

# 一种单通道彩色图像加密方法\*

高丽娟<sup>1)</sup> 杨晓苹<sup>1)†</sup> 李智磊<sup>2)</sup> 王晓雷<sup>2)</sup> 翟宏琛<sup>2)</sup> 王明伟<sup>2)</sup>

1) 天津理工大学电子信息与通信工程学院, 天津 300191)

2) 南开大学现代光学研究所, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300071)

(2008 年 4 月 24 日收到, 2008 年 7 月 7 日收到修改稿)

提出了一种彩色图像的单通道加密方法. 在该方法中, 首先采用三色光栅编码原理将一幅彩色图像编码为一幅灰度图像, 再利用双随机相位加密技术对其加密, 从而实现了彩色图像的单通道加密. 该方法既保证了安全性, 同时在加密时仅需要一个相干光源, 简化了系统, 实用性较强. 模拟实验结果证明了其有效性.

关键词: 彩色图像, 单通道加密, 三色光栅, 双随机相位

PACC: 4425F, 4230K

## 1. 引 言

在新一代的信息安全理论与技术的研究中, 基于光学理论和方法的图像处理技术具有并行处理和多维、大信息量、难于破解等优势, 发挥了不可替代的重要作用. 近年来关于光学图像加密的研究和报道有很多<sup>[1-8]</sup>. 这些方法大都采用单色光照明图像, 因此恢复的图像会失去其丰富的彩色信息.

现实世界中的大多数物体均呈现出彩色, 彩色图像可以将不同的亮度和不同的彩色组合起来表示不同的信息<sup>[9]</sup>, 而灰度图像只能用不同的灰度级表示不同的信息. 因此, 彩色图像在各个领域的应用越来越多, 彩色图像加密也成为信息安全领域的一个重要组成部分.

近年来有很多学者从事这方面的研究<sup>[10, 11]</sup>. Zhang 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于傅里叶变换的彩色图像加密方法; Chen 和 Zhao<sup>[11]</sup>提出了基于菲涅耳变换全息的光学彩色图像多通道加密方法, 通过使用三个波长不同的激光器同时照射彩色图像来获得其红、绿、蓝分量, 然后分别对三个通道进行加密并将加密后的信息记录在一张全息图上, 解密时同样需要三个激光器同时对全息图照明, 再分别对各通道解密, 最后合成彩色图像. 该方法的优点是难于破解, 需要三个通路的密钥才能解密出正确图像, 但需要使

用三个不同的激光器和多个特定的分色镜, 系统复杂, 实现成本较高.

本文提出了一种基于白光光学信息处理和双随机加密技术的单通道彩色图像加密方法. 该方法首先根据三色光栅原理<sup>[12-17]</sup>将彩色图像的色彩信息编码为灰度信息, 从而将彩色图像的红、绿、蓝三个通道合成为一个通道, 再将此灰度图像作为原始待加密图像, 采用双随机相位加密技术对其加密<sup>[1, 5-7]</sup>, 实现了彩色图像的单通道加密, 与彩色图像多通道加密方法相比<sup>[11]</sup>, 该方法既保证了安全性<sup>[1]</sup>, 同时加密时只需要一个通道, 一个相干光源, 简化了系统, 降低了成本, 实用性较强. 该方法可完全采用全光系统来实现. 模拟实验结果证明了本方法的有效性.

## 2. 彩色图像单通道编码

本文中采用三色光栅对彩色图像进行单通道编码. 三色光栅<sup>[12-14]</sup>是一种特殊的空间光调制器, 由三个不同方向的 Ronchi 子光栅叠加而成. 利用计算机技术可在同一块材料上制作三色光栅<sup>[12]</sup>, 等价于将三套取向不同且颜色分别为三原色的一维 Ronchi 光栅重合在一起制成的复合光栅.

三色光栅及其各通道结构如图 1 所示. 三个子光栅能分别选择透过红、绿、蓝的三原色光谱, 并将

\* 国家自然科学基金(批准号: 60577017, 60777007)和光电信息技术科学教育部重点实验室开放课题(批准号: 2005-14)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yangxiaoping@tsinghua.org.cn

之进行空间频率的调制,调制后的衍射光波的传播方向随光栅的不同走向而改变,各一级频谱呈现在与子光栅走向对应的位置上,实现了各衍射一级频谱的分离.

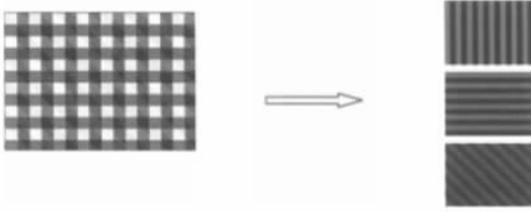


图 1 三色光栅的结构

由于三色光栅空域复用频域分离的特点,如果将其放置于成像系统的像面位置前,含有彩色景物信息的平行白光入射到三色光栅上,在成像面上被三色光栅调制,从而得到彩色景物的编码图像,该编码图像可以采用黑白底片或黑白 CCD 来记录.

根据色度学<sup>[9]</sup>原理,各种颜色均可由红、绿、蓝三原色混合而成,只要记录下一幅彩色图像的三原色信息就可以得到原彩色图像. 而用黑白胶片记录彩色图像实际上就是将彩色图像的红、绿、蓝信息压缩为灰度图像信息,在光学上即采用 Ronchi 光栅对彩色图像进行载波抽样,将图像的信息调制到光栅频率上.

彩色图像单通道编码的光学系统如图 2 所示,图中 S 为白光光源, L 为准直透镜. 图中三色光栅的结构特性如图 1:垂直方向的子光栅只能透过红色,抽样载波红色信息;水平方向的子光栅只能透过绿色,抽样载波绿色信息;倾斜方向(135°)的子光栅只能透过蓝色,抽样载波蓝色信息. 将此三色光栅直接覆盖在黑白胶片上,并与待加密的彩色图像密接,只需一次就可完成彩色编码和存储过程.

一幅位于输入面的彩色图像可表示为

$$f_m(x, y) = f_r(x, y) + f_g(x, y) + f_b(x, y) \quad (1)$$

其中  $f_r, f_g, f_b$  分别为彩色图像的红、绿、蓝分量.

三色光栅可表示为

$$P_r(x, y) = P_r(x, y) + P_g(x, y) + P_b(x, y), \quad (2)$$

则经三色光栅编码后得到的黑白编码正片的振幅透过率为

$$f(x, y) = f_r(x, y)P_r(x_r) + f_g P_g(x_g) + f_b(x, y)P_b(x_b). \quad (3)$$

利用解码操作将存储在黑白胶片上的图像进行

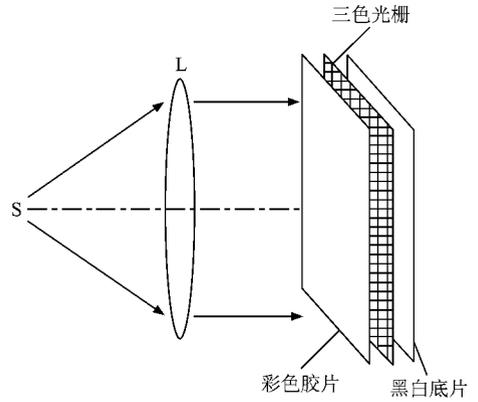


图 2 彩色图像单通道编码

彩色恢复需要在白光系统中进行,光学解码<sup>[12,13]</sup>框图如图 3 所示. 用白光光源照射  $f(x, y)$ ,在其傅里叶频谱面上放置一空间滤波器. 要求滤波器通光孔的位置对应  $f(x, y)$  各频谱的位置,即分别在  $f(x, y)$  的频谱带的各个级次上在红、绿、蓝位置开孔. 再分别放置与红、绿、蓝光谱透过率相对应的滤色片,只允许某原色的光波透过. 从滤波器通过的三种颜色的光到达输出面,分别形成了原彩色图像的三幅分色片,它们在空间精确复合,最后恢复出原彩色图像.

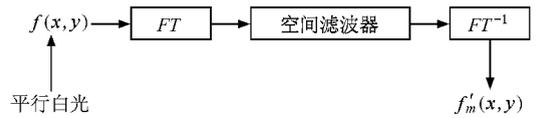


图 3 彩色图像解码框图

### 3. 彩色图像单通道加密

将编码得到的灰度图像  $f(x, y)$  作为待加密的输入图像,采用双随机相位加密法<sup>[1,5,7]</sup>进行加密,即首先在输入像平面上将  $f(x, y)$  和一个随机相位板相乘,然后进行傅里叶变换,得到其频谱,在频谱平面上将其与另一个随机相位板相乘,再进行傅里叶逆变换,最终将图像变化为稳定的白噪声. 其光学系统如图 4 所示.

其中 FL1 和 FL2 为傅里叶变换透镜. 令  $p(x, y)$  和  $k(u, v)$  分别代表在  $[0, 1]$  之间均匀分布的随机序列 ( $u, v$ ) 为傅里叶谱空间坐标,则加密后的图像可表示为

$$g(x, y) = FT^{-1}\{FT\{f(x, y) \exp[i2\pi p(x, y)]\} \times \exp[i2\pi k(u, v)]\}. \quad (4)$$

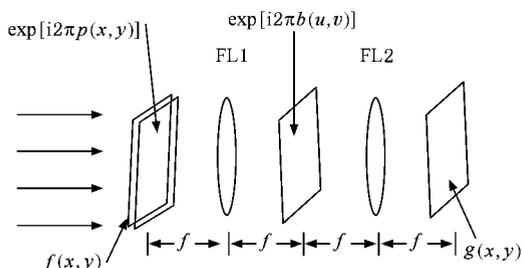


图4 双随机相位加密的光学实现装置

将  $g(x,y)$  作为输入图像, 相位因子  $\exp[i2\pi p(x,y)]$  和  $\exp[i2\pi b(u,v)]$  作为解密的密钥, 通过与上述加密过程相反的过程即可实现解密. 如果只需要图像的强度信息, 用一个相位因子  $\exp[i2\pi b(u,v)]$  解密就可以了. 由于双随机相位加密法中的两个相

位因子都是随机的, 因而在不知其相位分布的情况下, 解密图像是不可能的, 故该加密过程具有很高的安全性.

将解密后得到的图像  $f'(x,y)$  作为输入图像, 应用前文的解码方法对其解码, 即可得到恢复的彩色图像.

#### 4. 模拟结果及分析

图5为上述方法的计算机模拟结果. 其中, 图5(a)为一幅  $256 \times 256$  的彩色图像, 图5(b)为将其编码得到的灰度图像, 图5(c)为采用双随机相位加密技术对图5(b)加密得到的结果, 图5(d)为对图5(c)解密后得到的灰度图像, 图5(e)是采用一级谱对图5(d)解码得到的解码彩色图像.

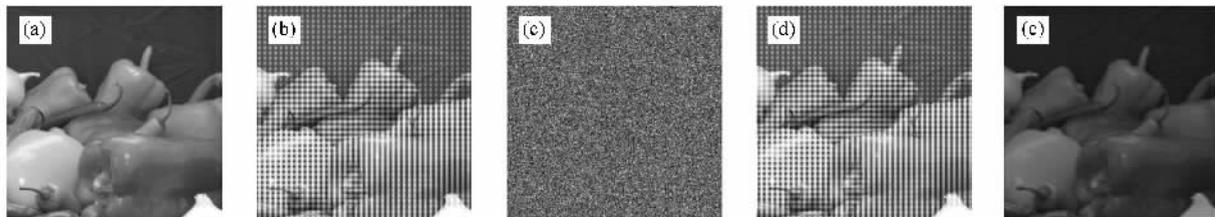


图5 彩色图像单通道加密模拟结果 (a)原彩色图像 (b)编码灰度图像 (c)加密图像 (d)解密图像 (e)一级谱解码图像

由图可见, 一级频谱的解码彩色图像基本恢复了原彩色图像的颜色特征, 但与原图相比, 其亮度较低、空间分辨率明显减小. 提高解码图像的质量可采用融合零级解码的方法<sup>[13,16]</sup>. 因为在编码图片的频谱面上, 中心处的零级频谱为各零级频谱的叠加, 具有较大的幅值, 包含了原彩色图像的强度信息, 因此采用 HSK (色调、饱和度、强度) 色度变换融合零级的方法可改善图像的亮度问题并提高其空间分辨率.

将一级谱解码图像由红绿蓝色彩空间转换到

HSI 色彩空间<sup>[9]</sup>, 然后用零级频谱解码灰度图像代替其中的 I 分量, 最后做逆变换由 HSI 色彩空间转换回红绿蓝色彩空间, 即可得到融合后的解码彩色图像, 如图6所示. 其中, 图6(a)是零级谱的解码图像, 图6(b)是融合零级后得到的解码彩色图像. 由图可见, 解码彩色图像的亮度和空间分辨率均有了很大提高(与图5(e)相比), 颜色信息也保持的很好.

#### 5. 结 论

本文应用三色光栅编码技术和双随机相位加密方法, 实现了彩色图像的单通道加密, 与彩色图像的多通道加密方法相比, 该方法在加密时仅使用一个相干光源, 降低了对光源的要求, 简化了系统结构, 降低了成本, 提高了系统实用性. 由于双随机加密技术中所用的相位因子是随机的, 在不知道密钥的情况下解密原图像是困难的, 从而保证了该方法的安全性. 同时, 该方法可完全采用全光系统来实现. 模拟实验结果证明了本文提出的方法的有效性.

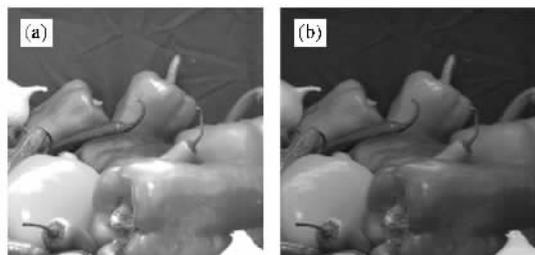


图6 融合零级效果 (a)零级解码图像 (b)融合后图像

- [ 1 ] Refregier P ,Javidi B 1995 *Opt. Lett.* **20** 767
- [ 2 ] Unnikrishnan G ,Joseph J ,Singh K 2000 *Opt. Lett.* **25** 887
- [ 3 ] Javidi B ,Nomura T 2000 *Opt. Lett.* **25** 28
- [ 4 ] Situ G ,Zhang J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1584
- [ 5 ] Liu F M ,Zhai H C ,Yang X P 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2462 ( in Chinese )[ 刘福民、翟宏琛、杨晓苹 2003 物理学报 **52** 2462 ]
- [ 6 ] Yang X P ,Zhai H C ,Liu F M 2003 *J. Optoelectronics · Laser* **14** 1187 ( in Chinese )[ 杨晓苹、翟宏琛、刘福民 2003 光电子·激光 **14** 1187 ]
- [ 7 ] Yang X P ,Zhai H C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1578 ( Chinese )[ 杨晓苹、翟宏琛 2005 物理学报 **54** 1578 ]
- [ 8 ] Yang X P ,Zhai H C ,Wang M W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 847 ( in Chinese )[ 杨晓苹、翟宏琛、王明伟 2008 物理学报 **57** 847 ]
- [ 9 ] Gonzalez R C ,Ruan Q Q 2005 *Digital Image Processing* ( 2nd ed ) ( Beijing : Electronics Industry Press ) p225 ( in Chinese )[ 冈萨雷斯、阮秋琦 2005 数字图像处理( 第二版 )( 北京 : 电子工业出版社 ) 第 225 页 ]
- [ 10 ] Zhang S Q ,Karim M A 1999 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **21** 318
- [ 11 ] Chen L F ,Zhao D M 2006 *Opt. Exp.* **14** 8552
- [ 12 ] Mu G G ,Wang J Q ,Fang Z L 1983 *Chin. J. Sci. Instrum.* **4** 125 ( in Chinese )[ 母国光、王君庆、方志良 1983 仪器仪表学报 **4** 125 ]
- [ 13 ] Luo G ,Liu F L 2000 *Science in China* ( Ser. E ) **30** 222 ( in Chinese )[ 罗 罡、刘福来 2000 中国科学( E 辑 ) **30** 222 ]
- [ 14 ] Mu G G 2001 *J. Optoelectronics · Laser* **12** 285 ( in Chinese )[ 母国光 2001 光电子·激光 **12** 285 ]
- [ 15 ] Zhai H C ,Mu G G ,Zhu X S 1999 *Acta Opt. Sin.* **19** 1245 ( in Chinese )[ 翟宏琛、母国光、朱香山 1999 光学学报 **19** 1245 ]
- [ 16 ] Fang H ,Luo G 2001 *J. Sci. Instrum.* **22** 277 ( in Chinese )[ 方晖、罗 罡 2001 仪器仪表学报 **22** 277 ]
- [ 17 ] Liu W Y ,Wang Z Q ,Mu G G 2000 *J. Optoelectronics · Laser* **11** 179 ( in Chinese )[ 刘维一、王肇圻、母国光 2000 光电子·激光 **11** 179 ]

## A method of color image single-channel encryption \*

Gao Li-Juan<sup>1)</sup> Yang Xiao-Ping<sup>1)†</sup> Li Zhi-Lei<sup>2)</sup> Wang Xiao-Lei<sup>2)</sup> Zhai Hong-Chen<sup>2)</sup> Wang Ming-Wei<sup>2)</sup>

1) *School of Electronics Information and Communications Engineering , Tianjin University of Technology , Tianjin 300191 , China*

2) *Institute of Modern Optics , Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology of Ministry of Education of China , Nankai University , Tianjin 300071 , China*

( Received 24 April 2008 ; revised manuscript received 7 July 2008 )

### Abstract

A new method for color image single-channel encryption is proposed. According to tricolor grating theory , a color image is encoded into a gray scale image , and then the gray scale image is encrypted by double-phase encoding. Thus by combining multi-channel with single-channel , only one laser is needed for encryption. With this method , both single-channel encryption and high security are ensured , and the system is simpler and more practical. Computer simulation proves the validity of the proposed method.

**Keywords** : color image , single-channel encryption , tricolor grating , double-phase method

**PACC** : 4425F , 4230K

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60577017 and 60777007 ) and the Opening Subject of Key Laboratory of Optoelectronic Information Science & Technology of Ministry of Education of China ( Grant No. 2005-14 ).

† Corresponding author. E-mail : yangxiaoping@tsinghua.org.cn