^\circ$ 的 6 个特征值的计算结果,如图 4 所示.

图 4 显示的仿真结果验证了上文的理论分析和证明的结论是正确的.

4 特征参数的分析和选择

从上面的仿真结果还可以看到,上面的 6 特征参数之间有一致性,即有冗余性的,因此特征值的计算可以有选择的进行,而不需要计算全部.

首先是对比度 Con 、一致性 Ham 和不相似性 Dis 一幅图像,如果其对比度大,那么其不一致性就大,且不相似性就小,这三个特征是一个等价关系,因此这三个参数就是有冗余的.为了区分具有不同的纹理的两幅图像,当有相同的空间矩阵差 p_{ij} 时,纹理计算结果的差应该满足 $\max\{Con, Ham, Dis\}$. 根据公式 $Con = \sum_{i,j} (i-j)^2 p_{ij}$, $Ham = \sum_{i,j} p_{ij} / [1 + (i-j)^2]$ 和 $Dis = \sum_{i,j} |i-j| p_{ij}$, 可以得到: $Con > Dis > Ham$, 从仿真结果图 3 和 4 我们也可以得到这样的结论.因此在这三个参数中我们保留对比度 Con 作为特征参数.

其次,熵 Ent 和能量 Asm 也有相关性,从计算公式我们也可以看到它们的一致关系.同样,能量和熵的计算结果也要满足对于相同的 p_{ij} 有 $\max\{Asm, Ent\}$, 根据 $Asm = (\sum_{i,j} p_{ij})^2$ 和 $Ent = -\sum_{i,j} p_{ij} \times \log p_{ij}$, 且 $0 < p_{ij} < 1$, 可以得到 $Ent > Asm$. 因此我们选择熵作为特征参数. 仿真结果图 3 和 4 也显示同样的结果.

相关性的大小反映了图像纹理的细致程度,相关性小,说明是较大的纹理,相关性大,说明是较细致的纹理.

这样,我们从 6 个参数中选出 3 个分辨率最好且不相关的参数,分别是对比度 Con , 熵 Ent 和相关性 Cor

5 SAR 图像纹理的计算

SAR 图像被越来越多的应用在各个领域.由于 SAR 图像的纹理非常丰富,因此对 SAR 图像的纹理分析也越来

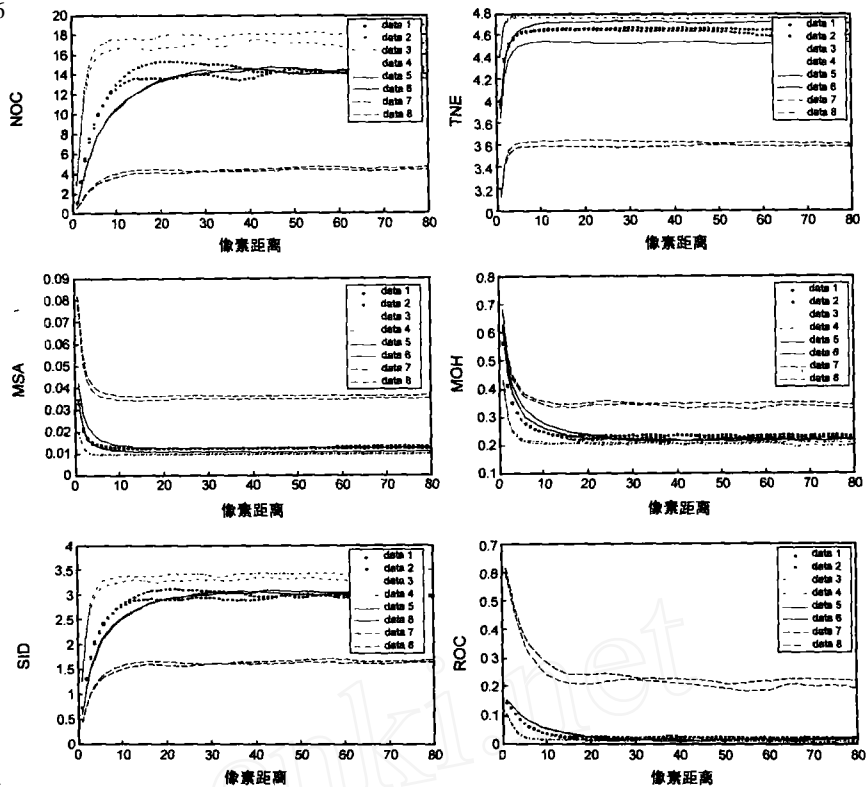


图 3 纹理特征值的计算结果 ($s = 1 \sim 80$, $\theta = 0^\circ$), 特征值按顺序分别为对比度, 熵, 能量, 均等性, 不相似性和相关性.

越受到大家的关注.

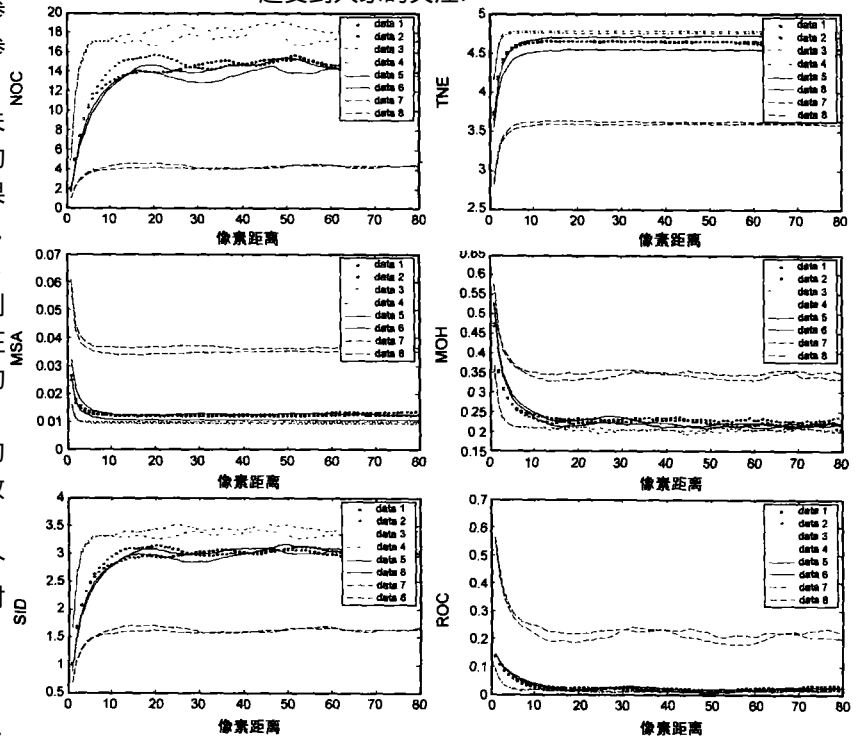


图 4 纹理特征值的计算结果 ($s = 1 \sim 80$, $\theta = 45^\circ$), 特征值按顺序分别为对比度, 熵, 能量, 均等性, 不相似性和相关性.

在文献 [3]中,作者认为 SAR 图像在大尺度上服从 K -分布,但 K -分布不能描述局部尺度上的空间特征,作者提出用马尔可夫随机场建立空间模型,用来描述纹理的如深度和方向等物理特征.用该方法在用于恢复图像中得到了很好的效果.在文献 [4]中作者证明了 MRF模型可用于描述很广范围的图像,包括 SAR 图像.这样, SAR 图像的 GLCM 的计算也符合公式 (3)的结果.

下面提供 8幅两两相似的 SAR 图像,图像大小为 312×256 .如图 5所示:



图 5 一幅 SAR 图像中的 4种纹理子图,上下两排两两相似,从左到右分别是机场跑道,建筑物群,树丛和田野

下面分别计算像素距离为 $s=1 \sim 80, =0$ 的 3个特征值,计算结果如图 6所示:

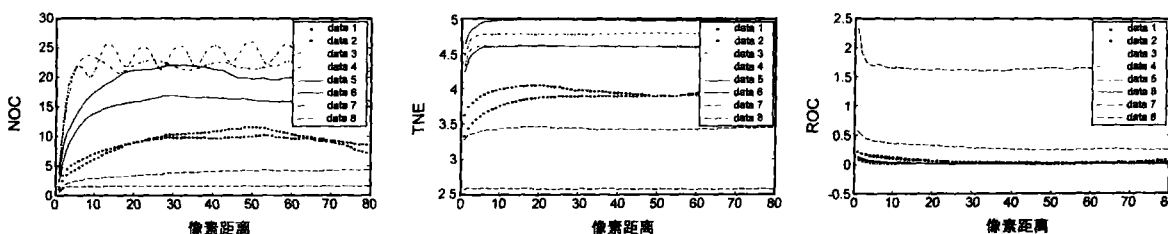


图 6 SAR 图像纹理特征值的计算结果 ($s=1 \sim 80, =0$),特征值分别为对比度,熵和相关性

如图 6所示的 SAR 图像的仿真结果,对于描述全局特征的参数,熵和相关性,当 s 较大时,近似为一个稳定值;对比度则呈现稳定的振荡.因此对于 SAR 图像的纹理特征的计算结果也是符合公式 (3)的结论:当像素距离足够大时,计算结果近似稳定.

6 结束语

对于 GLCM 中 $P_{ij}(s)$ 的计算, s 和 i 的取值在很多文献中都是由作者选取的,通常选取多个参数,也有的只选择其中之一,选择一个参数的通常都选取 $s=1, =0$.但是由于没有理论依据,不能保证结果的可信度.本文通过理论证明和仿真实验分析了纹理图像 GLCM 计算参数的选取.由于 SAR 图像也符合马尔可夫随机场分布的规律,因此,当 SAR 的纹理较均匀一致时,也可以用上述的结论.根据公式我们简化得到三个不相关且分辨能力最好的参数:对比度 Con ,熵 Ent 和相关性 Cor 这样,本文从理论上给出了纹理计算中参数的简化选择的依据,并验证了该方法在辨别同类纹理和异类纹理时的有效性,这对于纹理的分析计算是非常有意义的.

参考文献:

[1] J A Modestino, J Zhang A markov random field model based approach to image interpretation [J]. IEEE Tran On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14 (6): 606 - 615.
 [2] N Kamath, K Sunil Kumar, U B Desai Joint segmentation and image interpretation using hidden Markov models [A]. Proc of the Int Conf on Pattern Recognition [C]. Brisbane, Australia, 1998, 2: 1840 - 1842

[3] Belhadj Ziad, Bouhlej Nizar, Sevestre Ghalila Sylvie, Boussema Mohamed Rached Heterogeneous SAR Texture Characterization By Means Of Markov Random Fields[A]. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings (IGARSS 2000) [C]. Honolulu Hawaii, 2000, 2: 579 - 581.
 [4] Rupert D Paget Nonparametric Markov Random Field Models for Natural Texture Images[D]. The University of Queensland, 1999.
 [5] S C Liew, H L Lin, L K Kwoh, G K Tay Texture analysis of SAR images [A]. IEEE 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings (IGARSS 1995) [C]. Firenze, Italy, 1995, 2: 1412 - 1414

作者简介:



薄 华 女,博士研究生,1971年生于北京,西安电子科技大学副教授,研究方向为遥感图像处理、模式识别.
 E-mail: bohua@xidian.edu.cn

马缚龙 男,博士,1968年生于吉林省辽源市,现任飞利浦东亚实验室主任研究员,主要研究方向为数字图像处理、无线通信、数字电视.

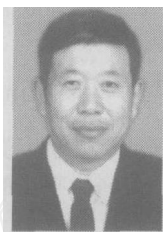
焦李成 男,博士,1959年生于西安,西安电子科技大学教授,博士生导师,主要研究方向为非线性理论、人工神经网络、子波理论与应用、进化算法、数据挖掘与多用户检测.

(下转第 134页)

- cations [J]. IEEE Trans Circuits&Systems-II, 1992, 39 (8): 516 - 523.
- [2] L A Singer, T L Brooks A 14bit 10MHz calibration-free CMOS pipelined A/D converter [A]. IEEE Symp VLSI Circuits Dig Tech Papers [C]. Honolulu, HI, USA: Widerkehr and Associates, Gaithersburg 1996 94 - 95.
- [3] L Singer, S Ho, M Timo, D Kelly A 12-b 65M samples/s CMOS pipelined ADC with 82dB SFDR at 120 MHz [A]. John H Wuorinen 2000 IEEE ISSCC Dig Tech Papers [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press 2000. 38 - 39.
- [4] D W Cline, P R Gray A power optimized 13bit 5M samples/s pipelined analog to digital converter in 1.2 μ m CMOS [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1996, 31 (3): 294 - 303.
- [5] W Yang, D Kelly, I Mehr, M Sayuk, L Singer A 3V 340mW 14b 75M sample/s CMOS ADC with 85dB SFDR at Nyquist input [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2001, 36 (12): 1931 - 1936.
- [6] R Lotfi, M Taherzadeh-Sani, O Shoaie A 12bit 40MSPS 3.3V 56mW pipelined A/D converter in 0.25 μ m CMOS [A]. Proceedings of 2004 IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004. 169 - 172.
- [7] P R Gray, P J Hurst, S H Lewis, T G Meyer Analysis and design of analog integrated circuits, 4th ed [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2001. 206 - 213.
- [8] D Shahrjerdi, B Hekmatshoar, M Talaie, O Shoaei A fast settling, high DC gain, low power OPAMP design for high resolution, high speed A/D converters [A]. Proceedings of the 15th International Conference on Microelectronics [C]. Cairo Egypt: Electronics and Communications Department Faculty of Engineering Cairo University, 2003. 207 - 210.

作者简介:

黄显洋 男, 1981年11月出生于山东即墨, 2003年毕业于天津大学电信学院微电子技术专业, 获工学学士学位, 现为天津大学 ASIC 设计中心硕士研究生, 主要研究方向为流水线模数转换器的设计。



李树荣 男, 1946年3月出生于河北盐山, 教授, 1970年毕业于天津大学电子工程系, 此后一直在天津大学电信学院从事微电子技术方面的教学和科研工作, 近期研究方向包括 SOI/SiGe/BC-MOS 集成电路研究, 光电负阻器件及光电子集成等, 先后发表论文 20 余篇。

(上接第 158 页)

- [6] Robert M Haralick, K Sharmugam, Its hak D instein Texture features for image classification [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1973, 3 (6): 610 - 621.
- [7] Dutra LV, R Huber Feature extraction and selection for ERS-1/2 InSAR classification [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20 (5): 993 - 1016.
- [8] Leen-Kiat Soh, Costas tsatsoulis Segmentation of satellite imagery of natural scenes using data mining [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37 (2): 1086 - 1099.
- [9] John R Smith, Shih-Fu Chang Automated binary texture feature sets for image retrieval [A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. Atlanta, GA, USA, 1996, 4: 2239 - 2242.
- [10] Robert M. Haralick K Sharmugam, Its'hak D instein Texture features for image classification [J]. IEEE Trans On Sys, Man, and Cyb, 1973, SMC-3 (6): 610 - 621.
- [11] Leen-Kiat Soh, Costas tsatsoulis Segmentation of satellite imagery of natural scenes using data mining [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37 (2): 1086 - 1099.