

·信号与信息处理·

基于LIP模型和CLAHE的低照度图像增强算法

冯清枝, 王 丹

(中国刑事警察学院 声像资料检验技术系, 沈阳 110854)

摘 要:为了解决低照度环境引起的彩色图像退化问题,提出一种新的低照度图像增强算法。首先在YUV色彩空间下采用对数图像处理(LIP)运算对彩色图像的亮度分量进行调整,以提高暗调区的亮度和对比度,然后选取适宜的参数,利用限制对比度自适应直方图均衡化(CLAHE)对亮度分量进行二次增强,以获得更好的增强效果,最后根据亮度增益,利用线性运算恢复增强图像的色彩信息。实验结果表明,该算法能够有效地提高低照度彩色图像的视觉质量,细节鲜明突出,色彩真实自然,同时也避免了过度增强,噪声放大等现象。

关键词: 图像增强; 色彩恒常性; LIP模型; 直方图均衡化

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-05-0031-06

A Novel Algorithm for Low Illumination Image Enhancement Based on LIP and CLAHE

FENG Qing-zhi, WANG Dan

(Department of Audio and Visual Material Examination Technology, Criminal Investigation Police University
of China, Shenyang 110854, China)

Abstract: To solve the degradation of color images caused by low illumination condition, a novel algorithm to improve the visibility of low illumination images is proposed. At first, the operation based on logarithmic image processing (LIP) model is adopted to regulate the luminance component calculated from the color image in YUV color space so that the brightness and contrast of low level gray regions of the image can be increased accordingly. And then, the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) with suitable parameters is introduced to modify the luminance component to improve the quality of image enhancement further. At last, a linear color restoration process based on the luminance gain is used to determine color values of the enhanced image. Experimental results show that the proposed algorithm is more effective and practicable, and the enhanced image can achieve an excellent global visual effect with clear details and natural colors, while avoiding excessive enhancement, noise enlargement and so on.

Key words: image enhancement; color constancy; logarithmic image processing (LIP) model; histogram equalization

统计数据表明,多数犯罪活动是在光线昏暗的环境下发生的。低照度环境在为犯罪行为提供掩护的同时,也会造成监控系统记录的现场图像发生

质量退化,给案件调查、影像取证等工作带来了严峻挑战。低照度彩色图像存在着明显的退化特征:(1)画面存在大量暗调区,亮度和对比度较低,局部

收稿日期:2018-09-02

基金项目:辽宁省科学技术计划项目(2017231004)

作者简介:冯清枝(1969-),男,辽宁沈阳人,硕士,中国刑警学院声像资料检验技术系副教授,主要研究方向包括刑事影像技术、数字信号处理等。

细节难以辨识;(2)存在光源照明的情况下,现场照度不均匀,画面又存在部分高亮区,局部对比度低;(3)画面灰暗,色彩暗淡,且附有显著噪声。相比于灰度图像,彩色图像包含更多的视觉信息,对低照度彩色图像进行必要的增强处理能够更准确地揭示图像内容信息,对案件侦查工作具有重要的现实意义。此外,低照度彩色图像增强也是近年来倍受关注的一个研究方向^[1-2]。

现有的图像增强方法可以划分为空域法、频域法和融合法等。其中空域法主要有灰度映射、空域滤波、直方图均衡化、基于Retinex理论的增强算法^[3]以及基于偏微分方程的增强算法^[4]等。频域法主要有同态滤波、频域滤波、基于小波变换的增强算法等。这些增强算法性能各异,从不同角度提高了低照度图像的视觉质量。融合法是按照预定的融合规则,综合不同算法的增强结果,以获取更丰富的图像信息,更显著的增强效果。彩色图像包含亮度、色调和饱和度等信息,增强处理更为复杂,为了避免增强图像产生色彩失真,多数情况下采用基于色彩空间转换的彩色图像增强方法。

针对低照度彩色图像的退化特征,提出一种新的图像增强算法,首先将彩色图像由RGB空间转换到YUV空间,计算其亮度分量,并采用对数图像处理运算对亮度分量的动态范围进行调整,提高暗调区的亮度和对比度;然后利用限制对比度自适应直方图均衡化对亮度分量进行二次增强,突出局部细节,抑制噪声干扰,提高图像整体增强效果;最后根据亮度增益,采用线性运算恢复图像的色彩信息,实现彩色图像增强。新算法应用于夜晚监控视频图像增强,在提高画面清晰度和色彩逼真度等方面,取得良好的综合效果。

1 基于LIP模型的图像增强

对数图像处理(logarithmic image processing, LIP)是1988年Joulin和Pinoli提出的一种基于抽象代数的图像处理模型^[5],通过提供一种新的代数结构和运算操作为数字图像处理开拓了崭新的研究领域。LIP模型在有界的实数区间 $[0, M]$ 中定义了封闭的加法、减法和数乘等向量运算,这些运算具有完备的数学定义,并且与离散图像的形成法则一致,运算结果仍然在实数区间 $[0, M]$ 。这样就避免

了传统的图像运算结果可能超出量化范围,导致图像信息的损失。另外,LIP模型与非线性的人类视觉特性相一致,其对比度定义符合韦伯定律,更接近人眼对真实环境的感受。

在LIP模型下,灰度函数 f 和正实数 λ 的数乘定义为

$$\lambda \otimes f = M - M(1 - \frac{f}{M})^\lambda \quad (1)$$

对于8位灰度图像, $M=255$ 。可以看出,当 $\lambda > 1$ 时,数乘运算扩展图像暗调区的动态范围,突出暗区域细节。由于低照度图像存在大量的暗调区,有必要对其动态范围进行均衡调整,为此,提出一种与亮度相关的 λ 值计算方法,即根据图像的亮度分布,计算放大系数,重点提高暗调区的亮度和对比度,其形式描述为

$$\lambda(x, y) = 1 - \alpha + \alpha \times \frac{M}{Y(x, y)} \quad (2)$$

式中, α 是一个取值范围为 $[0, 1]$ 的调节参数,用于控制图像的增强程度; $Y(x, y)$ 是彩色图像的亮度分量。

此时,基于LIP模型的图像增强算法可以表示为

$$F(x, y) = 255 - 255 \times (1 - \frac{Y(x, y)}{255})^{\lambda(x, y)} \quad (3)$$

式中, $F(x, y)$ 为经过对数图像增强运算后的亮度分量。此时,图像暗调区的亮度和对比度得到明显的提高,但是图像的整体对比度和局部细节增强效果不显著,如果过多地依赖 α 的调节作用,则会引起图像过度增强和噪声放大,难以获得预期的增强效果。

2 限制对比度自适应直方图均衡化

全局直方图均衡化(global histogram equalization, GHE)根据累积分布函数进行灰度调整,使灰度分布均匀或近似均匀,以达到图像增强的目的,对低照度图像具有较好的增强效果,而且运算简单,适于视频图像实时增强。但是,GHE的实质是以合并部分灰度级换取对比度的提高,势必造成输出图像细节损失,甚至出现不自然的过度增强现象。与全局方法相比,局部直方图均衡化将图像划分为若干个子块,通过对每个子块进行均衡化处理,更好地增强图像的局部细节。限制对比度自适应直方图均衡化(contrast limited adaptive histogram

equalization, CLAHE)是在局部直方图均衡化基础上提出的一种改进方法,其基本思想是通过限定子块图像直方图的高度,达到削弱局部对比度过度增强和抑制噪声放大的目的^[6]。

CLAHE算法的基本流程如下:

(1)将原始图像划分为 $m \times n$ 个大小相等、连续且互不重叠的子块图像。 m 和 n 的取值决定图像细节的增强程度, m 和 n 数值越大,增强效果越明显,但图像的整体感减弱。

(2)统计每个子块图像的局部直方图 $H(i)$, i 表示子块图像可能出现的灰度级。

(3)计算子块图像内所有像素均匀分配到各个灰度级的平均值 N_{Aver} 为

$$N_{Aver} = \frac{u_x \times u_y}{L_{Gray}} \quad (4)$$

式中, u_x 、 u_y 分别表示子块图像水平、垂直方向的像素数; L_{Gray} 表示子块图像中灰度级的数量。

(4)设定一个取值范围为 $[0, 1]$ 的剪切限制系数 β ,限定每个灰度级包含的像素数不允许超过平均值 N_{Aver} 的倍数。 β 决定对比度增强的程度,同时也影响噪声放大的幅度, β 数值越大,增强效果越明显,但噪声幅度增大。此时,实际剪切限制值 N_{CL} 为

$$N_{CL} = N_{Aver} + [\beta \times (u_x \times u_y - N_{Aver})] \quad (5)$$

(5)对局部直方图 $H(i)$ 中超出 N_{CL} 值的像素进行剪切,将剪切下来的像素重新分配到各个灰度级中。设剪切的像素总数为 N_{Clip} ,于是得到每个灰度级应该分到的剪切像素数 N_{Acp} 为

$$N_{Acp} = \frac{N_{Clip}}{L_{Gray}} \quad (6)$$

其中,

$$N_{Clip} = \sum_i \{\max[H(i) - N_{CL}, 0]\} \quad (7)$$

若用 $H'(i)$ 表示重新分配后的局部直方图,则有

$$H'(i) = \begin{cases} N_{CL} & H(i) > N_{CL} \\ N_{CL} & H(i) + N_{Acp} \geq N_{CL} \\ H(i) & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

(6)经过上述分配后,若剩余像素数为 N_{Left} ,则分配剩余像素的灰度级步长为

$$L_{Step} = \frac{L_{Gray}}{N_{Left}} \quad (9)$$

从最小灰度级到最大灰度级按步长 L_{Step} 进行循环搜索,遇到像素数小于剪切限制值 N_{CL} 的位置,则分配一个像素,直至剩余像素数 N_{Left} 为0,最终获得经过剪切的局部直方图 $H'(i)$ 。

(7)对每个子块图像的新直方图 $H'(i)$ 进行均衡化处理。

(8)为了消除增强图像的块状效应,以每个子块图像的中心点为样本点,分别获取其灰度值,采用双线性插值方法,计算增强图像中每个像素的灰度值。

3 低照度彩色图像增强算法

综上所述,确定文中提出的低照度彩色图像增强算法流程如下:

(1)将低照度彩色图像由RGB空间映射到YUV空间,利用式(10)计算其亮度分量 $Y(x, y)$ 为

$$Y(x, y) = 0.299R(x, y) + 0.587G(x, y) + 0.144B(x, y) \quad (10)$$

式中, (x, y) 表示像素坐标; $R(x, y)$ 、 $G(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 为彩色图像的三基色分量。

(2)为了提高暗调区的亮度和对比度,利用式(2)计算放大系数,并在LIP模型下调整亮度分量 $Y(x, y)$ 的动态范围,得到新的亮度分量 $F(x, y)$ 。

(3)为了提高图像的整体对比度,突出局部细节,利用CLAHE算法对亮度分量 $F(x, y)$ 进行低噪声增强,得到二次增强的亮度分量 $Y'(x, y)$ 。

(4)根据色彩恒常性理论,避免色调偏移,利用式(11)等比例恢复增强图像的色彩信息为

$$[R'(x, y), G'(x, y), B'(x, y)] = \frac{Y'(x, y)}{Y(x, y)} \times [R(x, y), G(x, y), B(x, y)] \quad (11)$$

式中, $R'(x, y)$ 、 $G'(x, y)$ 、 $B'(x, y)$ 为增强图像的三基色分量。

4 实验结果及分析

为了验证文中算法的有效性和普适性,在MATLAB2012a平台上分别对低照度环境下的彩色

照片和视频图像进行增强处理实验。图 1a 是在室内暗环境下拍摄的彩色照片,以此说明算法的流程和效果。首先在 YUV 空间下提取彩色照片的亮度分量,如图 1b 所示,然后按照图 1c 所示的基于 LIP 模型的亮度映射关系(调节参数 $\alpha=0.1$),对亮度分量进行调整,图 1d 为调整后的增强效果。可以看出,应用基于 LIP 模型的图像增强之后,图像暗区域近似指数变换,亮度和对比度均有提高,远景花卉

显现出轮廓和细节;而图像其他区域近似斜率为 0.9 的线性变换,亮度略有提高,对比度有所降低,致使这些区域的视觉效果减弱。图 1e 是利用 CLAHE 算法(子块图像数目 $m \times n=4 \times 4$,剪切限制系数 $\beta=0.01$)对图 1d 增强后的结果,显然,图像的整体对比度显著提高,局部细节突出。图 1f 是恢复色彩的增强图像,画面效果令人愉悦,远景花卉轮廓分明,色彩鲜艳;前景报纸、色板清晰,色彩逼真。

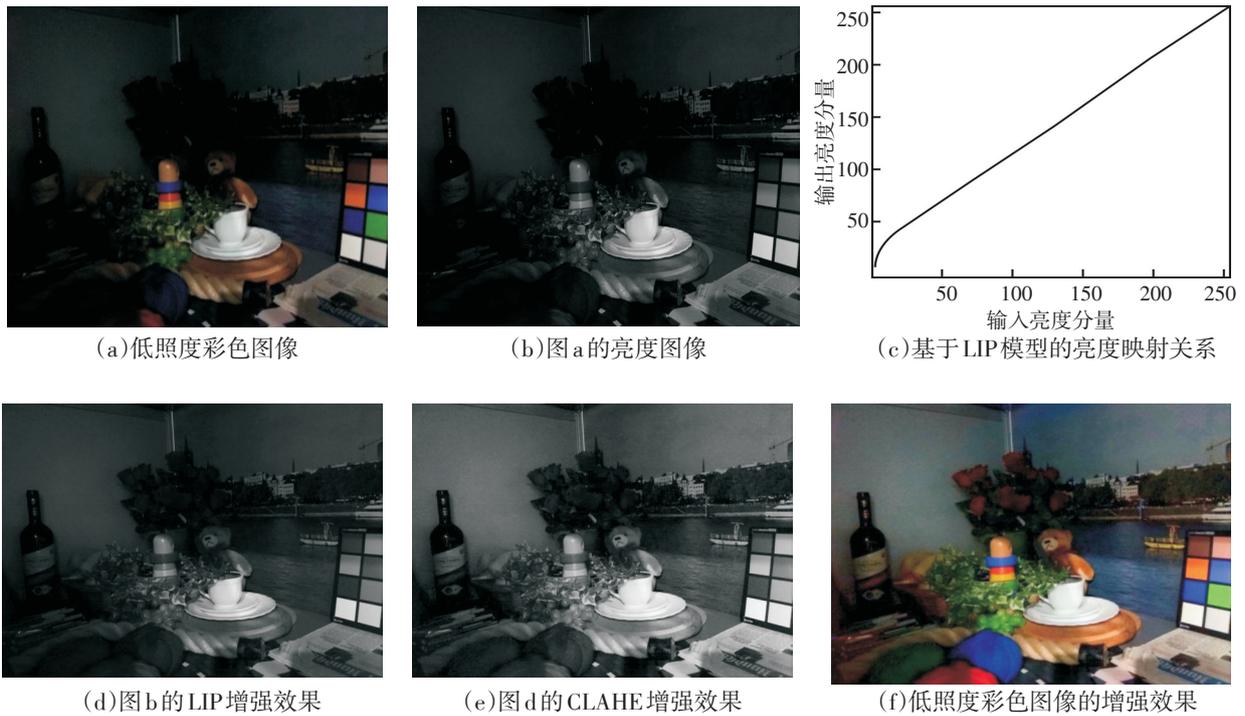
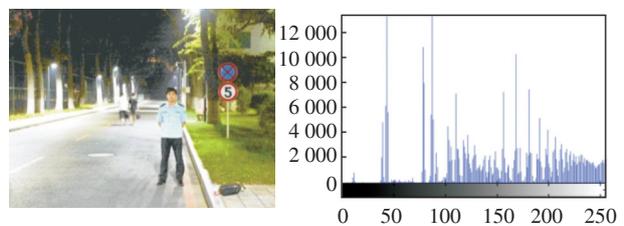
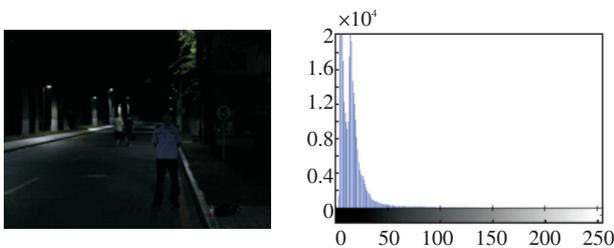


图 1 文中算法分析

选取夜晚环境下监控系统记录的视频图像作为处理对象,将文中算法与 GHE、多尺度 Retinex 增强算法(multi-scale Retinex, MSR)以及文献[7]提出的基于双边滤波的增强算法等有代表性的图像增

强方法进行对比实验。

图 2 所示为 4 种算法对其中一帧图像的增强效果,分别从定性分析和定量评价两方面对文中算法进行综合评判。



(a) 原始彩色图像及其直方图

(b) GHE 增强结果及其直方图

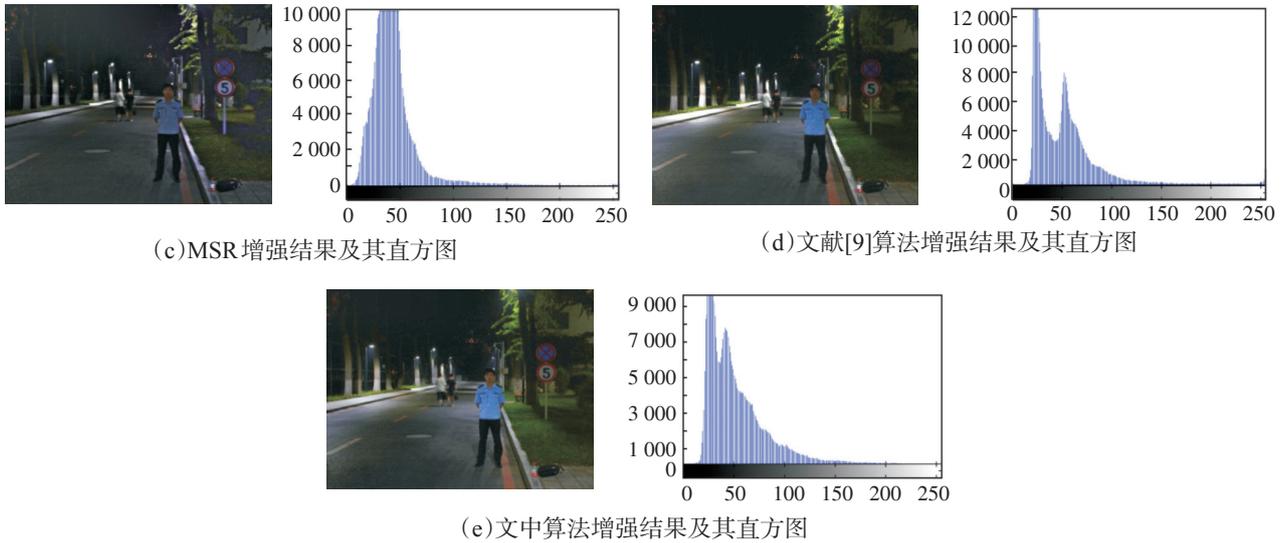


图2 夜晚彩色图像的不同算法增强效果比较

定性分析是从主观视觉感受角度,运用比较、概括、归纳等方法,对增强图像的亮度分布、边缘细节和整体效果进行描述。比较5幅图像的视觉效果,可以看出,原始图像具有明显的低照度退化特征,画面灰暗,细节模糊,色彩暗淡;经过GHE处理的图像亮度和对比度明显提高,但是存在过度增强,画面生硬,色彩失真等;经过MSR处理的图像亮度和对比度相对提高,但是绿地、天空等存在伪影,色彩略有偏差;经过双边滤波算法处理的图像和文中算法处理的图像,画面清晰,色彩自然,整体感强。同时,这两种算法的直方图接近原始直方图的形状,表明增强图像与原始图像结构相似,内容真实。相对而言,双边滤波算法的增强效果较为明快,景物与背景的反差鲜明,而文中算法的增强效果较为柔和,人物、环境等细节突出。

定量评价是从客观数据指标角度,通过引入标准差、信息熵、峰值信噪比(PSNR/dB)和结构相似度(SSIM)^[8]等统计特性对图像增强效果进行数值分析。其中,峰值信噪比和结构相似度是需要参考原始图像的定量评价指标。性能评价的准则是:标准差越大,图像对比度越高;信息熵值越大,细节越丰富;峰值信噪比越高表明抑制噪声能力越强,输出图像的视觉质量越好;结构相似度越接近1表明与原始图像的相似程度越高。不同算法增强结果的评价数据如表1所示。

表1 不同算法增强结果的评价数据

原始图像	图像增强算法			
	GHE	MSR	文献[9]算法	文中算法
标准差	15.414 3	38.060 1	30.427 1	29.338 3
信息熵	4.491 0	6.461 4	6.040 8	6.284 0
峰值信噪比		5.656 1	15.804 7	16.234 1
结构相似度		0.059 0	0.353 5	0.409 6

4种算法在不同程度上增加了图像的标准差、信息熵,表明输出图像的对比度和清晰度较原始图像有着较大的提高。其中,GHE增强结果的标准差、信息熵数值偏高表明输出图像过度增强,对比度过高,而峰值信噪比、结构相似度数值偏低则表明引入过多的噪声,画面不自然,内容失真;双边滤波增强结果的标准差、结构相似度数值略高表明此方法在改善图像视觉效果和保持内容真实等方面具有良好的性能;文中算法增强结果的信息熵、峰值信噪比数值略高。表明该方法具有更好的表现细节能力和抑制噪声能力。此外,从运算效率上看,MSR、双边滤波算法采用复杂的卷积运算,时间复杂度高,双边滤波的时间复杂度为 $O(Nr^2)$,其中 r 为滤波窗口半径, N 为图像的像素数,当窗口半径

较大或图像分辨率较高时,计算效率过低。文中算法采用简单的代数运算,时间复杂度仅为 $O(2N)$,相比之下,计算效率更高,具有很好的实时性,同时需要选取的参数较少,具有很好的适应性。

5 结 论

提出的低照度彩色图像增强算法融合基于LIP模型的图像增强和CLAHE两种算法的优势,有效地解决了低照度环境引发的彩色图像质量退化问题。对比实验表明,该算法在视觉感受和指标评价上优于其他图像增强算法,在改善图像视觉效果,保持内容真实,表现细节信息,抑制噪声干扰以及提高运算效率等方面具有良好的综合性能,既为低照度环境下的案件分析和取证工作提供一种简单高效的思路,也为微光视频监控系统的研发提供一种切实可行的方案。

参考文献

- [1] Sharma S, Mandavgane R N, Bagade A P. Review on efficient contrast enhancement technique for low illumination color Images[J]. International Journal on Recent Trends in

Computing and Communication, 2017, 5(3): 508-511.

- [2] 冯清枝, 虎添翼. 一种基于累积分布的低照度彩色图像增强算法[J]. 光电技术应用, 2017, 32(5): 57-61.
- [3] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100-110.
- [4] 韩希珍, 赵建. 结合偏微分方程增强图像纹理及对对比度[J]. 光学·精密工程, 2012, 20(6): 1382-1388.
- [5] Jourlin M, Pinoli J C. A model for logarithmic image processing[J]. Journal of Microscopy, 1988, 149(1): 21-35.
- [6] Pizer S M, Amburn E P. Adaptive histogram equalization and its variations[J]. Computer Vision Graphics & Image Processing, 1987, 39(3): 355-368.
- [7] 胡韦伟, 汪荣贵, 方帅, 等. 基于双边滤波的Retinex图像增强算法[J]. 工程图学学报, 2010, 31(2): 104-109.
- [8] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [9] 万安军, 赵勋杰. 拟合阶次对基于多项式拟合的相位—高度映射关系的影响[J]. 光电技术应用, 2018, 33(3): 29-34.
- [10] 张月, 王睿. 光电探测器脉冲相关噪声增强效应研究[J]. 光电技术应用, 2018, 33(1): 24-29.

(上接第26页)

激光输出。当注入泵浦功率为137 W时,获得了输出波长为1 889.3 nm 46 W的连续输出功率,其斜率效率为45.1%。随着泵浦功率由20 W增加到137 W,输出波长仅漂移了0.12 nm。

参考文献

- [1] Hderson S W, Suni P J M, Hale C P, et al. Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers [C]//Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1993, 31(1): 4-15.
- [2] Humbach O, Fabian H, Grzesik U, et al. Analysis of OH absorption bands in synthetic silica[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1996, 203: 19-26.
- [3] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, et al. 2 μm Laser Sources and Their Possible Applications Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics[C] // ISBN: 978-953-7619-82-4, 2010.
- [4] Stoneman R C, Esterowitz L. Efficient 1.94- μm Tm:YALO

Laser[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1995, 1(1): 78-81.

- [5] Temel B, Özgür T, Hamit K, et al. Modulated and continuous-wave operations of low-power thulium (Tm:YAP) laser in tissue welding [J]. Journal of Biomedical Optics, 2010, 15(3): 038001.
- [6] Sudesh V, Asai K, Kudou A, et al. Growth and characterization of Tm, Ho-doped LuLiF₄ and YLiF₄ crystals, in growth, fabrication, devices, and applications of laser and nonlinear materials [J]. J W Pierce and K I Schaffers, Editors, 2001: 153-160.
- [7] Koen W, Strauss H, Bollig C, et al. High-power diode-end-pumped Tm: YLF slab laser delivering 189 W at 1890 nm[J]. Laser Technology, 2010.
- [8] Strauss H J, Esser M J D, King G, et al. Tm:YLF slab wavelength-selected laser[J]. Optical Materials Express, 2012, 2(8): 1165-1170.