

基于 FPGA 的暗通道白平衡算法设计与实现 *

王超,甄国涌,单彦虎

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051)

摘要:为确保系统实时性以及解决完美反射法在曝光环境中失效的问题,提出一种基于FPGA的暗通道自动白平衡校正算法。通过彩色图像暗通道光线透射率分布情况,选取参考像素点实现偏色像素点自动白平衡校正。实验结果表明,暗通道自动白平衡算法使用FPGA校正可以满足整个系统的实时性要求和消除过度曝光环境影响;同时可以使其有效应用于动态场景中。

关键词:自动白平衡;暗通道;完美反射法;FPGA

中图分类号: TP274

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200824

中文引用格式: 王超,甄国涌,单彦虎. 基于FPGA的暗通道白平衡算法设计与实现[J]. 电子技术应用, 2021, 47(2): 77-80, 91.

英文引用格式: Wang Chao, Zhen Guoyong, Shan Yanhu. Design and implementation of dark channel white balance algorithm based on FPGA[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(2): 77-80, 91.

Design and implementation of dark channel white balance algorithm based on FPGA

Wang Chao, Zhen Guoyong, Shan Yanhu

(Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to ensure the real-time performance of the system and solve the problem that the perfect reflection method fails in the exposure environment, this paper proposes an FPGA-based dark channel automatic white balance correction algorithm. According to the light transmittance distribution of the dark channel of the color image, the reference pixels are selected to realize the automatic white balance correction of the color cast pixels. Experimental results show that the dark channel automatic white balance algorithm using FPGA correction can meet the real-time requirements of the entire system and eliminate the environmental impact of overexposure. At the same time, it can be effectively applied to dynamic scenes.

Key words: automatic white balance; dark channel; perfect reflection method; FPGA

0 引言

机器视觉技术的快速发展对图像处理速度以及精度提出了更高的技术要求,颜色作为人类生活最敏感的一部分,在不同的光源下,人眼的恒常性使人可以在不同光源下准确识别物体本身固有色彩^[1],但图像传感器服从的光线投射率模型使其采集到的物体本身固有颜色严重受到环境光源的影响^[2]。为消除其受环境光源的影响,实时校正偏色图像的自动白平衡算法成为图像处理的一种关键技术。

目前成熟的白平衡算法在部分平台以及部分场景中已经成功应用。暗通道灰度世界改进算法已经成功在图像处理芯片上验证,但是其处理时间仍需要 96 ms,无法满足高帧频图像采集系统需求^[3];灰度世界与完美反射组合而成的白平衡算法^[4]、基于边沿检测的白平衡算法^[5]、基于直方图白平衡算法^[6]以及暗通道加权算法^[7]

在FPGA设备上的实现需要对一帧图像进行统计、计算后再进行图像白平衡校正,大量RAM资源、多位宽乘法器以及除法器被应用,导致处理器资源分配面临挑战;灰度世界法(GWM)与完美反射法(PRM)由于其原理简单已经在FPGA中实现,但是在高分辨率以及过度曝光场景中,本身固有缺点限制其无法正常完成白平衡校正,限制了其使用环境。

因此,本文提出一种基于暗通道光线透射率的自动白平衡校正算法。该算法在FPGA上将图像采集与白平衡校正并行处理,确保数据采集实时性的同时完成当前图像偏色校正,完全可以应对场景中的物体移动。暗通道白平衡算法的实现可以满足色彩准确率以及系统实时性要求,为机器视觉中的移动物体检测与识别提供准确的色彩依据。

1 算法描述

算法首先将RGB图像转换为暗通道图像,根据全局光线透射率分布与暗通道值选取参考像素点作为完美

* 基金项目:山西省自然科学基金(201801D221200)

反射法计算增益因子的依据,最后使用增益因子实现偏色图像白平衡校正。

1.1 参考像素点选取

图像传感器拍摄的物体颜色 $f(x, y)$ 与其本身固有颜色 $s(x, y)$ 之间的光线透射成像模型^[8]如式(1)所示。

$$f(x, y) = t(x, y)s(x, y) + E(1 - t(x, y)) \quad (1)$$

其中: (x, y) 表示图像传感器中像素点坐标, $t(x, y)$ 表示图像中对应坐标点处光线透射率, E 表示全局光照强度, 对于一帧图像 E 为恒定常数, 定义如式(2)所示:

$$E = \frac{1}{W \times H} \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} \frac{R(x, y) + G(x, y) + B(x, y)}{3} \quad (2)$$

其中: W 、 H 分别表示图像传感器采集图像长度与宽度, $R(x, y)$ 、 $G(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 分别代表偏色图像中对应坐标点处三通道像素值。

图像中暗通道定义为 (x, y) 像素点处颜色三通道最小值, 如式(3)所示:

$$D(x, y) = \min_{c \in (R, G, B)} s^c(x, y) \quad (3)$$

其中: $D(x, y)$ 表示 (x, y) 像素点的暗通道像素, c 表示 R、G、B 颜色三通道集合。

根据已求得的暗通道像素和暗通道先验知识理论^[9]可得式(4):

$$S^{\text{dark}}(x, y) = \min_{(x, y) \in \Omega(x, y)} (D(x, y)) \approx 0 \quad (4)$$

其中: $S^{\text{dark}}(x, y)$ 表示 $D(x, y)$ 邻域中暗通道最小像素点, $\Omega(x, y)$ 表示像素与之相对应的邻域。相对于较小邻域, 光线透射率 $t(x, y)$ 为一个常数。根据暗通道理论式(3)、式(4)对式(1)进行两次最小值运算并整理, 如式(5)所示:

$$t(x, y) = 1 - \frac{f^{\text{dark}}(x, y)}{E} + \frac{S^{\text{dark}}(x, y)}{E} t(x, y) \quad (5)$$

其中: $f^{\text{dark}}(x, y)$ 表示 $f(x, y)$ 邻域中暗通道最小像素。根据式(4)可知式(5)第 3 项为 0, 光透射率化简如式(6)所示:

$$t(x, y) = 1 - \frac{f^{\text{dark}}(x, y)}{E} \quad (6)$$

由式(6)可知在所有颜色中白色(255, 255, 255)光线透射率最低, 因此图像中透射率最低的像素作为参考像素就可实现白平衡校正。实际拍摄过程中由于图像传感器过度曝光而产生的白色像素点会对图像中原有透射率分布产生影响, 因此白平衡参考像素点的光线透射率与暗通道同时满足条件即可排除过度曝光造成的影响, 如式(7)所示。

$$F(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & \begin{cases} t(x, y) < t_{\min} + \frac{t_{\max} - t_{\min}}{8} \\ f^{\text{dark}} < K \end{cases} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $F(x, y)$ 表示白平衡参考像素点, t_{\max} 表示全局最大光线透射率, t_{\min} 表示全局最小光线透射率, K 表示暗通

道阈值常数, 对多张图片进行统计最终选取最小误差以及最小平均误差阈值 230 作为 K ^[10]。

1.2 校正增益计算

白平衡参考像素点选取后, 根据 White Patch 假设^[11]使用白色区域中三通道各自最大值来计算偏色图像校正的增益因子, 但是为确保不受单一像素点的影响, 以参考像素点集合中各通道均值计算校正增益。如式(8)所示:

$$K^c = \frac{1}{\text{Mean}^c(x, y)} \quad (8)$$

其中: K^c 表示各个颜色通道校正增益因子, $\text{Mean}^c(x, y)$ 表示参考像素点集合的各通道平均值。

计算完成后的增益因子 K^c 可以根据 Von-Kries 矩阵模型^[12]进行偏色图像校正, 如式(9)所示:

$$f^b(x, y) = f^c(x, y) \times K^c, c \in (R, G, B) \quad (9)$$

其中: $f^b(x, y)$ 表示校正后的图像, $f^c(x, y)$ 表示偏色图像。

2 FPGA 设计实现

为满足系统的实时性偏色图像校正和白平衡增益因子计算, 在 FPGA 设计中采用并行流水化模块设计^[13], 将自动白平衡算法分为两个子结构模块进行设计: 偏色校正子模块与增益计算子模块。在偏色校正子模块中的图像数据通过一个乘法器即可完成偏色像素点的校正输出, 相比原始采集数据只有一个时钟延时, 可以忽略不计, 从而保证了自动白平衡系统的实时性。在增益计算子模块中, 以当前帧为参考计算的下一帧增益因子在图像结束后第三个时钟完成, 不会对偏色校正子模块的实时性产生任何影响并且可以满足高速图像数据流。

自动白平衡算法模块结构如图 1 所示, 图像数据在自动白平衡模块中分为两路并行数据, 一路在偏色校正子模块中根据计算出的增益因子对偏色像素点进行校正, 另一路在增益计算子模块中计算下一帧图像增益因子。

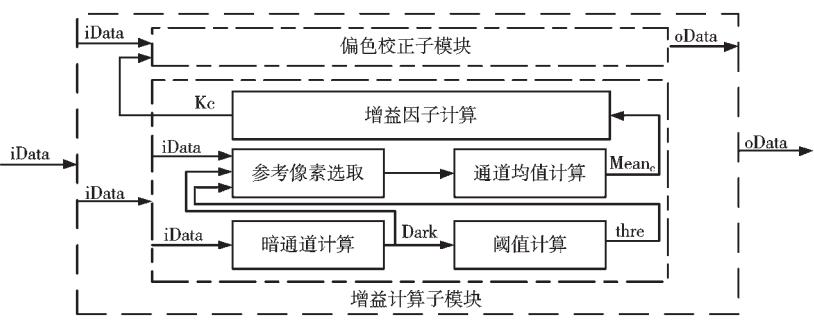


图 1 自动白平衡算法模块结构图

2.1 增益计算子模块

增益计算子模块分为 5 个功能模块: 暗通道计算、阈值计算、参考像素选取、通道均值计算和增益因子计算。在增益计算子模块中图像数据进一步被分为两路并行数据, 一路计算参考像素选取的阈值, 另一路根据阈值选取参考像素点进而计算下一帧图像的增益因子。

图像数据在暗通道计算功能模块中使用一个时钟对像素点 R、G、B 三通道值计算得出暗通道像素。阈值计算功能模块根据输入的暗通道像素在一个时钟内完成暗通道最值的更新，并且在当前一帧图像结束后计算出参考像素选取的阈值。

图像数据在参考像素选取模块中使用比较器对像素点与阈值条件进行比较，如果像素点满足条件，则模块将此像素点作为参考像素输出至通道均值计算功能模块中，否则丢弃不进行处理。参考像素输入通道均值计算模块中实时相加并在当前图像结束后计算出各个通道的均值作为增益因子计算功能模块的输入进而计算增益因子。由于增益因子的计算过程中有除法运算，会极大地影响系统的运行效率，因此对分母的倒数进行 31 位小数、8 位整数定点运算后以其作为地址存入 ROM 中，使得各通道均值可以作为地址快速获得待求增益因子。虽然定点运算和浮点计算存在一定的误差，但由于小数位数较宽不会对最终校正的像素点产生影响。

2.2 偏色校正子模块

图像采集过程中相邻两帧具有极小的差异性，前一帧图像计算的增益因子可以根据颜色校正模型对当前图像进行偏色校正^[14]。在校正中，8 位图像数据与 39 位增益因子使用乘法器生成 47 位的像素校正数据，为避免数据超出像素有效范围，对高 16 位整数进行判断，当大于 0xFF 则说明超出最大像素值，取 0xFF 进行像素校正值输出；当小于 0xFF，取数据第 32 位至 39 位为像素校正值进行输出。

3 结果验证分析与评价

3.1 结果验证与分析

3.1.1 FPGA 板级正确性验证

根据算法描述，使用 Verilog HDL 语言对算法进行 RTL 描述，Modelsim 仿真软件进行其功能仿真，Xilinx 公司的 XC7A35TFTG256 FPGA 芯片以及 ON Semiconductor 公司 MT9P031 彩色图像传感器进行验证。配置图像传感器输出参数分辨率为 2 592×1 944@14FPS。图像传感器拍摄一张图像在软件与 Modelsim 进行单张图片仿真保证算法的正确性，由表 1 可知 FPGA 仿真与软件仿真过程中的关键变量完全一致从而保证了算法的正确性，并且 FPGA 运行时间为软件运行时间的 207 倍，保证了系统中图像处理部分的实时性。

3.1.2 动态图像白平衡校正分析

将自动白平衡算法集成到图像采集系统中，验证移

表 1 关键值比较

	暗通道阈值	参考像素均值(R/G/B)	增益因子(R/G/B)	运行时间/s
Modelsim	129	165/214/162	1.2317/0.9316/1.2091	0.068
软件	129	165/214/162	1.2318/0.9315/1.2093	14.107

动物体对白平衡算法的影响。在物体移动的情况下将自动白平衡算法处理过程中的增益因子通过系统现有千兆以太网传输至电脑中记录并绘制折线图。物体移动过程中连续拍摄 100 帧图片，此过程捕捉从物体移动进入图像传感器成像区域到移动出区域的全过程。

如图 2 所示，物体在第 1 至第 50 帧之间物体未进入图像传感器成像区域，图像增益在第二帧出现中间状态波动后第三帧趋于平稳；物体在 50 帧至 65 帧逐渐移动进入成像区域，由于物体颜色的原因，蓝色增益根据整体颜色快速大范围调整，红色增益缓慢上升，绿色增益缓慢下降；66 帧至 79 帧中，物体完全处于成像区域，增益稳定不变；80 帧至 85 帧中物体加速离开成像区域，增益逐渐恢复成原有状态；86 帧至 100 帧图像增益和物体进入前增益相同。

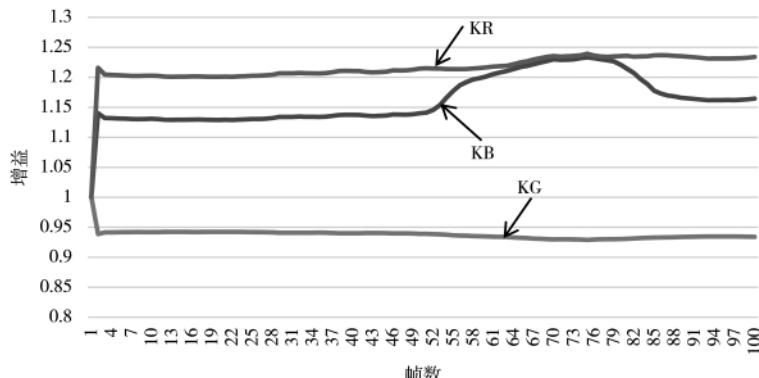


图 2 增益曲线图

物体移动过程中，偏色图像数据流校正实时进行，并根据前一帧图像的相对颜色进行快速增益计算后校正下一帧图像从而保证了白平衡校正算法在移动物体实时动态场景中的应用。

3.1.3 色彩校正色差分析

对偏色图像的白平衡算法处理结果采用色差均值^[15]来进行评价。如式(10)所示：

$$V = \sqrt{C_b^2 + C_r^2} \quad (10)$$

其中： C_b 、 C_r 分别表示 YCbCr 空间中蓝色色度分量均值与红色色度分量均值， V 表示一帧图像的色差均值，值越低则表示白平衡效果更好。

根据灰度世界法(GWM)和完美反射法(PRM)理论在 FPGA 上实现并使用 MATLAB 将 FPGA 白平衡处理结果导入电脑中，运用本文评价指标分别对不同分辨率下的三种应用环境图片进行评价，如表 2 所示。

如图 3 所示，在色彩单一的场景中，本文算法能较其他算法准确识别出白色像素点进行白平衡校正，色彩均值比擅长于单一色彩场景的 PRM 算法低 0.74，比 GWM 低 7.99。如图 4 所示，在此色彩丰富的场景中，色差均值相比于擅长丰富色彩场景

表 2 色差均值

	色彩单一场景	色彩丰富场景	过度曝光场景
GWM	180.07	181.00	180.82
PRM	172.82	181.27	171.07
本文算法	172.08	181.27	170.83

的 GWM 算法高 0.27, 但是其和 PRM 算法色差均值相同。如图 5 所示, 在过度曝光场景中, 该算法能降低过度曝光像素点对白平衡效果产生的干扰, 色差均值比 PRM 算法低 0.24。

根据实验结果分析, 该算法不仅在颜色单一场景中相比优于 PRM 算法, 并且其能有效避免过度曝光造成的 PRM 算法失效的固有问题, 其在颜色丰富场景中虽然不如 GWM 算法, 但是处理效果相近使其完全可以满足色彩丰富场景中的应用。所以该算法能完全胜任智能工业相机应用环境中的颜色检测任务, 并相对于其他算法有相对准确的白平衡效果。

3.2 结果评价

由上述 3.1.1 分析可知, 暗通道白平衡算法在 FPGA 上的实现精度可以确保在小数点后三位, 相对于传统电

脑软件处理提高 207 倍, 既保证了算法的校正精度又确保了系统的实时性; 在 3.1.2 中, 算法可以集成在系统中根据图像相对变化快速调整增益因子, 保证白平衡校正的正确性, 使其可以应用于动态应用环境中; 3.1.3 中的色彩色差分析说明该算法相对于传统的 GWM 以及 PRM 可以弥补其不擅长的应用环境。

4 结论

针对完美反射法因图像传感器过度曝光白平衡失效的现象, 本文提出一种基于暗通道光线透射率精确寻找参考白点进行白平衡的算法, 其在不影响图像数据采集速率以及准确性的条件下实时进行偏色图像白平衡校正, 并且完全适用于移动场景中的颜色校正。此算法在 FPGA 中高速并行流水线应用, 系统实时性使得机器视觉中的检测速率得到极大提高, 降低物体移动产生的干扰确保了系统的稳定。

参考文献

- [1] Qian Yanlin, CHEN K, KÄMÄRÄINEN J, et al. Deep structured-output regression learning for computational color constancy[C]. 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition(ICPR), Cancun, 2016: 1899–1904.

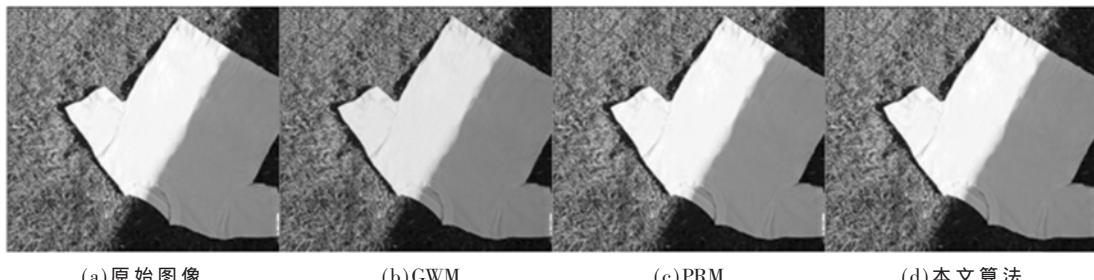


图 3 色彩单一场景



图 4 色彩丰富场景



图 5 过度曝光场景

(下转第 91 页)

表 1 自组网天线水平方向平均增益的仿真和实测结果

频率/MHz	水平方向平均增益/dB	
	仿真	实测
400	0.64	0.49
500	1.3	1.2
600	1.5	1.3
700	-0.9	-1

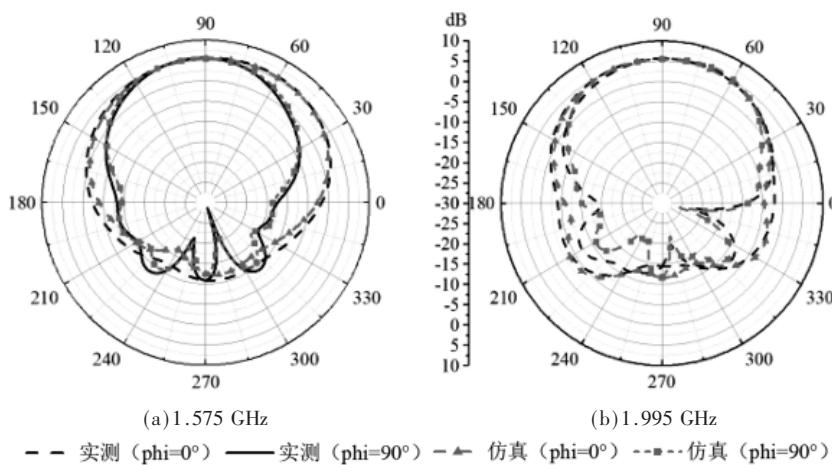


图 5 卫星导航及通信频段代表频点方向图

4 结论

传统手持式终端设备的天线设计中,自组网、卫星

(上接第 80 页)

- [2] 王丛.自动图像白平衡技术的研究[D].北京:北京工业大学,2012.
- [3] 李晓川,黄成强,祝永新,等.基于暗通道先验和灰度世界的自动白平衡算法改进[J].工业控制计算机,2018,31(11):90–92.
- [4] 董国伟,侯作勋,王震,等.CMOS 图像传感器自动白平衡算法及其 FPGA 实现[J].航天返回与遥感,2016,37(3):82–90.
- [5] NAZMA N, SEAL A, KHANNA P, et al. A FPGA based implementation of Sobel edge detection[J]. Microprocessors Microsystems, 2018, 56: 84–91.
- [6] 魏超,贺光辉.基于直方图的白平衡算法的研究[J].微电子学与计算机,2018,35(6):75–78.
- [7] 陈光化,张犁.夜间图像的白平衡算法研究与实现[J].微电子学与计算机,2018,35(3):33–36,41.
- [8] BARRON J T. Convolutional color constancy[C]. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 379 – 387.
- [9] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2009. IEEE, 2009: 1956–1963.

导航及卫星通信天线大部分是呈柱状且独立封装,一定程度上限制了设备的集成度的提高及重量的减轻。本文提出将天线平面化设计并将其集成到设备的保护盖板中,实验结果表明,该平面化四天线系统可以完全覆盖自组网、卫星导航及通信频段,并在对应频段实现需要的辐射性能。未来需要进一步解决的是自组网收发天线之间隔离度的提高。

参考文献

- [1] 郭泓宇.单兵作战手持终端设备的设计[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.
- [2] 刘晓鹏.基于数据装定的单兵手持终端系统设计[D].南京:南京理工大学,2018.
- [3] 巴新锋.基于 BDS 的士兵状态监视与指挥控制系统设计[D].成都:西华大学,2013.
- [4] 周晓东.无线 Ad Hoc 网络关键技术的研究[D].西安:西安电子科技大学,2006.
- [5] 王忍,俞钰峰,冯建杰.一种宽带高增益双套简单极子天线[J].通信对抗,2013,32(4):43–46.
- [6] BYUN G, CHO H, KIM S. Design of a dual-band quadrifilar helix antenna using stepped-width arms[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(4): 1858–1862.
- [10] 王飞,王伟.一种暗通道优先的快速自动白平衡算法[J].光电工程,2018,45(1):76–82.
- [11] 戴爱霞.用于图像处理的自动白平衡算法的研究及实现[D].苏州:苏州大学,2019.
- [12] WEST G, BRILL M H. Necessary and sufficient conditions for Von Kries chromatic adaptation to give color constancy[J]. Journal of Mathematical Biology, 1982, 15(2): 249–258.
- [13] 叶惠娇,冉全,成果.FPGA 图像边缘检测系统的设计与实现[J].计算机应用与软件,2018,35(12):237–240.
- [14] Wang Jianhua, Liu Chanlao, Chen Dachuan, et, al. Design of real-time video processing system based on DSP+ FPGA[J]. Foreign Electron. Meas. Technol., 2007, 26(9): 42–44.
- [15] BARRON J T. Convolutional color constancy[C]. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 379 – 387.

(收稿日期:2020-08-07)

作者简介:

- 王超(1995-),男,硕士,主要研究方向:FPGA 图像处理。
- 甄国涌(1971-),男,博士,教授,主要研究方向:测试集成技术与应用软件。
- 单彦虎(1985-),男,博士,讲师,主要研究方向:微系统及集成技术、动态测试。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所