



## 论文

## 基于荧光时间分辨相图分析的人民币鉴伪技术

白玉磊<sup>①</sup>, 陈辞<sup>①</sup>, 周延周<sup>①\*</sup>, 屈军乐<sup>②</sup>, 何竞松<sup>①</sup>, 林乐荣<sup>①</sup>, 林祥辉<sup>①</sup>, 林纯弟<sup>①</sup><sup>①</sup> 广东工业大学自动化学院, 广州 510006;<sup>②</sup> 深圳大学光电学院, 深圳 518060

\*联系人, E-mail: zhouyanzhou@hotmail.com

收稿日期: 2012-08-31; 接受日期: 2013-01-07

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11072063)

**摘要** 人民币鉴伪技术的关键之一是造币用紙的检测. 本文提出了测量人民币用紙荧光时间分辨过程的鉴伪新方法, 采用了双光子共焦扫描荧光时间分辨显微成像的实验方案, 提出了极坐标相图分析法, 测量和分析了人民币真鈔和伪鈔用紙的平均荧光寿命. 人民币真鈔用紙的荧光时间分辨过程符合双指数衰减模型, 各种面值人民币的平均荧光寿命相差不大, 但是伪鈔的平均荧光寿命与真鈔的相差明显. 实验结果证明基于荧光时间分辨过程极坐标相图分析的人民币鉴伪技术不受鈔票的新旧程度、机械皱褶、损伤和表面污染物的影响, 其测量方法灵敏、实用, 检测装置可靠, 能够有效地鉴别出人民币的真伪.

**关键词** 人民币, 人民币鉴伪, 荧光时间分辨成像, 荧光寿命, 相图分析法

**PACS:** 32.50.+d, 33.50.-j, 07.60.-j

**doi:** 10.1360/132012-747

人民币是国家名片. 就对单一物品的假冒而言, 无论在金额规模, 还是涉及人员数量, 假人民币对社会的危害都是最大. 人民币鉴伪方法包括人防和机防两类, 人防可以概括为凭人的“一看、二摸、三听”的经验. 常用的机防鈔票鉴伪方法是紫外光激发鈔票荧光标志区的荧光光强判别法<sup>[1]</sup>, 但是这种方法已经使用几十年, 十分陈旧, 理论上使用喷墨打字机在伪鈔上按图案喷上荧光物质就可以达到乱真效果.

目前, 造假技术不断改进, “创新性”强, 高仿伪鈔频频出现, 而人民币鉴伪技术却停止不前. 以“荧光”为关键词, 2001–2012年之间万方数据知识服务平台查论文有 48418 篇. 以几乎没有实际应用的数学方

面的“混沌”为关键词, 查论文有 16220 篇. 以“纸币防伪”、“纸币鉴伪”、“人民币鉴伪”和“人民币防伪”为关键词, 查论文有 11 篇. 不仅论文数量很少, 而且它们都属于技术原理简单、创新性弱或实用性差的方法. 人民币鉴伪方法的研究现状和技术储备与伪鈔存在的现实之间有很大的落差, 打击伪鈔的现实形势十分严峻. 这些促使本文进行人民币鉴伪新方法研究, 并把目光集中在人民币用紙的化学物理性质检测方面.

当有些物质受短波长激发光照射时, 吸收光能后进入激发态, 发出比激发光波长长的荧光<sup>[2]</sup>, 很多有机物质都可以发出荧光. 真鈔和伪鈔的最大区别

**引用格式:** 白玉磊, 陈辞, 周延周, 等. 基于荧光时间分辨相图分析的人民币鉴伪技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 718–724  
Bai Y L, Chen C, Zhou Y Z, et al. RMB identification using the polar phasor approach on the time-resolved fluorescence (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 718–724, doi: 10.1360/132012-747

就是造币用纸. 人民币的纸张材料主要成分是优质短棉绒和高质量木浆, 不添加荧光增白剂, 呈自然洁白色<sup>[1]</sup>. 美元纸张材料的主要成分是 80% 的棉和 20% 的亚麻纤维, 不含增白剂, 呈本白色<sup>[3]</sup>. 而普通印刷纸的原料来源复杂, 添加荧光增白剂, 荧光很强. 虽然真钞用纸的荧光很弱, 使用荧光单光子技术方法 (TCSPC) 仍然可以准确测量.

荧光有两方面特征: (1) 荧光光强与荧光材料本身性质有关, 也与材料的浓度有; (2) 荧光时间分辨过程, 当荧光物质被激发后, 该物质的分子/分子团吸收能量后从基态跃迁到激发态上, 再以辐射跃迁的指数形式发出荧光回到基态, 这就是荧光时间分辨过程. 分子/分子团在激发态停留的平均时间是它的荧光寿命, 通常在 1–100 ns 范围内. 分子/分子团的荧光寿命与其浓度和荧光光强无关, 仅与能级有关, 是它的特征信号 (Signature)<sup>[2,4,5]</sup>. 如果荧光分子淬灭 (动、静态淬灭和能量转移等淬灭) 后, 其荧光寿命将缩短<sup>[2,4,5]</sup>. 此时, 由于物质体系内还存留没有淬灭的正常荧光分子, 保持较长的正常荧光寿命, 所以这时荧光过程是长、短双指数荧光衰减过程. 荧光时间分辨技术已经在生命科学的活体细胞、蛋白质和核酸分析中得到应用<sup>[4,5]</sup>.

2009 年, Chia 等人<sup>[3]</sup>使用双光子荧光时间分辨显微镜检测了  $\sim 4 \text{ mm}^2$  的真伪美元钞票 (U.S. Federal Reserve Note) 用纸的荧光寿命特征, 发现 1 美元、20 美元、50 美元和 100 美元的真钞票用纸一致性很好, 都是双指数荧光衰减模型, 较短的荧光寿命  $\tau_1 = (162 \pm 4.6) \text{ ps}$ , 较长的荧光寿命  $\tau_2 = (2010 \pm 64) \text{ ps}$ , 测量结果具有高度的重复性. 美元伪钞有单、双指数模型; 漂白的伪钞是双指数模型, 数字打印伪钞是单指数模型, 由棉花、树皮和麻线分别制成的纸都是单指数模型, 但是它们的荧光寿命各不相同. 因此根据荧光寿命分布就可以辨识出真伪美元.

使用荧光时间分辨的钞票鉴伪技术的优点是非接触和非破坏性检测, 抗干扰能力极强. 测量结果与钞票的机械皱褶和损伤、新旧程度和表面污染物情况无关, 是一种实用性强的新技术. 2010 年, 英国著名杂志 *Nature* 系列期刊的 *Nature Photonics* (影响因子: 26.4) 发表的专题评论文章: Counterfeiting: The fluorescence of fraud”, 高度评价 Chia 等人的工作, 指出: It is believed that the technique may be useful for forensic science laboratories for examining very high-quality

counterfeits<sup>[6]</sup>.

由于指数衰减函数不是正交函数序列, 对于多指数信号分离是一个数学难题. Chia 等人使用了传统的非线性最小二乘法全局拟合的方法分离单、双指数过程, 但是这种方法计算迭代复杂, 对初始条件敏感, 收敛性差<sup>[7]</sup>. 2004 年, Clayton, Hanley 等人<sup>[8]</sup>运用傅里叶变换的相图分析法成功地将两个单指数的荧光时间分辨混合过程的每一个单指数衰减的荧光寿命分离出来. 由于相图分析法不需要数据全局非线性最小二乘法拟合, 不需要事先确定多指数衰减模型和初始条件, 因此生命科学研究中使用相图分析法荧光时间分辨图像成为研究热点. 2008 年, Digman 等人<sup>[7]</sup>发展了相图分析轨迹对照方法, 这是相图分析法从理论走向实用道路上的一座里程碑. 在深入研究相图分析法的数学原理之后, 2009 年和 2011 年, 广东工业大学周延周等人<sup>[9,10]</sup>将相图分析法推广到荧光时间分辨的动态各向异性显微成像方面. 从 2000 年到目前为止, 有关相图分析法的文章超过百篇, 由于数量太多, 参考文献未列出.

在 Chia 等人的研究启发下, 基于作者在国内外相关领域的研究经验, 本文将生命科学常用的荧光时间分辨分析技术引入到公共安全领域, 提出基于双光子荧光时间分辨成像技术的极坐标相图分析的人民币鉴伪新方法. 与 Chia 等人使用的非线性最小二乘法全局拟合的方法相比, 极坐标相图分析法可以自动计算样品的荧光寿命分布, 无任何初始条件, 收敛性好, 计算效率高, 自动区分真伪钞, 同时在相空间上每个点都有物理意义. 实验结果表明, 极坐标相图分析法在鉴定人民币真伪钞票方面性能优异, 值得推广使用.

## 1 荧光时间分辨过程的极坐标相图分析法

当用脉冲光激发荧光样品时, 样品发射的荧光光强将随时间呈指数衰减

$$I(t) = \sum_{i=1}^q \alpha_i \cdot \exp\left[-\frac{t}{\tau_i}\right]. \quad (1)$$

式中,  $\alpha_i$  和  $\tau_i$  分别为第  $i$  个荧光分子或荧光分子团的初始光强和荧光寿命. 式(1)傅里叶变换为

$$\tilde{I}(f) = \sum_{i=1}^q \frac{\alpha_i \cdot \tau_i}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_i^2}} \cdot \exp\left[-i \cdot \tan^{-1}(2\pi \cdot \tau_i \cdot f)\right]. \quad (2)$$

式中,  $f$  为频率. 调制深度  $m(f)$  和激发光与发射荧光的相角差  $\Delta\varphi(f)$  为

$$m(f) = \frac{|\tilde{I}(f)|}{|\tilde{I}(0)|}, \quad (3)$$

$$\Delta\varphi(f) = -\tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[\tilde{I}(f)]}{\text{Re}[\tilde{I}(f)]} \right\}.$$

式中,  $|\bullet|$ ,  $\text{Re}(\bullet)$  和  $\text{Im}(\bullet)$  分别表示  $\tilde{I}(f)$  或者  $\tilde{I}(0)$  的幅值、实部和虚部. 对于特定频率  $f_0$ , 可以作如下处理:

$$\rho = \sqrt{\left\{ m(f_0) \cdot \cos[\Delta\varphi(f_0)] - 0.5 \right\}^2 + \left\{ m(f_0) \cdot \sin[\Delta\varphi(f_0)] \right\}^2},$$

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{m(f_0) \cdot \sin[\Delta\varphi(f_0)]}{m(f_0) \cdot \cos[\Delta\varphi(f_0)] - 0.5} \right\}. \quad (4)$$

式中,  $\rho$  和  $\theta$  为极径和极角组成极坐标相空间. 其中  $\rho$  的物理意义是样品荧光过程偏离单指数衰减的程度, 样品的荧光寿命或者平均荧光寿命与  $\theta$  有关

$$\tau_\theta = \frac{1}{2\pi \cdot f_0} \sqrt{\frac{1 - \cos(\theta)}{1 + \cos(\theta)}}. \quad (5)$$

如果荧光时间分辨光强  $I(t)$  为单指数衰减过程, 其映射到极坐标相空间的位置为单位圆上一点; 如果  $I(t)$  为多指数衰减函数, 其映射到极坐标相空间的位置为圆内一点, 该点为各个独立的单指数衰减函数相应映射点  $(\rho_i, \theta_i)$  的线性组合. 特别地, 如果荧光光强为双指数衰减函数, 那么式(1)可以化简为

$$I(t) = \alpha_1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + \alpha_2 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right). \quad (6)$$

其映射到极坐标相空间的位置  $(\rho, \theta)$  位于单位圆的一根弦上, 如图 1 所示. 弦的两端端点  $P(0.5, \theta_1)$  和  $Q(0.5, \theta_2)$  分别代表  $\tau_1$  和  $\tau_2$  单独存在的单指数过程 ( $\tau_1 > \tau_2$ ). 此时两个独立单指数衰减过程的初始荧光强度  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  以及它们各自的荧光寿命  $\tau_1$  和  $\tau_2$  满足下式:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\sin(\theta_2 - \theta)}{\sin(\theta - \theta_1)} \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}. \quad (7)$$

式(7)表明荧光时间分辨过程  $I(t)$  的初始光强比例取决于两个独立单指数衰减过程的荧光寿命以及它们之间的极角差. 式(1)–(7)就是荧光时间分辨过程的极坐标相图分析法.

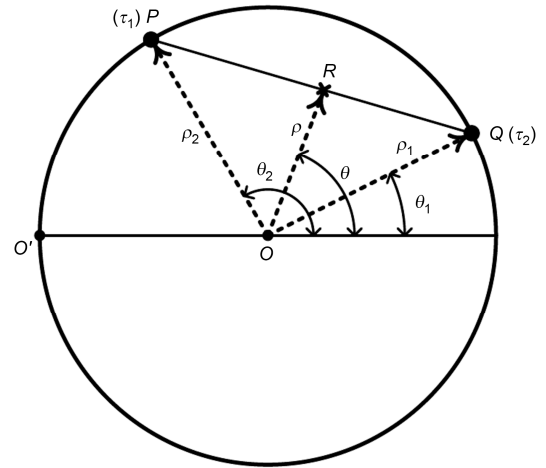


图 1 荧光时间分辨过程的极坐标相图空间  
Figure 1 The time-resolved fluorescence process in the phasor space.

需要特别指出的是, 上述极坐标相图分析法对于单、双光子荧光时间分辨过程均适用.

## 2 双光子共焦扫描荧光寿命成像实验

### 2.1 仪器原理

本文使用双光子共焦扫描荧光时间分辨显微成像技术测量人民币用纸的荧光时间分辨衰减过程, 与单光子技术不同的是使用两个长波长的光子激发荧光样品发射一个短波长的光子<sup>[2]</sup>. 两者相同的是都是使用单光子计数技术在空间上逐点扫描, 成像出样品荧光强度随时间衰减的过程. 双光子共焦扫描荧光寿命显微成像技术主要有以下三方面特点<sup>[2]</sup>:

- (1) 有效消除大量非焦点处的光对成像的影响, 信噪比高;
- (2) 深度方向的探测距离更大;
- (3) 缺点是量子产率低.

### 2.2 实验仪器与测试样品

本文研究使用 790 nm 的飞秒脉冲钛宝石激光器进行双光子激发, 脉宽 120 fs, 功率 550 mW. 荧光时间分辨测量装置是 B&H 150 TCSPC 单光子计数系统<sup>[11]</sup>, 时间响应 63 ps, 荧光发射光谱范围 450–600 nm. 本研究采用 2 mm×2 mm 的不同新旧程度、不同机械皱褶和不同表面附着物的 1 角、5 角、1 元和 100 元人民币的真钞钞票非荧光标志区样品 4 组和 2 mm×2 mm 100 元伪人民币非荧光标志区样品 1 组作为

测试样品. 首先将真钞和伪钞样品分别固定到 1.25 mm 厚的载玻片上, 然后分别将载玻片固定在 Leica 共焦显微镜的工作台上, 共焦显微镜在  $z$  方向扫描 10 层, 每层扫描距离为 15  $\mu\text{m}$ , 在  $z$  方向上共扫描 150  $\mu\text{m}$ , 将荧光最强的断层图像进行下面的分析处理.

### 3 实验结果与讨论

将真钞和伪钞的非荧光标志区的扫描数据分别进行光子数统计, 图 2 给出它们的荧光随时间的衰减曲线. 去除直流分量以后采集到的真钞光子数目大约是伪钞的 1/4 左右, 荧光明显偏弱, 这与假钞纸张性质吻合.

下面将傅里叶空间上的分析频率固定为  $f_0=80$  MHz, 分别对真钞和伪钞的荧光时间分辨过程进行极坐标相图分析. 考虑到真钞的纸张原材料不含荧

光增白剂, 荧光较弱, 因此本文将每帧图像的每行 256 个像素合并为一个时间信道, 光子数目增加 16 倍, 从而提高了数据分析的信噪比. 1 角、5 角、1 元、100 元真钞在极坐标相空间的点云分布如图 3(a)–(d) 所示, 它们分布中心位置分别为  $(0.3965, 81.74^\circ)$ ,  $(0.4200, 83.95^\circ)$ ,  $(0.4235, 80.54^\circ)$  和  $(0.3949, 83.56^\circ)$ . 根据式(5), 它们各自的平均荧光寿命  $\tau_\theta$  分别为  $(1715.0 \pm 48)$  ps,  $(1789.7 \pm 66)$  ps,  $(1685.4 \pm 23)$  ps 和  $(1777.5 \pm 18)$  ps.

本次实验中 4 组真钞的新旧程度、机械皱褶和表面附着物情况各不相同, 而它们在极坐标相空间的位置和平均荧光寿命基本相同, 平均荧光寿命相差最大值仅为 5.82%, 真钞用紙的平均荧光寿命测量重复性好, 受外界因素影响较小, 测量和分析方法的抗干扰能力强. 一般的钞票鉴别技术主要利用紫外光激发钞票荧光标志区, 从而根据荧光光强进行鉴别,

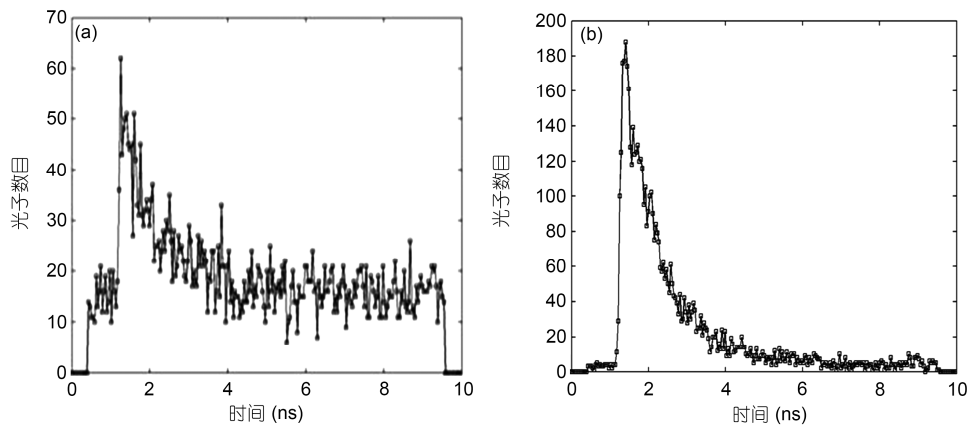


图 2 真伪钞的荧光时间分辨过程

(a) 真钞; (b) 伪钞

Figure 2 The time-resolved fluorescence processes of the genuine and counterfeit RMB banknotes: (a) genuine RMB banknotes; (b) counterfeit RMB banknote.

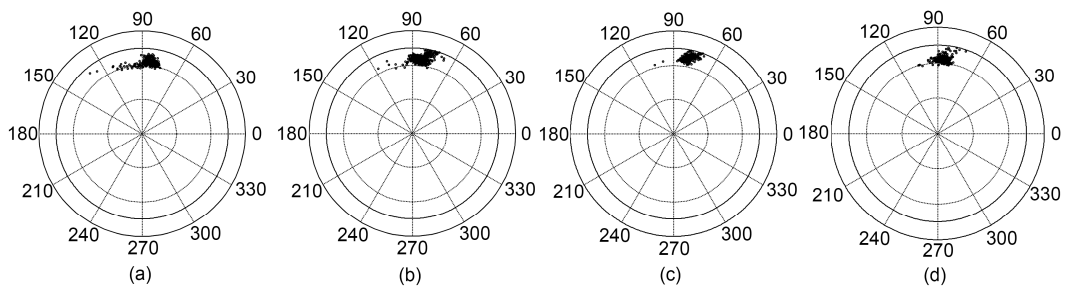


图 3 真钞的极坐标相空间点云图

(a), (b), (c)和(d)分别为 1 角、5 角、1 元、100 元真钞的时间分辨荧光的极坐标相空间点云图

Figure 3 The point-cloud data of genuine RMB banknotes in the phasor space: (a), (b), (c) and (d) are time-resolved fluorescence processes of 10 cents, 50 cents, 1 yuan and 100 yuan, respectively.

但是荧光光强受诸如激发光强等外界因素影响较多. 因此, 使用荧光时间分辨的钞票鉴伪技术大大优于紫外光激发钞票荧光标志区的荧光光强判别法.

为了与伪钞荧光时间分辨过程的极坐标相空间位置作比较, 现将4组真钞的荧光时间分辨数据合并为1组, 其在极坐标相图空间上的归一化直方统计分布. 如图4中所示, 它是近似椭圆高斯分布, 这是典型的双指数衰减的荧光时间分辨过程<sup>[12]</sup>. 真钞的归一化直方统计分布中心所对应的极坐标相空间位置为 $(0.4090, 82.41^\circ)$ , 根据式(5), 真钞的平均荧光寿命 $\tau_\theta = (1741.8 \pm 68)$  ps. 本文对真钞荧光时间分辨过程在极坐标相空间上椭圆点云分布进行霍夫变换<sup>[13]</sup>, 得到一系列彼此相交的正弦曲线簇, 相交数量最多的一个交点就是椭圆的长轴, 变换回极坐标相空间后, 如图4中直线所示. 该直线与圆的两个交点分别为点 $B(0.5, 34.76^\circ)$ 和点 $A(0.5, 103.3^\circ)$ , 根据式(5), 人民币的两个独立单指数过程的荧光寿命分别为 $\tau_1 = 623$  ps和 $\tau_2 = 2515$  ps. 伪钞荧光时间分辨过程在极坐标相空间上的归一化直方统计分布如图4所示. 伪钞的归一化直方统计分布最大值所对应的极坐标相空间位置为 $(0.4523, 48.81^\circ)$ . 根据式(5), 伪钞的荧光平均寿命 $\tau_\theta = (903 \pm 24)$  ps, 与Chia测量的木浆纸荧光寿命 $\tau_\theta = (919 \pm 56)$  ps几乎一样, 说明本实验的伪钞用纸是普通的木浆纸, 同时也证明了本文研究进行的双光子荧光寿命实验测量结果的准确性.

上述实验结果表明真钞与伪钞的 $\theta$ 值、平均荧光寿命 $\tau_\theta$ 差别较大, 这是因为伪钞制造者由于受到条件限制, 用纸多采用木浆纸或者其他杂纸, 其材料与真钞用纸的材料差异明显. 因此, 平均荧光寿命是真钞用纸区别于伪钞用纸的一个典型特征. 人民币用纸的荧光双指数分布中的较长荧光寿命2515 ps与美元

的较长荧光寿命2010 ps接近, 说明了人民币的用纸选材和工艺与美元具有一定的相似性. 由于人民币与美元用纸都含有棉绒, 故较长的荧光寿命值是棉绒的荧光信号<sup>[3]</sup>. 人民币的较短荧光寿命623 ps与美元的162 ps的区别较大, 这说明了人民币与美元的用纸材料并不是完全相同的. 美元用纸的较短荧光寿命162 ps是荧光物质深度淬灭以后的特征<sup>[2]</sup>, 大幅度低于各种伪钞用纸材料的荧光寿命600–800 ps, 前后两者差别明显, 该特征可以用于美元鉴伪. 但是人民币较短的荧光寿命623 ps与伪钞用纸材料相差不大, 说明人民币对用纸未作深度荧光淬灭处理, 与美元用纸在防伪方面仍存在一定的差距.

图5(a)–(f)是真伪钞的平均荧光寿命 $\tau_\theta$ 、极坐标相空间的极径 $\rho$ 和极角 $\theta$ 的概率密度分布图. 如图5(a), (d)所示, 真伪钞平均荧光寿命的概率密度分布为正态分布, 真伪钞分布中心点相差为854 ps; 真钞的概率密度较小, 其最大值为3.25, 半宽高度(FWHM)为258 ps; 假钞的概率密度较大, 其最大值分别为55.7, 半高宽度(FWHM)仅为6 ps. 上述测量结果说明真钞用纸无荧光增白剂, 荧光由用纸材料本身产生, 荧光较弱, 荧光寿命分布范围较宽, 而假钞用纸添加荧光增白剂, 荧光较强, 荧光增白剂构成组分单一, 荧光寿命分布范围相对集中. 这是真钞用纸区别于伪钞用纸的另一个典型特征. 如图5(b), (e)所示, 真伪钞在相空间上极径概率密度最大值所对应的极径分别为0.420和0.458, 表示它们偏离荧光单指数过程的程度相近. 图5(c), (f)是真伪钞在极坐标相空间的极角 $\theta$ 的概率分布. 极角和平均荧光寿命的关系见方程(5), 它们不是线性关系, 因此极角的概率分布不是正态分布, 但是与平均荧光寿命的概率分布形状相似.

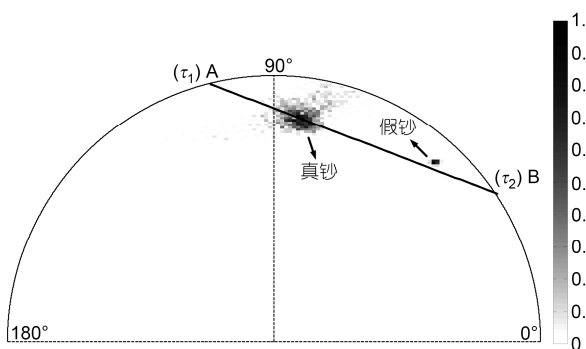


图4 极坐标相空间上真伪钞的归一化直方统计图

Figure 4 The normalized histogram of the genuine and counterfeit RMB banknotes in the phasor space.

## 4 结论

在Chia等人<sup>[3]</sup>研究的启发下, 基于作者在荧光时间分辨成像领域的研究基础和经历<sup>[9,10]</sup>, 本文将生命科学常用的荧光时间分辨分析技术引入到公共安全领域, 使用荧光双光子共焦扫描显微成像技术, 提出极坐标相图分析人民币鉴伪新方法, 并通过实验验证其方案可行. 相比传统的人民币鉴伪方法, 本文提出的人民币鉴伪方法具有测量结果灵敏、可靠、抗干扰能力强和实用性好等优点. 测量之前不需要对人民币进行任何处理, 属于无损检测. 测量结果与钞票的机械皱褶和损伤、新旧程度和表面污染物情况无

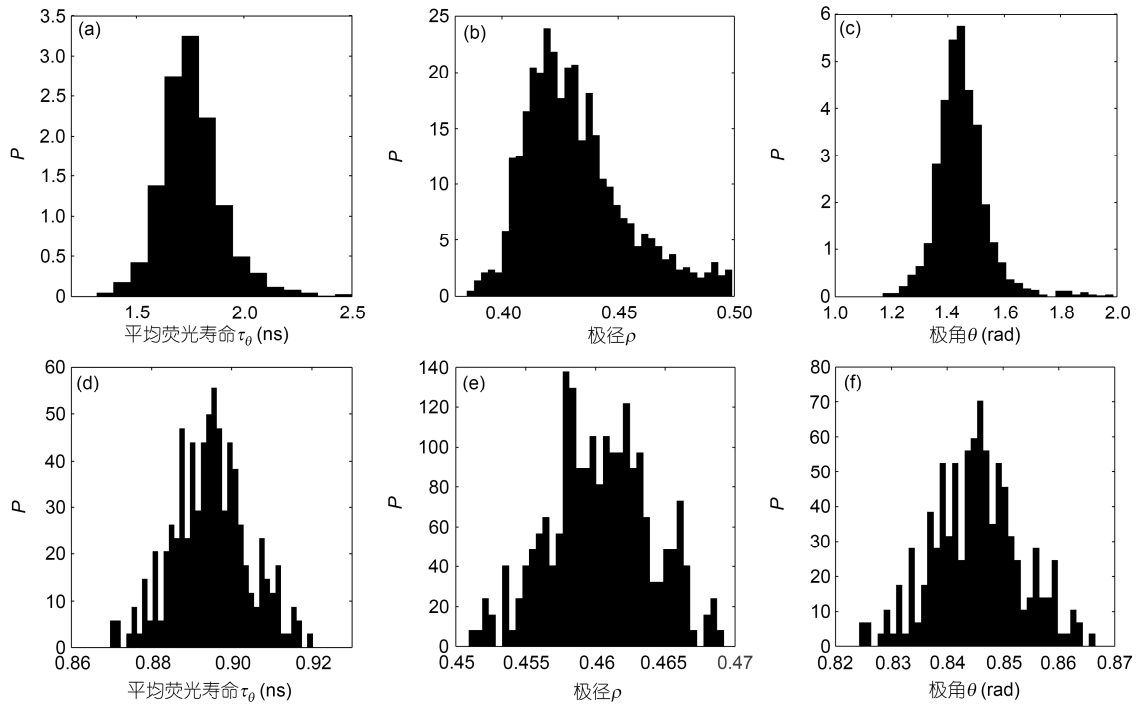


图5 极坐标相空间上真伪钞的概率密度分布图

(a), (b), (c)分别代表真钞平均荧光寿命  $\tau_\theta$ 、极径  $\rho$  和极角  $\theta$  的概率密度分布图; (d), (e), (f) 分别代表伪钞平均荧光寿命  $\tau_\theta$ 、极径  $\rho$  和极角  $\theta$  的概率密度分布图

**Figure 5** The probability density distributions of the genuine and counterfeit RMB banknotes in the phasor space: (a), (b), (c) are the probability density distributions of the fluorescence average lifetime  $\tau_\theta$ , polar radius  $\rho$  and polar angle  $\theta$  for the genuine RMB banknotes, respectively; (d), (e), (f) are the probability density distributions of the fluorescence average lifetime  $\tau_\theta$ , polar radius  $\rho$  and polar angle  $\theta$  for the counterfeit RMB banknotes, respectively.

关, 即使是将真钞的图案用化学药水去掉, 再重新印制的伪钞, 本方法仍可准确辨识出因使用化学药水导致钞票用纸化学性质发生的变化。

本文研究与 Chia 研究相同部分是都使用了荧光双光子共焦扫描荧光时间分辨显微成像技术来测量钞票用纸的荧光时间衰减<sup>[3]</sup>。本文研究与 Chia 研究不同部分有以下两个方面。

(1) 首次实现了人民币用纸的荧光寿命测量。发现: 1) 人民币真钞的荧光时间分辨过程符合双指数衰减模型, 其中较长的荧光寿命可以作为真钞的特征标识; 2) 人民币真伪钞在极坐标相空间位置以及它们的平均荧光寿命相差明显, 这是人民币真钞用纸区别于伪钞用纸的典型特征之一; 3) 人民币真伪钞的平均荧光寿命的概率密度相差较大, 这是人民币真钞用纸区别于伪钞用纸的典型特征之二。

(2) 提出了荧光时间分辨过程的极坐标相图分析法。与 Chia 的非线性最小二乘全局拟合的方法相比, 无任何初始条件, 自动分析钞票的荧光寿命分布

和区分真钞和伪钞, 计算效率高。与传统相图分析法相比, 物理意义明确, 在整个相图空间都有荧光寿命定义; 可以描述多指数过程的跨越第三、四象限情况; 两个坐标基矢量的正交性优于传统相图分析法。

本文和 Chia 研究都有不足之处, 就是使用荧光双光子探测原理, 量子产率低。如果改用荧光单光子探测, 对于检测荧光较弱的钞票用纸更合适。本文研究的未来发展方向是使用光谱分辨的荧光寿命和荧光各向异性技术<sup>[9]</sup>, 进行人民币用纸的进一步研究和分析, 并且将之仪器化。

由于荧光寿命是化学物质的“指纹”, 荧光时间分辨测量可以准确辨识出人民币用纸的变化。在人民币鉴伪方面, 基于荧光寿命极坐标相图分析法的人民币鉴伪新方法不仅是一种新研究方法, 更重要的它是一种实用方法, 特别适合于鉴别高仿真伪钞。在目前人民币伪钞泛滥, 鉴伪技术研究严重缺乏的情况下, 本文的研究对提高人民币真伪识别技术水平起到推动作用。

**致谢** 感谢 Dr. Christoph Gohike (from the University of California, Irvine, U.S.A.)的耐心和无私帮助, 提供.sdt 数据格式转换为.txt 数据格式的方法和基于 Python 语言的数据转换程序.

## 参考文献

---

- 1 马继刚. 新旧版第五套人民币防伪特征的比较研究. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2006, 47: 46–51
- 2 Lakowicz J R. Principles of Fluorescence Spectroscopy. New York: Springer, 2006
- 3 Chia T H, Levene M J. Detection of counterfeit U. S. paper money using intrinsic fluorescence lifetime. Opt Express, 2009, 17(24): 22054–22061
- 4 Berezina M Y, Achilefu S. Fluorescence lifetime measurements and biological imaging. Chem Rev, 2010, 110(5): 2641–2684
- 5 Jares-Erijman E A, Jovin T M. FRET imaging. Nat Biotechnol, 2003, 21(11): 1387–1395
- 6 Horiuchi N. Counterfeiting: The fluorescence of fraud. Nat Photonics, 2010, 4(2): 72
- 7 Digman M A, Caiolfa V R, Zamai M, et al. The phasor approach to fluorescence lifetime imaging analysis. Biophys J, 2008, 94(2): 14–16
- 8 Clayton A H, Hanley Q S, Verveer P J. Graphical representation and multicomponent analysis of single-frequency fluorescence lifetime imaging microscopy data. J Microsc, 2004, 213: 1–5
- 9 Zhou Y, Dickson J M, Hanley Q S. Imaging lifetime and anisotropy spectra in the frequency domain. J Microsc, 2009, 234(1): 80–88
- 10 Zhou Y, Wang Q, He J, et al. Spectral imaging of time-resolved anisotropy: Theory and experiment. Chin Opt Lett, 2010, 8(10): 937–939
- 11 (德)Becker W. 高级时间相关单光子计数技术. 屈军乐, 译. 北京: 科学出版社, 2009
- 12 Schlachter S, Schwedler S, Esposito A, et al. A method to unmix multiple fluorophores in microscopy images with minimal a priori information. Opt Express, 2009, 17(25): 22747–22760
- 13 Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008

## RMB identification using the polar phasor approach on the time-resolved fluorescence

BAI YuLei<sup>1</sup>, CHEN Ci<sup>1</sup>, ZHOU YanZhou<sup>1\*</sup>, QU JunLe<sup>2</sup>, HE JingSong<sup>1</sup>, LIN LeRong<sup>1</sup>,  
LIN XiangHui<sup>1</sup> & LIN ChunDi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

<sup>2</sup> College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

One of the key technologies to identify RMB banknotes is to detect its paper tissue. In this paper, using two-photon fluorescence confocal microscopy, a new RMB identification technology based on the polar phasor approach of the fluorescence lifetime is put forwards. This is the first time that the polar phasor approach has been applied to analyze the average fluorescence lifetime of the genuine and counterfeit RMB banknotes, respectively. The time-resolved fluorescence process of the genuine banknote conforms to the double-exponential decay model. There are almost no differences among the average fluorescence lifetimes of the various denominations of RMB genuine banknotes; however, the difference of the average fluorescence lifetimes between the genuine and counterfeit banknotes is significant. The experimental results show that the RMB identification technology cannot be affected by the circulation time, mechanical crease, injury, and surface pollutant on the banknotes. The measurement method is sensitive, and the device is reliable; therefore, it can identify the RMB genuine and counterfeit banknotes effectively and practically.

**RMB, RMB identification, time-resolved fluorescence imaging, fluorescence lifetime, phasor approach**

**PACS:** 32.50.+d, 33.50.-j, 07.60.-j

**doi:** 10.1360/132012-747