

一种单检测器可压缩成像系统设计

刘 红¹, 李鹏飞¹, 方 红², 程 鸿¹

(1. 安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039; 2. 上海第二工业大学理学院, 上海 201209)

摘 要: 采用基于亚高斯随机投影的图像重建方法, 得到以稀疏矩阵、非常稀疏投影矩阵作为测量矩阵的仿真结果, 设计一种基于数字显微镜装置阵列的可压缩成像系统, 给出系统结构、各模块之间的联系和核心模块的设计方法。为满足系统对高频弱光信号检测的需要, 设计单检测器弱光信号检测模块, 实验结果证明该方案速度快、有较高的精度和适应性。

关键词: 可压缩传感理论; 亚高斯; 可压缩成像系统

Design of Single Detector Compressed Imaging System

LIU Hong¹, LI Peng-fei¹, FANG Hong², CHENG Hong¹

(1. Key Lab of Intelligent Computing and Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039;

2. College of Science, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209)

【Abstract】 This paper adopts image reconstruction method based on sub-Gaussian random projection to get a computer simulation experiment result using sparse projection matrix and very sparse projection matrix as measurement matrix. It proposes a compressed imaging system based on digital micromirror device, it presents system construction, the relation of components and the technique of design for key component. In order to satisfy the system need of detecting the weak light signal of high frequency changing, it designs a detecting component for weak light signal with single detector. Experimental result proves that the scheme is rapid speed, excellent preciseness and outstanding application.

【Key words】 compressed sensing theory; sub-Gaussian; compressed imaging system

1 概述

目前稀疏信号和图像传输编码的一般方法是“先采样, 后编码”, 这种编码过程当 N 很大, K 很小时非常低效(N 是指采样数据的数目, K 是指有效数据的数目), 许多 A/D 转换处理的输出被丢弃。针对传统方法的缺点, 文献[1]提出可压缩传感(Compressed Sensing, CS)理论, 其指导思想为信号的大部分信息包含在很少量的有意义系数中, 信号的其他部分在应用中不起作用, 因此, 能够直接确定此类少量有意义的系数。CS 理论依赖的一个关键性质是稀疏基的稀疏性及稀疏基和测量基间的非相干性。然而, 目前已有的测量矩阵都是稠密的, 这给后续的重建任务带来较高的复杂性。针对此问题, 本文将亚高斯随机投影引入 CS 理论, 给出 2 种新类型的 CS 测量矩阵: 稀疏投影矩阵和非常稀疏投影矩阵。亚高斯分布尾部的有界性可以证明这 2 种矩阵满足 CS 测量矩阵^[2]。同时, 进一步说明这 2 种矩阵构成元素的稀疏性可以简化图像重建过程中的投影计算, 从而提高重建速度。

2 亚高斯随机投影图像重建方法

2.1 基本原理简介

对于随机变量 X , 如果存在一个常数 $g > 0$, 对任意 $t \in R$ 都能使不等式成立:

$$E(\exp(Xt)) \leq \exp\left(\frac{g^2 t^2}{2}\right) \quad (1)$$

则称该随机变量服从亚高斯分布。记最优的 g 值为 $\tau^2(X)$, 得到下式:

$$\tau^2(X) = \sup_{t \neq 0} \frac{2 \lg E(\exp(Xt))}{t^2} \quad (2)$$

若亚高斯随机变量同时满足 $E(X^2) = \tau^2(X)$, 则称 X 服从

严格的亚高斯分布。

服从亚高斯分布的投影分布有如下 2 种:

(1) 稀疏投影分布

$$X \sim \begin{pmatrix} \sqrt{s} & 0 & -\sqrt{s} \\ \frac{1}{2s} & 1-\frac{1}{s} & \frac{1}{2s} \end{pmatrix}, \quad 1 \leq s \leq 3 \quad (3)$$

当 $s=1$ 时, $X \sim \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$, 即 X 服从 Bernoulli 分布。

(2) 非常稀疏投影分布。

式(3)中当 $s > 3$ 时, 为非常稀疏投影分布, 一般考虑 $s = \sqrt{N}$ 的情况, N 是原始信号的长度。容易验证非常稀疏投影分布是亚高斯分布, 稀疏投影分布是严格的亚高斯分布^[2]。

2.2 模拟实验结果

以重建大小为 64×64 的“T”字二值模拟图像为例, $N = 4096$, $m = 127$ (m 为稀疏度)。分别以稀疏投影矩阵($s=3$)和非常稀疏投影矩阵($s=\sqrt{N}$)为随机测量矩阵, 采用基于 l_1 模的解码模型 $\min \|x\|_1$ s. t. $Rx = y$, 其中, x , R 和 y 分别为待重建信号、随机测量矩阵和测量向量。测量次数 M 满足条件为 $M = cm \lg(N/m)$, 其中, c 是过采样因子。该图的重

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070357003), 国家自然科学基金资助项目(60603083)

作者简介: 刘 红(1968-), 女, 副教授、博士研究生, 主研方向: 计算机视觉; 李鹏飞, 硕士研究生; 方 红, 讲师、博士; 程 鸿, 博士研究生

收稿日期: 2009-03-15 **E-mail:** lpfvip@126.com

建结果及相同条件下采用高斯矩阵作为测量矩阵的重建结果如图 1 所示。

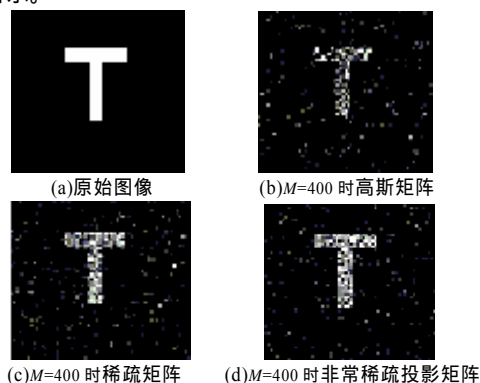


图 1 图像重建结果

3 成像系统设计

基于亚高斯随机投影图像重建方法的可压缩成像系统是一种以 CS 技术为基础的全新的成像系统,仅依赖单个检测器的时间多路检测,就能实现对图像或画面的重构。该成像系统仅依赖单个检测器,可以适应图像中的多种波长,此特点是一般的 CCD 和 CMOS 成像系统所不具备的。由于具备了单个检测器时间多路检测的特点,因此能用相对较少的花费得到更灵敏的检测装置。这在检测昂贵器件并且难以得到 N 像素传感器阵列时是很重要的^[3]。

3.1 成像系统原理

根据可压缩传感理论,搭建可压缩成像系统实验平台,如图 2 所示。

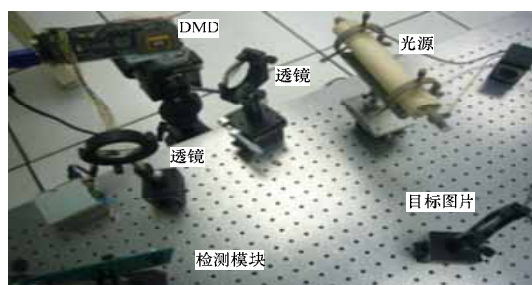


图 2 可压缩成像系统实验平台

在搭建的可压缩成像系统实验平台中,雪崩二极管的输出电压可以理解成所需重建的图像 ε 和一个测量基向量 $\gamma(n)$ 的内积^[4]。具体说,设 $\eta(n)$ 表示第 n 个测量条纹的透镜位置,从雪崩二极管上读出的电压 v 可以写成:

$$v(n) = \varepsilon \cdot \gamma(n) \quad (4)$$

其中, $\gamma(n) = l_{\{\eta(n)=+12\text{degree}\}}$; l 是指标函数; λ 为当数字微镜装置(Digital Micromirror Device, DMD)中所有镜片偏置到 -12° 时测得的雪崩二极管上的电压值。设计的基本思想是入射光场(对应于待重建图像 T)经透镜汇聚后被 DMD 阵列反射,DMD 的微镜方向根据计算机生成的服从亚高斯分布的伪随机矩阵来调制。每个不同的微镜模式在单个的光敏管上产生一个绝对电压,也就是测量 $y(m)$ 。用 CS 技术,从 M 次测量中可以重建理想图像 T 的一个稀疏逼近。

3.2 单检测器弱光信号检测模块设计

检测模块硬件系统框架如图 3 所示。

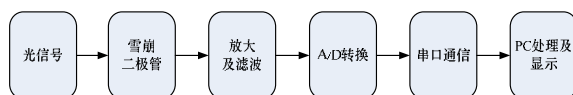


图 3 检测模块硬件系统框架

在信号的放大和处理过程中,内部噪声和外部干扰须抑制,在放大电路中限制通频带是抑制干扰和噪声的一种有效方法^[5]。其基本原理:信号带有一定的规律性,其功率只限定在很窄的频率范围内,白噪声是系统中固有噪声,其频谱范围很宽($0 \text{ Hz} \sim 10^{12} \text{ Hz}$),如果信号放大过程中用滤波器仅滤出信号频谱的能量,抑制其他能量频率的通过,那么就能明显抑制噪声,提高系统输出信噪比。

基于该思想,本文设计一种二阶带通有源滤波器作为本系统的滤波模块,通过在系统中加入一个电位器,实现二阶带通有源滤波器的中心频率的动态调整,增加系统的适应性。另外,系统同时处理模拟信号及数字信号,为确保把模数信号间的互干扰降到最低,在设计 PCB 板时采用分离电源层及地层技术,将 PCB 板表面大面积敷铜,从而确保精确采样。

软件流程设计:开始→配置引脚→系统初始化→启动片内 A/D→通过串口向 PC 送数。系统的总体控制流程包括 2 个部分:(1)开机或加电复位后的系统初始化;(2)单片机与 PC 机的通信,将 A/D 转换结果通过串口送入。

为实现信号的有效采集,必须使 A/D 的采样频率与雪崩二极管输出信号变化频率一致。由于本模块采用了单片机自带 A/D,因此通过调整延时子程序中的延时参数,可以控制 A/D 以不同频率的采样^[6],在不修改硬件设计的情况下,实现对频率在 $0 \sim 100 \text{ kHz}$ 范围内信号的精确采样,提高系统的灵活性。

4 结束语

将亚高斯随机投影应用于图像重建,保证了图像重建质量,降低了重建难度,提高了重建速度,并在可压缩传感理论实用化方面做了有益的探索。

参考文献

- [1] Donoho D. Compressed Sensing[J]. IEEE Trans. on Inf. Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] Fang Hong, Zhang Quanbing, Wei Sui. Image Reconstruction Based on Sub-Gaussian Random Projection[C]//Proc. of the 4th International Conference on Image and Graphics. Chengdu, China: [s. n.], 2007: 210-214.
- [3] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single Pixel Imaging via Compressive Sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 83-91.
- [4] Takhar J D, Laska M, Wakin M, et al. A New Compressive Imaging Camera Architecture Using Optical-domain Compression Computational Imaging IV[C]//Proc. of SPIE'06. California, USA: [s. n.], 2006: 43-52.
- [5] 郭培源, 付 扬. 光电检测技术与应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
- [6] 王为清, 程国钢. 单片机 Keil C×51 应用开发技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.

编辑 陆燕菲