

基于 Walsh-Hadamard 变换的单像素遥感成像

李明飞 莫小范 赵连洁 霍娟 杨然 李凯 张安宁

Single-pixel remote imaging based on Walsh-Hadamard transform

Li Ming-Fei Mo Xiao-Fan Zhao Lian-Jie Huo Juan Yang Ran Li Kai Zhang An-Ning

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 064201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.064201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低频标准真空涨落的测量

Measurement of standard vacuum noise at low frequencies

物理学报.2016, 65(4): 044211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044211>

基于激光散斑成像的零件表面粗糙度建模

Surface roughness modeling based on laser speckle imaging

物理学报.2015, 64(23): 234203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234203>

基于阿秒抖动光纤锁模激光器的时钟同步

Timing synchronization based on mode-locked fiber lasers with attosecond timing jitter

物理学报.2015, 64(22): 224209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224209>

光纤激光经过模清洁器后的强度噪声分析

Intensity noise analysis of a fibre laser after passing through an optical mode cleaner

物理学报.2014, 63(19): 194203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194203>

自旋相干态变换和自旋-玻色模型的基于变分法的基态解析解

Spin coherent-state transformation and analytical solutions of ground-state based on variational-method for spin-Bose models

物理学报.2013, 62(11): 114205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114205>

基于Walsh-Hadamard变换的单像素遥感成像*

李明飞 莫小范 赵连洁 霍娟 杨然 李凯 张安宁†

(中国航天科技集团公司, 北京航天控制仪器研究所, 北京 100094)

(中国航天科技集团公司, 量子工程研究中心, 北京 100094)

(2015年11月13日收到; 2015年11月30日收到修改稿)

本文提出了基于Walsh-Hadamard变换的单像素成像方案, 并从理论分析、模拟仿真和实验验证三方面分别验证了该方案的可行性. 实验上实现了350—900 nm波段对距离500 m和5000 m自然目标的 128×128 像素成像, 成像速度0.5帧/秒. 研究并讨论了单像素相机方案与计算量子成像方案的差异与共性, 在此基础上分析了基于Walsh-Hadamard变换的单像素成像方案的优势与局限性. 研究表明本方案同时适用于单像素相机和计算量子成像. 由于单像素成像适用于应用在如红外热成像、微波成像等波段, 因此在阵列探测器灵敏度或工艺达不到要求时存在优势. 本文所提出的方案使得单像素成像技术向实际应用迈进了一步.

关键词: Walsh-Hadamard变换, 单像素相机, 计算量子成像

PACS: 42.50.Lc, 42.30.Va, 42.30.Ms

DOI: 10.7498/aps.65.064201

1 引言

近年来, 单像素成像技术作为一种新型成像技术已引起越来越多的关注. 单像素成像主要涉及两个研究领域: 量子成像领域和基于压缩感知原理的单像素相机领域. 量子成像领域最早追溯到1995年, 美国马里兰大学史砚华小组用纠缠光子对在实验上实现了非定域的成像技术, 被称为量子成像^[1,2]. 但随后研究发现量子成像并不依赖纠缠光源, 利用非泊松分布的光源都可实现量子成像^[3-5]. 量子成像最初的方案需要二维相机辅助记录光场瞬时强度分布, 通过二阶强度关联算法实现图像重建. 2008年, 美国麻省理工学者Shapiro^[6]提出计算量子成像, 可实现真正意义上的单像素成像, 很大程度上推进了单像素成像技术的实用化研究. 而另一研究领域中, 单像素相机方案最早在2008年被美国Rice大学的研究小组提出, 并在实验上得到了原理验证^[7]. 单像素相机方案基于压缩感知算法, 研究的主要目标聚焦在压缩感知算法在

图像方面的应用, 力求实现传统相机的成像效果.

计算量子成像方案与单像素相机方案都可实现单像素成像, 而各自的优势是: 计算量子成像方案强调光源的调制和主动照射目标, 接收端可用单像素探测器, 重建算法可采用二阶关联算法或压缩感知算法^[8,9]; 单像素相机方案强调在接收端放置镜头实现成像, 对所成图像进行调制, 然后由单像素探测器收集, 主要利用压缩感知算法进行图像重建. 计算量子成像已被实验证实可以突破接收镜头衍射极限成像, 成像可抗大气湍流和弱散射介质的影响^[10-12]; 单像素相机最大优势是实现高灵敏度的成像. 两者的共同点是: 可利用单像素探测器实现二维或三维成像^[13], 可在二维阵列探测器难以成像的领域发挥作用.

尽管压缩感知算法在单像素成像领域发挥着重大作用, 其总测量次数仅为奈奎斯特采样极限的三分之一左右即可重建出目标图像^[14,15], 但是压缩感知算法是非线性迭代算法且重建效果与所选稀疏基密切相关, 故成像计算时间和稳定性受到极大挑战, 同时压缩感知算法必须先测量得到完整信

* 国家自然科学基金 (批准号: 11204011, 11304007, 60907031, 61501015) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mf_li@sina.cn

号后再计算, 且对计算机硬件要求较高. 相比之下, 在量子成像中得到广泛应用的强度关联算法具有硬件要求低、成像速度快的特点, 但其需要大于奈奎斯特采样极限的测量次数, 采样时间较长.

针对目前单像素成像的时间长、信噪比低、恢复图像稳定性差的缺点, 本文提出了基于 Walsh-Hadamard 变换的单像素成像方案. 该方案具有以下优势: 首先, 利用 Walsh-Hadamard 变换进行图像重建, 算法快速且硬件易于实现; 其次, 采用二值 Hadamard 矩阵作为调制矩阵, 易于在高速空间光调制器件上实现; 第三, 调制矩阵生成速度快且无需存储; 第四, Hadamard 矩阵作为测量矩阵, 其均值不变且具有正交归一特性, 利于光电探测器实现线性响应, 故探测误差小.

本文以下内容主要分为三部分: 第一部分介绍单像素成像理论模型; 第二部分为数值模拟和实验验证; 第三部分为总结.

2 单像素成像理论模型

2.1 实验系统

本文采用单像素相机方案的成像光路作为单像素成像系统. 如图 1 所示: 物体通过透镜 F1 成像到数字微镜器件 (digital micro-mirror device, DMD) 表面. 微镜受数字电路控制系统的控制, 按加载的调制矩阵 \mathbf{A} , 每个微镜发生 $+12^\circ$ 或 -12° 摆动, 摆动方向由矩阵 \mathbf{A} 的矩阵元决定, 例如, 矩阵元 1 对应 $+12^\circ$ 方向翻转, 矩阵元 0 对应 -12° 方向

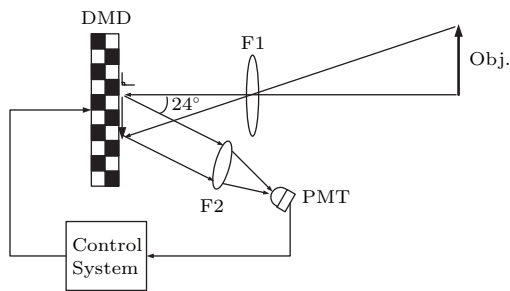


图 1 实验原理示意图 图中 Obj. 表示待成像物体; F1 为成像透镜; DMD 为数字微镜器件; F2 为汇聚透镜; PMT 为光电倍增管; Control System 包括 DMD 控制板、模数转换器、运算器和图像重建算法

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup. The Obj. is the object to be recover; F1 is the imaging lens; DMD is the digital micro-mirror device; F2 is the collection lens; PMT is photon multiply tube; Control System: including the control board of DMD, analog-to-digital converter, arithmetic device and the image recovering algorithms.

翻转. 根据光学反射定律, 垂直入射的光将在 $\pm 24^\circ$ 方向发生反射. 利用透镜 F2 将反射光束汇聚到光电倍增管 (photon multiple turbo, PMT) 上 (或其他光电探测器), 实现光电探测. 若光电探测器的信号为 I_k , 其中 $k = 1, 2, 3, \dots, M$, 则 I_k 为第 k 次探测得到的强度值.

2.2 量子成像方案

假设物体空间绝对透过率函数 $T(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, 式中 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) 代表二维空间位置坐标. 当物体距离透镜 F1 足够远, 根据薄透镜成像高斯公式:

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

其中 S 为像方焦距; S' 为物体距离; f 为透镜 F1 焦距, 直径为 D ; 当 $S = \infty$ 无穷远, $S = f$, 即像面在透镜 F1 焦面的位置. 将 DMD 置于 F1 焦面, 则可对二维图像进行空间调制. 由于自然光源照射到物体表面的光为非相干光, 物体经过透镜成像至 DMD 表面, 透镜成像的传递函数可近似为狄拉克函数 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) . DMD 微镜按调制矩阵实现光学调制, 设第 k 次加载的调制矩阵为 $\mathbf{A}^{(k)}$, $A^{(k)}(m, n)$ 对应调制矩阵元, 即受调制的微镜在矩阵中第 m 行、第 n 列的位置, m, n 均为正整数. 若图像共有 M 行 N 列, 则 $m = 1, 2, 3, \dots, M, n = 1, 2, 3, \dots, N, M \times N = P$ 为图像像素数. 根据光学反射定律, 在 $+24^\circ$ 或 -24° 方向放置收集透镜汇聚所有反射光, 将得到桶探测器强度 $I_B^{(k)}$,

$$I_B^{(k)} = \sum_{(\mathbf{x}, \mathbf{y})} A^{(k)}(m, n) \delta([\mathbf{x} - \mathbf{m}], [\mathbf{y} - \mathbf{n}]) \times T(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \quad (2)$$

其中的上标 (k) 代表第 k 次测量, $[\dots]$ 表示向下取整. 根据量子成像二阶强度关联函数^[12,13] 计算公式:

$$G^{(2)}(m, n) = \langle I_B^{(k)} A^{(k)}(m, n) \rangle = \frac{1}{K} \sum_k I_B^{(k)} A^{(k)}(m, n), \quad (3)$$

其中, K 为总测量次数, 符号 $\langle \dots \rangle \Leftrightarrow \frac{1}{K} \sum_k (\dots)$. 将 (2) 式代入 (3) 式中可得:

$$G^{(2)}(m, n) = \frac{1}{K} \sum_k A^{(k)}(m, n) \left\{ \sum_{(\mathbf{x}, \mathbf{y})} A^{(k)}(m, n) T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \right\} \times \delta([\mathbf{x} - \mathbf{m}], [\mathbf{y} - \mathbf{n}])$$

$$= \frac{1}{K} \sum_k^K \left\{ A^{(k)}(m, n) \sum_{(m, n)} T(m, n) A^{(k)}(m, n) \right\}. \quad (4)$$

为方便分析将(4)式中三维矩阵元 $A^{(k)}(m, n)$ 变为第 k 次测量的二维向量元来理解. 因为共有 K 次测量, 可设总的测量矩阵为 $\mathbf{H}_{K \times P}$, 则第 k 次测量矩阵元与总测量矩阵 $\mathbf{H}_{K \times P}$ 矩阵元对应关系以及恢复图像与变为一维向量时的对应关系, 可表示为

$$A^{(k)}(m, n) \Leftrightarrow \mathbf{H}(k, p), \quad T(m, n) \Leftrightarrow T(p), \\ p = 1, 2, \dots, P. \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式, 可得到

$$G^{(2)}(p) \\ = \frac{1}{K} \sum_k^K \left\{ \mathbf{H}(k, p) \sum_p^P T(p) \mathbf{H}(k, p) \right\} \\ = \sum_p^P T(p) \left\{ \frac{1}{K} \sum_k^K \mathbf{H}(p, k) \mathbf{H}(k, p) \right\} \\ = \sum_p^P T(p) \left\{ \delta(p-k) \frac{1}{K} \sum_k^K \mathbf{H}^2(k, k) \right. \\ \left. + \frac{1}{K} \sum_k^K \mathbf{H}(p, k) \mathbf{H}(k, p) (1 - \delta(p-k)) \right\}. \quad (6)$$

为方便理解, 进一步将(6)式写成方差的形式:

$$G^{(2)}(p) = T(p) \sigma^2(p) \delta(p-k) \\ + \sum_p^P T(p) \sigma^2(p) (1 - \delta(p-k)) \\ + \left\{ \frac{1}{K} \sum_k^K \mathbf{H}(p, k) \right\} \\ \times \left\{ \frac{1}{K} \sum_k^K \sum_p^P T(p) \mathbf{H}(k, p) \right\}, \quad (7)$$

其中, σ^2 定义为总测量矩阵 $\mathbf{H}_{K \times P}$ 的协方差:

$$\sigma^2(p) = \frac{1}{K} \sum_k^K \mathbf{H}(k, p) \mathbf{H}(p, k) \\ - \frac{1}{K} \sum_k^K \mathbf{H}(k, p) \frac{1}{K} \sum_k^K \mathbf{H}(p, k). \quad (8)$$

在传统热光量子成像中, 由于热光源空间各点强度独立同分布, 且统计满足高斯随机分布, 其强度涨落的方差和均值恒定. 若 DMD 按高斯随机分布的调制来实现测量, 根据中心极限定理, 在测量次数 K 较大时, 式中 $\sigma^2(p) \delta(p-k) = \sigma_0^2$,

不再与空间坐标位置有关, σ_0^2 为常数. 同时, $\sigma^2(p) (1 - \delta(p-k)) \rightarrow 0$. 再根据(5)式和(7)式, 可以得到

$$G^{(2)}(m, n) = \sigma_0^2 T(m, n) + \langle I_B^{(k)} \rangle \langle A^{(k)}(m, n) \rangle. \quad (9)$$

在强度涨落关联的量子成像中, 可以将(9)式第二项背景项去掉, 即

$$\Delta G^{(2)}(m, n) \\ = \langle I_B^{(k)} A^{(k)}(m, n) \rangle - \langle I_B^{(k)} \rangle \langle A^{(k)}(m, n) \rangle \\ = \sigma_0^2 T(m, n). \quad (10)$$

至此, 可以得到热光强度关联成像中物体空间绝对透过率函数 $T(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 的重建. 在基于强度涨落关联的量子成像中, 背景噪声得到了滤除, 图像的信噪比和对比度可以很高. 但传统量子成像的问题是测量次数 $K \gg N \times M$, 实际应用中测量次数多则测量时间随之增加, 导致成像时间较长, 难以实现快速成像.

2.3 压缩感知方案

压缩感知 (compressive sensing, CS) 理论由 Candès^[14] 于 2006 年正式提出, 2008 年由美国 Rice 大学在实验室实现单像素成像^[7]. 其原理是: 对稀疏或可压缩的信号进行少量非适应性的线性测量, 可以接近百分之百地恢复出原始信号, 一定意义上突破了 Shannon 采样定理的限制. 基于压缩感知的单像素相机的理论模型可用简洁的矩阵求解来描述. 假设待测图像的向量形式为 $\mathbf{T}_{MN \times 1}$, 测量的信号值与量子成像中的同探测器信号相同, 但需要先得到完整的测量值, 即长度为 K 的一维向量 $\mathbf{I}_B^{(K \times 1)}$, 测量矩阵为 $\Phi_{K \times MN}$, 则有

$$\mathbf{I}_B^{(K \times 1)} = \Phi_{K \times MN} \mathbf{T}_{MN \times 1} + noise, \\ \mathbf{T}_{MN \times 1} = \Psi_{MN \times MN} t'_{MN \times 1}. \quad (11)$$

(11) 式中 $\Phi_{K \times MN}$ 为测量矩阵, $noise$ 为环境和探测器电信号随机噪声, $\Psi_{MN \times MN}$ 为特定稀疏基方阵 (如 Noiselet, DCT 等), $t'_{MN \times 1}$ 为 K 个非零值的稀疏信号, $MN = P$ 为待恢复图像像素数. 因此, 总的测量次数为 K , 等于图像稀疏度. 压缩感知的特点是利用稀疏基将图像变换到稀疏空间, 即大部分灰度值为零的表象, 然后求解方程(11)得到最优解, 反变换到实空间得到恢复图像, 因此所需测量次数 $K \ll MN$. 压缩感知的缺点是必须先测量后计算, 而且对图像稀疏性或可压缩性有一定程度

的依赖,或者说需要一定先验知识才能完美重建图像.

综上,要得到稳定性好、不依赖图像本身的快速单像素成像仍是值得研究的课题.本文针对这一问题提出了基于Walsh-Hadamard变换的单像素成像方案.

2.4 Walsh-Hadamard变换成像

Walsh-Hadamard矩阵起源较早^[16],应用极其广泛.相同阶数的Walsh矩阵和Hadamard矩阵内容相同,行排列序不同.Hadamard矩阵具有如下特征:首先,Hadamard矩阵产生速度快,可用直积的方式并行产生,即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$H_{2^n} = H_2 \otimes H_{2^{n-1}} = \begin{bmatrix} H_{2^{n-1}} & H_{2^{n-1}} \\ H_{2^{n-1}} & -H_{2^{n-1}} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

上式中, \otimes 表示直积, n 是大于2的正整数.可见 \mathbf{H} 矩阵只能为只有 ± 1 构成的方阵.其次, \mathbf{H} 矩阵除第一行和第一列,其余任意一行与其任意列满足正交性,即

$$\frac{1}{K} \sum_k \mathbf{H}(k,p)\mathbf{H}(p,k) = \begin{cases} 1, & p = 1 \\ 0, & p \neq 1 \end{cases}, \quad (13)$$

其中, K 为测量次数须等于 \mathbf{H} 矩阵的行(列),即 $K = NM = P$.第三, \mathbf{H} 矩阵正交归一 $\mathbf{H}\mathbf{H}' = \mathbf{K}\mathbf{I}$, \mathbf{I} 为单位矩阵,且 \mathbf{H} 转置形式不变.根据(8)式可求得 $K \times K$ 维 \mathbf{H} 矩阵方差 $\sigma(k,p)$ 为

$$\begin{aligned} \sigma^2(p) &= \frac{1}{K} \sum_k \mathbf{H}(k,p)\mathbf{H}(p,k) \\ &\quad - \frac{1}{K} \sum_k \mathbf{H}(k,p) \frac{1}{K} \sum_k \mathbf{H}(p,k) \\ &= \begin{cases} 0, & p = 1 \\ 1, & p \neq 1 \end{cases}. \end{aligned} \quad (14)$$

将(13)和(14)式代入(6)式,并根据(5)式的变形,将直接得到

$$\begin{aligned} G^{(2)}(m,n) \\ = \begin{cases} 0, & m = n = 1 \\ T(m,n), & m \neq n \text{ 或 } m = n \neq 1 \end{cases}. \end{aligned} \quad (15)$$

即利用一组完整的Hadamard矩阵作为测量基,理论上,除了图像的第一个像点灰度为零不能被重建外,其他空间位置均可以得到物体绝对透过率的完美恢复.为直观说明问题,上述过程可以用Hadamard变换来描述,

$$I_B^{(k)} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mathbf{H}(k,p)T(p), \quad (16)$$

其逆变换即可求得物体透过率 $T(p)$,即

$$T(p) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{H}(k,p)I_B^{(k)}. \quad (17)$$

由于Hadamard变换运算效率并不高,因此本文提出利用Walsh-Hadamard变换进行最后重建计算.Walsh-Hadamard变换存在与快速傅里叶变换类似的快速算法^[17].因此,在(17)式中,将 $I_B^{(k)}$ 按Walsh序排列,然后将 $\mathbf{H}(k,p)$ 替换为Walsh矩阵变换核 $WAL(k,p)$,即可直接利用Walsh-Hadamard变换进行图像快速重建.另外,Walsh-Hadamard变换除了快速重建外,对计算机硬件要求低,可以用来计算较大图像的重建.

3 单像素成像实验

3.1 数值模拟

选用Matlab工具箱自带的图像作为原始图像,如图2(a)所示:图像像素为 1024×1024 像素,灰度为0—255.模拟测量时引入60%标准差的高斯随机噪声作为测量和环境噪声.模拟程序采用Matlab R2012a版本,程序为关联算法和TVAL3算法.

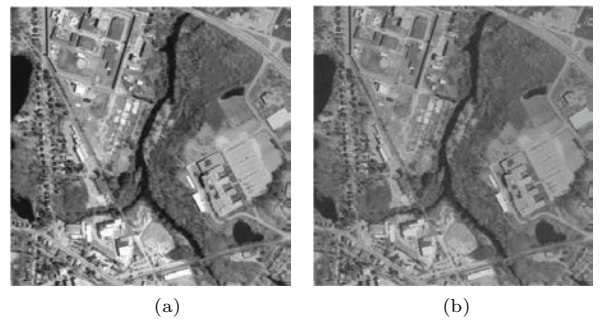


图2 仿真实验结果 (a) 原始图像; (b) 加入60%标准差的随机噪声后重建图像

Fig. 2. Simulation results: (a) Origin image; (b) recovered image with added noise of level 60%.

利用Walsh-Hadamard变换单像素相机方案,可得到引入60%标准差的高斯随机噪声后重建

的图像. 在主要配置为英特尔酷睿 i3-3240 双核 3.40 GHz 中央处理器, 2 GB 内存的联想台式电脑上, 实现了 1024×1024 像素的图像重建. 如图 2(b) 所示, 重建图像相对误差为 17% 左右, 图像重建时间为 0.94 s. 该实验表明, 基于 Walsh-Hadamard 变换的单像素相机在一定程度上可以抑制噪声. 同样的数据, 本文还利用压缩感知方法进行模拟重建, 计算时间为 8 s 左右. 可见本文提出的方法具有大图像重建运算速度快、且硬件要求低的优势.

3.2 实验验证

基于以上数值模拟仿真实验, 利用单像素望远镜的原理样机, 我们先后对距离约 500 m 处和约 5000 m 处的居民楼进行了成像实验. 首先, 利用计算机按 Hadamard 编码原则生成 16384×16384 大小的 Hadamard 矩阵; 其次将 Hadamard 矩阵的每一行重新按顺序排列成 16384 个 128×128 大小的矩阵; 最后将 16384 个 128×128 大小的矩阵按 Walsh 规则的顺序加载到数字微镜阵列 DMD 的板载内存. 本文所用的 DMD 为美国德州仪器公司的 DLP4100, 微镜总数及排列为 1920×1080 , 微镜可 $\pm 12^\circ$ 翻转, 每个微镜 $10.6 \mu\text{m}$. 实验时从 DMD 中间区域选取的调制区域为 1024×1024 , 8 个微镜作为一个像素调制单元, 因此共 128×128 个像素调制单元, 微镜的调制速度设定为 10 kHz. 因为 DMD 的调制速率为 10 kHz, 因此 PMT 采集得到一副图像需要 1.7 s. 实验所用的成像镜头为卡塞格林式天文望远镜, 口径为 105 mm, 焦距 1400 mm, 焦距可调. 探测器采用日本滨松 H10723-20 型 PMT, 有效波段 350—900 nm. 数据采集卡采用 24 位精度的 A/D 转换模块. 实验天气为晴天, 首先对约 500 m 处(由商业测距仪得到)的小学教学楼楼顶以及附近视场内的烟囱进行了成像实验. 如图 3(a) 所示, 可以清晰地分辨楼顶的排风口和烟囱的轮廓. 调节望远镜焦距, 成像焦面发生改变, 得到了另一幅图像, 如图 3(b) 所示, 与图 3(a) 对比可以发现, 烟囱和楼顶均变得模糊, 而远处的白色楼宇变得清晰. 从百度地图可查得楼宇的距离约为 5000 m. (图像的黑边是 DMD 放置位置与水平有 45° 夹角, 因此对图像进行了逆时针 45° 旋转.)

图 3 中所有图像大小均为 128×128 pixels, 重建图像所用计算机为英特尔酷睿 i3-3240 双核 3.40 GHz 中央处理器, 2 GB 内存的联想台式机, 利

用在 Matlab 软件上运行 Walsh-Hadamard 变换算法进行数据快速重建, 重建时间为 1.2 s, 小于采样时间 1.7 s. 由此, 我们实验上得到了 350—900 nm 的可见光和近红外波段, 128×128 像素, 0.5 帧/秒的单像素成像. 图 3 中的所有图像未进行任何图像降噪处理, 若根据系统噪声特性进行图像处理和图像增强处理, 例如图像的 Retinex 增强算法, 甚至可消除薄雾的影响^[18], 图像质量将进一步提高, 这也是今后在实际应用中要考虑的问题. 单像素成像与传统成像相比, 工艺简单, 单像素探测器在红外成像^[19]、微波成像等波段有巨大潜在应用价值, 因此有望在阵列探测器不够灵敏或者工艺技术达不到要求的成像领域发挥作用.

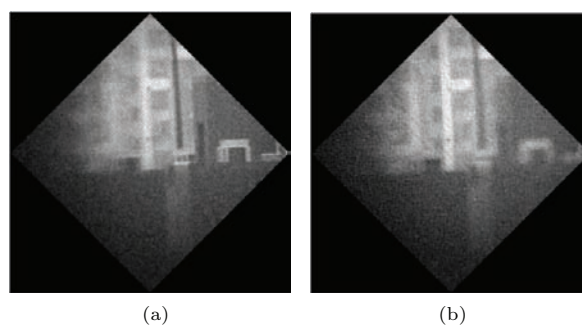


图 3 实验结果 (a) 约 500 m 处建筑物屋顶及烟囱成像; (b) 约 5000 m 处建筑物成像

Fig. 3. Experimental results: (a) The image of the building roof and the chimney about 500 meters away; (b) the image of the building about 5000 meters away.

4 结 论

本文提出将 Walsh-Hadamard 变换的方法用于计算量子成像和单像素相机图像重建. 理论上证明了传统的量子成像、特别是计算量子成像实际上与单像素相机技术的图像重建理论相互兼容且基本一致. 同时从理论上分析了计算量子成像技术与单像素相机技术的各自优势. 本文还证明了利用 Walsh-Hadamard 变换实现图像快速重建的优势, 并且从实验上得到了距离在 500—5000 m 自然目标在 350—900 nm 的可见光和近红外波段、 128×128 像素, 成像速度为 0.5 帧/秒的单像素成像结果. 本文理论和实验方案的提出, 证明了单像素相机实现多像素快速成像的可行性, 进一步推进了单像素相机向实用化迈进. 单像素成像在红外热成像、微波成像等波段有巨大的潜在应用价值, 因此有望在阵列探测器不够灵敏或者工艺技术达不到要求的成像领域发挥作用.

参考文献

- [1] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, Sergienko A V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 83429
- [2] Strekalov D V, Sergienko A V, Klyshko D N, Shih Y H 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3600
- [3] Abouraddy A F, Saleh B E A, Sergienko A V, Teich M C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 123602
- [4] Bennink R S, Benley S J, Boyd R W 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 113601
- [5] Chan K W C 2012 *Opt. Lett.* **37** 2739
- [6] Shapiro J H 2008 *Phys. Rev. A* **76** 061802
- [7] Duarte M, Davenport M, Takhar D, Laska J, Sun T, Kelly K, Baraniuk R 2008 *IEEE Signal Process. Mag.* **25** 83
- [8] Gatti A, Brambilla E, Bache M, Lugiato L A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 093602
- [9] Donoho D 2006 *IEEE Trans. Inform. Theory* **52** 1289
- [10] Cheng J, Han S S 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 093903
- [11] Gong W L, Han S S 2009 *arXiv preprint arXiv:0911.4750*
- [12] Yao X R, Li L Z, Liu X F, Yu W K, Zhai G J 2015 *Chin. Phys. B* **24** 044203
- [13] Bai Y F, Yang W X, Yu X Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 044206
- [14] Candès E J 2006 in *Proc. Int. Cong. Math., European Mathematical Society, Madrid, Spain* **3** 1433
- [15] Romberg J 2008 *IEEE Signal Process. Mag.* **25** 14
- [16] Beer T 1981 *Am. J. Phys.* **49** 466
- [17] Li Q, Zhou M L, Shi B C, Wang N C 1998 *Chin. Sci. Bull.* **43** 627
- [18] Xing S H, Yang Y D, Wang X H 2015 *Navigation and Control* **14** 97 (in Chinese) [邢世宏, 杨晓东, 王小海 2015 导航与控制 **14** 97]
- [19] Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, Jonathan P, Sun B Q, Padgett M J 2013 *Opt. Express* **21** 23068

Single-pixel remote imaging based on Walsh-Hadamard transform*

Li Ming-Fei Mo Xiao-Fan Zhao Lian-Jie Huo Juan Yang Ran
Li Kai Zhang An-Ning[†]

(Beijing Institute of Aerospace Control Devices, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100094, China)

(Quantum Engineering Research Center, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100094, China)

(Received 13 November 2015; revised manuscript received 30 November 2015)

Abstract

Single-pixel imaging has become a topic of intense interest amongst theoreticians and experimentalists in recent years, and is still attracting great attention due to its potential applications in biomedical imaging, remote sensing, defence monitoring, etc. Two main fields should be involved in single-pixel imaging scheme: single-pixel camera and computational quantum imaging, which are proposed in the year 2006 and 2008, respectively. Although these two single-pixel imaging schemes belong to different research fields, they are nearly identical in the realization setup and using the similar image recovering algorithm. The single-pixel camera scheme is mainly based on compressive sensing algorithms, which can recover the image with about 30 percent measurements of its total pixels (raster scan method), but need the prior knowledge of the image. While the computational quantum imaging method usually recovers the image by using the second-order correlation function, which is computational fast but need more measurements to retrieve a high quality image. Thus, both the methods mentioned above are time consuming. In this paper, a single-pixel imaging scheme based on Walsh-Hadamard transform is proposed and is demonstrated both theoretically and experimentally. The retrieving times of different algorithms are discussed and compared with each other. An image of 1024×1024 pixels can be acquired around 1 second with our method while it will take 8 seconds by using TVAL3 algorithm on the general computer in our numerical simulation experiment. It is also experimentally demonstrated that the nature targets from 500 meters to 5000 meters away are acquired, with pixels of 128×128 and in the waveband of 350–900 nm, and the speed of the imaging frame rate is achieved at 0.5 frame per second. The differences and commons between single-pixel imaging and computational quantum imaging are also discussed in this article. It is found that the Walsh-Hadamard transform we proposed is stable and can be sufficiently saving the imaging time of the single-pixel imaging schemes while maintaining a high imaging quality. Moreover, the single-pixel remote imaging scheme can be used in other wave band such as infrared and micro wave imaging, or will be useful in the case when the array detector technique is difficult to meet the requirements such as the sensitivity or the volume. And our scheme proposed here can make the single-pixel imaging technique step further toward its real applications.

Keywords: Walsh-Hadamard transform, single-pixel imaging, computational quantum imaging

PACS: 42.50.Lc, 42.30.Va, 42.30.Ms

DOI: [10.7498/aps.65.064201](https://doi.org/10.7498/aps.65.064201)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11204011, 11304007, 60907031, 61501015).

[†] Corresponding author. E-mail: mf_li@sina.cn