

空间欠采样太赫兹时域光谱成像方法

余荣斌^{1,2,3,4} 刘文权^{1,2,3} 周志盛^{1,2,3} 鲁远甫^{1,2,3} 董玉明^{1,2,3}
焦国华^{1,2,3} 吕建成^{1,2,3}

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(深圳生物医学光电传感技术工程实验室 深圳 518055)

³(香港中文大学 香港 999077)

⁴(中国科学院大学深圳先进技术学院 深圳 518055)

摘 要 文章针对传统太赫兹时域光谱成像技术存在的扫描时间长以及数据存储量大等问题,提出了一种基于压缩感知理论的空间欠采样太赫兹时域光谱成像方法。首先通过扫描电机获得目标非等间隔欠采样信号,然后利用压缩感知方法来重构缺失像素点的太赫兹信息。实验结果显示,当压缩比为 0.5 时,所重构的太赫兹信号与全采样条件下的信号相关性可达 99.95%。通过对压缩重建图像的显示分析,时域图像中的缓变区域和频谱成像中的低频信号恢复效果较好。该方法为快速太赫兹光谱成像提供了一种有效的技术手段。

关键词 太赫兹时域光谱成像; 压缩感知; 空间欠采样; 压缩比
中图分类号 TN 29 **文献标志码** A

The Spatial Undersampling Method of Terahertz Time Domain Spectral Imaging

SHE Rongbin^{1,2,3,4} LIU Wenquan^{1,2,3} ZHOU Zhisheng^{1,2,3} LU Yuanfu^{1,2,3} DONGYuming^{1,2,3}
JIAO Guohua^{1,2,3} LV Jiancheng^{1,2,3}

¹(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(Biomedical Engineering Laboratory for Photoelectric Sensing Technology, Shenzhen 518055, China)

³(The Chinese University of Hong Kong, Hongkong 999077, China)

⁴(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract Terahertz time domain spectroscopy has been widely used in both spectral analysis and imaging applications. Existing terahertz time domain spectroscopy imaging systems usually suffered the low scanning

收稿日期: 2016-05-11 修回日期: 2016-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61205101); 深圳市科技计划项目(JCYJ20140417113130693、GJHZ20140417113430592、JCYJ20150925163313898)

作者简介: 余荣斌, 硕士研究生, 研究方向为信号处理及太赫兹成像技术; 刘文权, 博士, 研究方向为太赫兹光谱成像技术及其应用; 周志盛, 博士, 研究方向为光学检测与成像; 鲁远甫(通讯作者), 副研究员, 研究方向为光电传感技术、光电探测技术、太赫兹技术及应用, E-mail: yf.lu@siat.ac.cn; 董玉明, 副研究员, 研究方向为光纤传感、光电检测技术; 焦国华, 副研究员, 研究方向为光电传感技术和微光学制造; 吕建成, 研究员, 研究方向为机械设计。

speed and huge data storage. To solve this problem, an efficient terahertz imaging method based on the compressed sensing theory was presented in this paper. By controlling the scanning motor to perform a non-equal interval sampling of the target, a group of under-sampled terahertz signal can be obtained. Based on the under-sampled signal, the compressed sensing algorithm is applied to reconstruct the complete terahertz image. The results show that, when the compression ratio is 0.5, the correlation coefficient between the reconstructed terahertz signal and the fully sampled THz signal can reach 99.95%. By analyzing the reconstructed terahertz image, the image areas with smooth intensity changing or low frequency component in frequency domain can be well recovered. The proposed method provides a practical means for efficient terahertz imaging applications.

Keywords terahertz time domain spectral imaging; compressed sensing; spatial under sampling; compression ratio

1 引言

太赫兹时域光谱 (Terahertz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS) 技术^[1]是国际上近年来发展迅猛的太赫兹辐射应用技术之一, 是一种新兴的光谱成像技术。THz-TDS 成像不但包含成像目标的几何信息, 而且包含目标对 THz 脉冲响应的强度、相位等信息, 可以方便地对成像目标进行光谱分析和成像。目前, 大部分 THz-TDS 成像均采用 Roster 扫描^[2]形式, 采集每个像素光谱信息进行成像。Roster 扫描包括空间(二维)和时间(一维)扫描。这种 THz-TDS 成像技术存在扫描时间长、采集数据量大等不足。因此, 缩短成像时间和减少存储量是亟待解决的问题。

近年来, 压缩感知^[3] (Compressed Sensing, CS) 技术方兴未艾, 已成当前信息领域的一大研究热点。与传统成像方式相比, 压缩感知成像具有低采样率、低存储量的优点, 适合单点探测^[4]的太赫兹时域光谱系统。自从 Rice 大学^[5]2008 年实现太赫兹单像素成像以来, 众多的研究机构开展了压缩感知在太赫兹成像方面的研究。例如, 首都师范大学和北京理工大学^[6,7]采用一系列刻蚀的印制电路板 (Printed Circuit Board,

PCB) 模板调制太赫兹波, 实现单像素测量并重构太赫兹图像。波士顿大学^[8,9]制造超材料空间调制器调制太赫兹波, 达到压缩测量太赫兹波的目的^[10,11]。此外, 俄亥俄州立大学利用半导体光生载流子特性, 用商用投影仪照射高阻硅方法调制太赫兹波, 实现可编程太赫兹压缩感知成像^[12]。上述太赫兹压缩感知成像方法都依赖于掩膜调制器的实现技术, 因此, 需要增加额外的硬件条件, 导致系统复杂化和成本的上升。

本文引入压缩感知的思想, 提出一种空间欠采样太赫兹时域光谱成像方法。该方法是在传统扫描成像基础上进行的一种改进, 制定欠采样策略对空间像素点欠采样扫描, 利用压缩感知算法进行图像重建。相比 Roster 扫描方式, 空间欠采样使数据量和采集时间都得到优化。比起调制掩膜方法的压缩感知成像, 该方法不需要保存投影模板, 无需增加额外的硬件资源。

2 基本原理

2.1 压缩感知原理介绍

CS 的核心思想是把一个稀疏或可压缩的高维信号通过特定矩阵投影到低维空间, 然后利

用稀疏条件, 结合线性或非线性方法重构原始信号。高维离散信号 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^N$, 经过测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$ ($M \ll N$) 投影到低维空间, 得到测量值 $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^M$:

$$\mathbf{y}_{M \times 1} = \Phi_{M \times N} \mathbf{x}_{N \times 1} \quad (1)$$

其中, 测量矩阵 Φ 为 $M \times N$ 。由于 \mathbf{y} 的维数小于 \mathbf{x} 的维数, 公式(1)有无穷解或无解。然而, 当信号 \mathbf{x} 是 k 稀疏的(只有 k 个非 0 值)、测量次数满足 $M = O[k \lg(N)]$ 、 Φ 满足约束等距条件, 信号 \mathbf{x} 可以由测量值 \mathbf{y} 通过求解最优 l_0 范数问题精确重构:

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min \|\mathbf{x}\|_0 \quad s.t. \quad \mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} \quad (2)$$

其中, $\|\cdot\|_0$ 为向量的 l_0 范数, 表示向量 \mathbf{x} 中非零元素个数。

然而常见的自然信号 \mathbf{x} 在时域都是不稀疏的, 上述重构过程不能直接应用于自然信号的重构。信号稀疏理论^[2]指出, 自然信号 \mathbf{x} 可以通过某种变换 Ψ 进行稀疏表示, 即 $\mathbf{s}_{N \times 1} = \Psi_{N \times N} \mathbf{x}_{N \times 1}$, 因此测量公式(1)可以进一步表示为:

$$\mathbf{y}_{M \times 1} = \mathbf{A}_{M \times N} \mathbf{s}_{N \times 1} = \Phi_{M \times N} \Psi_{N \times N}^T \mathbf{s}_{N \times 1} \quad (3)$$

其中, \mathbf{s} 表示某种变换域(如小波域、傅里叶域等)下的系数, 该系数是 k 稀疏的; \mathbf{A} 为传感矩阵。

于是, 信号 \mathbf{x} 的重构问题转换为求解系数 \mathbf{s} 的 l_0 范数最小化问题, 如公式(4)所示。

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min \|\mathbf{s}\|_0 \quad s.t. \quad \mathbf{y} = \mathbf{A} \mathbf{s} \quad (4)$$

由此, 求解得到系数稀疏 \mathbf{s} 的近似 $\hat{\mathbf{s}}$, 经反变换得到原始信号的估计值, 即为重构信号 $\hat{\mathbf{x}}$, 如公式(5)所示。

$$\hat{\mathbf{x}} = \Psi \hat{\mathbf{s}} \quad (5)$$

目前, 信号重构算法主要包括最小 l_1 范数法^[13,14]、匹配追踪系列算法^[15,16]、基于平滑 l_0 范数(Smoothed l_0 , SL0)算法^[17,18]等。其中, SL0 算法主要思想是用光滑函数来逼近离散的 $\|\mathbf{s}\|_0$ 范数, 从而将离散最优化问题转换为连续函数最小值问题, 经过多次迭代逐步逼近最优解。由于 SL0 具有较快的信号重建速度^[17], 所以本文采用 SL0 算法进行信号重构。

2.2 空间欠采样原理和实现步骤

目前, 传统逐点扫描 THz-TDS 成像通常采用二维电机平台对成像目标进行 S/Z 型扫描(如图 1)。为方便表示, 假设太赫兹图像大小为 $M \times N$ 。每个像素点对应一个数据长度为 T 的时间响应序列, 因此, 太赫兹时域光谱成像数据为 $M \times N \times T$ 的三维数组。而每一个时间帧对应一幅太赫兹图像。研究单帧图像的欠采样重构继而完成所有数据重构是本文的出发点。从采样的角度上来看, 传统逐点扫描太赫兹成像可以等效为空间等间隔离散采样。如图 1 所示, 成像目标在某一时刻的太赫兹信号分布 f , 扫描范围和步长决定成像的分辨率, 逐点扫描后得到离散值 $\mathbf{y}_{N \times N}$ 。

$$\Phi_{N \times N} \times f = \mathbf{y}_{N \times N} \quad (6)$$

其中, $\Phi_{N \times N} = [e_1, e_2, e_3, \dots, e_N]^T$, 该表达式含义为将成像目标对单位向量做投影, 得到离散值 $\mathbf{y}_{N \times N}$ 。随着分辨率的提高, 成像的时间和存储量逐渐上升。

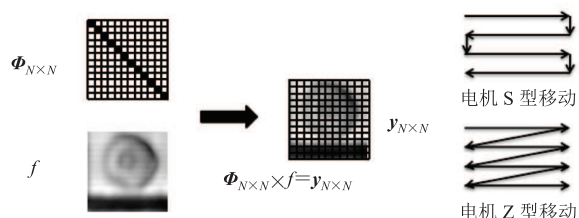


图 1 传统逐点扫描示意图

Fig. 1 Traditional point by point scanning diagram

由于单位向量的等间隔性, 使得采样冗余, 因此设计随机采集矩阵 $\Phi_{M \times N}$, 它遵循的规律是每一行只有一个 1, 每一列至多一个 1。根据测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$, 用二维电机平台对成像目标进行非等间隔 S/Z 型扫描, 达到空间欠采样目的, 得到离散信号 $\mathbf{y}_{M \times N}$, 如图 2 所示。

图 2 中, 测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$ 中黑色块表示 1(采集), 白色块表示 0(不采集)。按照测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$ 的列信息采集对应的行数据, 该过程等效为非等间隔的 S/Z 型扫描。定义欠采样点数和全

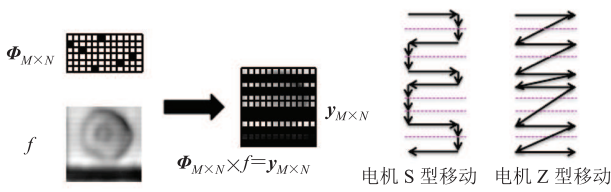


图 2 空间欠采样示意图

Fig. 2 Random discrete under sampling diagram

采样像素点数之比为压缩比 (Compression Ratio, CR) $CR=M/N$, 欠采样结果为 $y_{M \times N}$ 。数据重构是逆过程 (如图 3), 将单列的欠采样信号利用重构算法得到单列的近似信号, 计算恢复所有的列信号并组合拼接成完整太赫兹图像。

图 3 中, 由于电机 S/Z 型扫描方式, 扫描的单列欠采样信号并不符合单列信号在随机单位向量的投影顺序, 因此, 按列索引的欠采样信号在重构之前必须经过顺序映射。图 3(a) 表示扫描行 m 和位置 n 映射关系示意图。 $\Phi_{M \times N}$ 中黑色块 (采集) 的坐标 (n, m) 表示采集到的第 m 行数据值映射到位置 n 处。图 3(b) 表示单列数据重构流程。按列索引经过上述映射后得到欠采样数据 $y_{M \times 1}$,

联立测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$ 以及变换矩阵 $\Psi_{N \times N}^T$, 根据 SLO 重构算法进行单列重构得到 $\hat{x}_{N \times 1}$ 。重复进行列恢复, N 列的重构信号排列成图 \hat{I}_t , 将所有恢复的时间帧 T 图像组合, 重构成太赫兹时域光谱信号 $\hat{K}_{N \times N \times T}$ 。

具体实现步骤如下:

- (1) 确定成像范围和采样步长, 设计数据尺寸 $N \times N \times T$ 三维数组;
- (2) 设置压缩比 CR, 生成 $M \times N$ 行随机测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$;
- (3) 控制空间电机 S 型扫描得到欠采数据 $M \times N \times T$;
- (4) 按照时间帧 T 展开成图像 $I_t = y_{M \times N}$, $t \in [1, 2, 3, \dots, T]$;
- (5) 将图像按列索引, 并进行顺序映射得到 $y_{M \times 1}$;
- (6) 联合变换基 $\Psi_{N \times N}^T$, 利用 SLO 算法, 估算系数 $\hat{s}_{N \times 1} = \arg \min \|s_{N \times 1}\|_0 \text{ s.t. } y_{M \times 1} = \Phi_{M \times N} \Psi_{N \times N}^T s_{N \times 1}$;
- (7) 估算图像单列信号 $\hat{x}_{N \times 1} = \Psi_{N \times N}^T \hat{s}_{N \times 1}$, 图片近似恢复 $\hat{I}_t = \hat{x}_{M \times N}$, $t \in [1, 2, \dots, T]$, 所有图片组

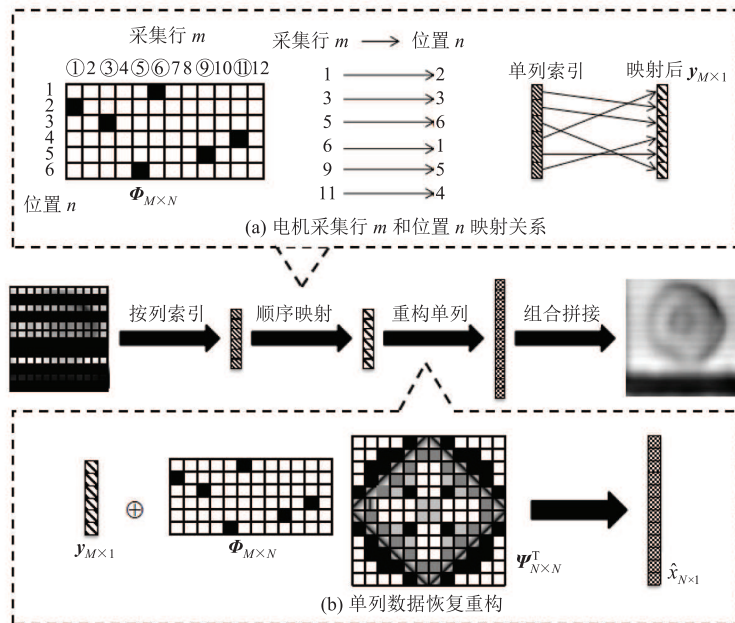


图 3 信号重构流程

Fig. 3 Signal reconstruction process

合成太赫兹时域光谱信号 $\hat{\mathbf{K}}_{N \times N \times T} = \bigcup_t^T \hat{\mathbf{I}}_t$ 。

3 实验结果和分析

为验证本文方法的有效性, 本文利用快速扫描太赫兹时域光谱系统^[19]对生物样品(干燥兔子角膜)分别进行了全采样与欠采样成像实验。实验中, 空间扫描范围为 $21 \text{ mm} \times 21 \text{ mm}$, 采样步长为 0.2 mm , 成像尺寸大小为 $M \times N = 101 \times 101$, 时间扫描帧数 $T = 1\ 024$, 获取一个像素太赫兹时域波形的时间约 1.67 s 。欠采样实验时压缩比为 $CR = 0.5$, 欠采样图像大小为 $M \times N = 50 \times 101$ 。根据随机生成欠采样测量矩阵 Φ 实现特定的空间 S/Z 型非等间隔扫描, 得到欠采样数据。重构信号时, 单列索引值进行位置映射, 选择离散余弦变换基 Ψ , 并利用压缩感知的 SLO 重建算法, 进行单列信号恢复, 由此可以重建每一帧的太赫兹图像 $\hat{\mathbf{I}}_t$, 将每一幅重构的太赫兹图像按时间顺序组合从而得到完整的太赫兹时域光谱数据 $\hat{\mathbf{K}}_{N \times N \times T}$ 。如图 4 所示, 图中显示了随机缺失位置的太赫兹时域光谱信号恢复效果。

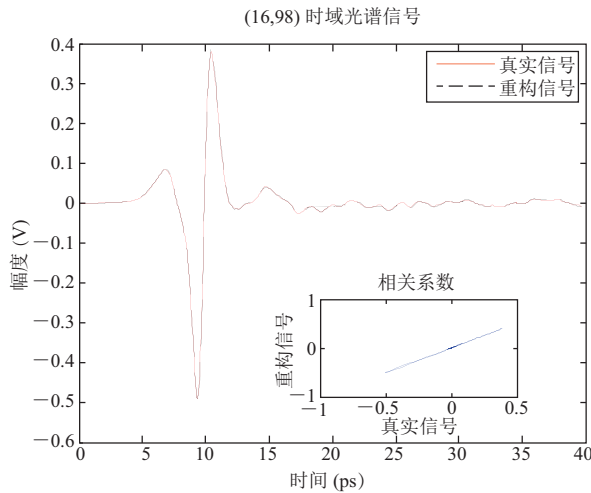


图 4 缺失点太赫兹时域光谱数据恢复情况

Fig. 4 Reconstruction of missing position terahertz time domain spectroscopy data

图 4 中小图表示缺失点重构信号 Rebuild 和

真实信号 Origin 的相关度, 相似性呈现直线相关, 计算相关系数

$$\rho_{(\text{Origin, Rebuild})} = \frac{\text{Cov}(\text{Origin, Rebuild})}{\sqrt{D(\text{Origin})} \sqrt{D(\text{Rebuild})}} \quad (7)$$

其中, $\text{Cov}(\text{Origin, Rebuild})$ 表示真实信号和重构信号的协方差; $D(\text{Origin})$ 和 $D(\text{Rebuild})$ 分别表示真实信号和重构信号的方差。相关系数 $\rho_{(\text{Origin, Rebuild})} = 99.95\%$, 表明单像素重构效果较为精确。

将重构的太赫兹时域光谱 $\hat{\mathbf{K}}_{N \times N \times T}$ 进行太赫兹时域光谱成像, 目前常见的成像方式^[20]主要有时域和频谱成像模式。时域成像模式有最大值/最小值时间点成像、峰峰值成像、最大值/最小值成像。其中, 最大/最小值时间点对应样品厚度信息, 最大值/最小值、峰峰值分别对应样品透过率和损耗信息。频谱成像模式中, 可以对特定频率成分进行成像, 直观反映样品对应频率的吸收情况。本文采用峰值信噪比 (Peak Signal Noise Ratio, PSNR) 和相对误差 (Relative Error, RE) 作为性能评价指标, 对欠采样图像重建的效果进一步量化评估。

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(i, j) - \bar{f}(i, j)]^2}{N \times N} \quad (8)$$

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255 \times 255}{\text{MSE}} \quad (9)$$

$$\text{RE} = \frac{\|f(i, j) - \bar{f}(i, j)\|_2}{\|f(i, j)\|_2} \quad (10)$$

其中, MSE (Mean Square Error) 表示均方根误差; $f(i, j)$ 表示全采样图像灰度; $\bar{f}(i, j)$ 表示欠采样重构图像灰度, 图像大小 $N \times N$ 。本文中利用太赫兹时域光谱系统对干燥兔子角膜进行全采样和欠采样的时域成像 (如图 5) 和频谱成像 (如图 6)。

比较全采样结果和欠采样重建效果, 最大值/最小值时间点表明干燥兔子角膜大部分较为平整, 但是中间区域有所不同, 而最值成像突

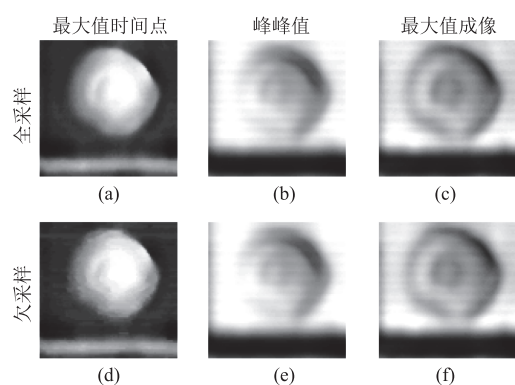


图5 干燥兔子角膜太赫兹时域成像

Fig. 5 Terahertz time domain imaging of dry rabbit cornea

出了角膜干燥过程中出现的内陷效果。用峰值信噪比 PSNR 和相对误差 RE 判定重构效果, 如表 1 所示。

表 1 干燥兔子角膜太赫兹时域成像重建效果

Table 1 Reconstruction result of dry cornea time

| domain imaging | | | |
|----------------|----------|----------|---------|
| 评价指标 | 最大值时间点成像 | 峰峰值成像 | 最大值成像 |
| PSNR (dB) | 32.216 2 | 34.134 1 | 38.487 |
| RE | 0.051 4 | 0.028 1 | 0.018 7 |

表 1 说明欠采样和重构的方法可以较为精准恢复丢失数据, 重构的单帧时域图像与全采样单帧图像较为接近, 重构效果比较好。由单像素的时间波形进行傅里叶变换可以得到频谱信息。根据感兴趣的频率点分割出单帧频率图像, 部分结果如图 6 所示。

图 6 反映了部分频点幅度成像。相比全采样频谱成像, 欠采样在低频处重建较好, 高频处出现部分失真。进一步计算峰值信噪比 PSNR 和相对误差 RE 随频率的变化曲线如图 7 所示。随着频率增加, 峰值信噪比逐渐降低, 相对误差逐渐增大, 且抖动也越来越明显。主要原因是本系统的有效频率范围是 0.1~1.5 THz, 随着频率的升高, 背景噪声使得信号在变换域的稀疏度上升, 欠采样方法不能很好地满足压缩感知条件^[21], 有效成像范围缩短到 0.1~1 THz, 表明图像恢复具

有带宽有限性。

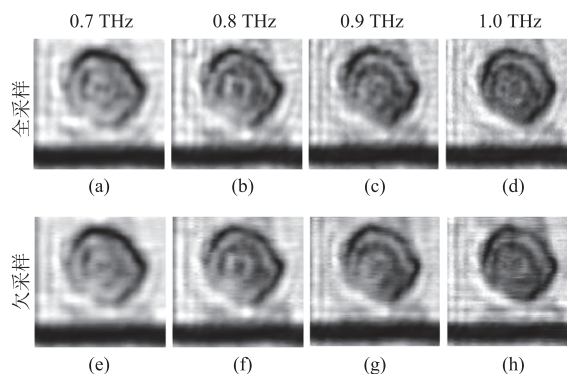


图6 干燥兔子角膜部分频谱成像

Fig. 6 Part of terahertz frequency domain imaging of dry rabbit cornea

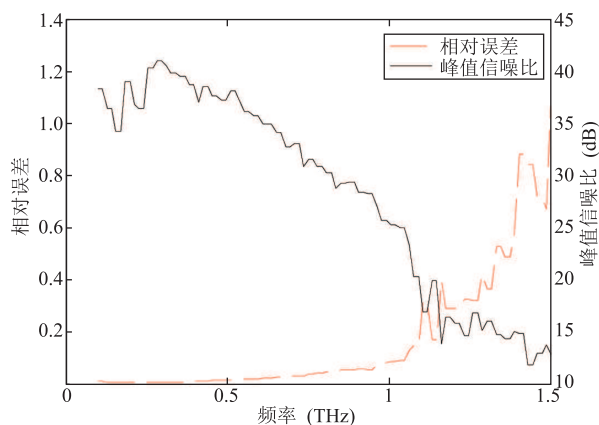


图7 干燥兔子角膜 PSNR 和 RE 随频率变化趋势

Fig. 7 Peak signal noise ratio and relative error of dry rabbit cornea with frequency changing

除干燥兔子角膜外, 本文还对遮蔽刀片和纸币水印进行欠采样的对比实验, 比较全采样方法与欠采样方法的耗时和数据存储量情况, 如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 本文提出的空间欠采样的压缩感知重建方法在压缩比为 0.5 时, 重建的精度较高, 节省了约 50% 的采样时间和存储空间。对于不同分辨率成像, 空间欠采样方法具有同样的优点。

上述实验都是在某一个固定压缩比 ($CR =$

表 2 欠采样和全采样耗时/存储比较

Table 2 Time/storage consuming between under sampling and full sampling

| 采样对象 | 成像尺寸 | 扫描范围 (mm×mm) | 步长(mm) | 全采样 | | 欠采样 | |
|--------|---------|-----------------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | | | | 耗时(min) | 存储(MB) | 耗时(min) | 存储(MB) |
| 干燥兔子角膜 | 101×101 | 21×21 | 0.2 | 291 | 275 | 133 | 126 |
| 遮蔽刀片 | 71×71 | 22×22 | 0.3 | 148 | 136 | 67 | 62 |
| 纸币水印 | 116×116 | 24×24 | 0.2 | 384 | 364 | 175 | 167 |

0.5)的情况下完成的。为了进一步探讨本文方法的提升空间,下面以干燥兔子角膜的时/频域成像为例,具体分析不同压缩比下的空间欠采样重构效果。评价指标仍选用峰值信噪比 PSNR 和相对误差 RE,结果如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可以看到,空间欠采样重构效果随着压缩比的增大而增强,峰值信噪比上升,相对误差下降。虽然整体趋势相似,但是不同指标变好趋势不尽相同。最大/最小时间所成的像,由于图像对比度强,欠采样重构不能很好地恢复非常陡峭的边缘,因此相对其他缓慢变化图像,恢复精度不高。

图 9 频谱成像中,空间欠采样重构效果也随着压缩比的增大而变好,但是,不同频谱像的恢复效果不同。低频图像的恢复效果比高频图像好,这和上述带宽有限性一致。随着压缩比的减

小,带宽有限性会变得更加明显,可接受带宽逐渐缩小。这说明压缩比决定了频谱成像中有效带宽。

从时域和频谱成像效果随压缩比变化曲线可以发现,高压压缩比的图像恢复效果比较好,但是并没有在采样时间和存储量上有着多大的提升,而低压压缩比虽然做到了在采样时间和存储量上的优化,但是重构精度有所下滑。综合考虑,设置压缩比 0.4~0.6 比较合适,节省了约 40%~60% 的采样时间和存储空间,时域成像的恢复精度高,频谱成像的有效重建带宽约 0.1~1 THz。

4 相似研究比较分析

表 3 给出了本文方法与部分其他相似研究的比较结果。如前文所述,其他方法(目前大

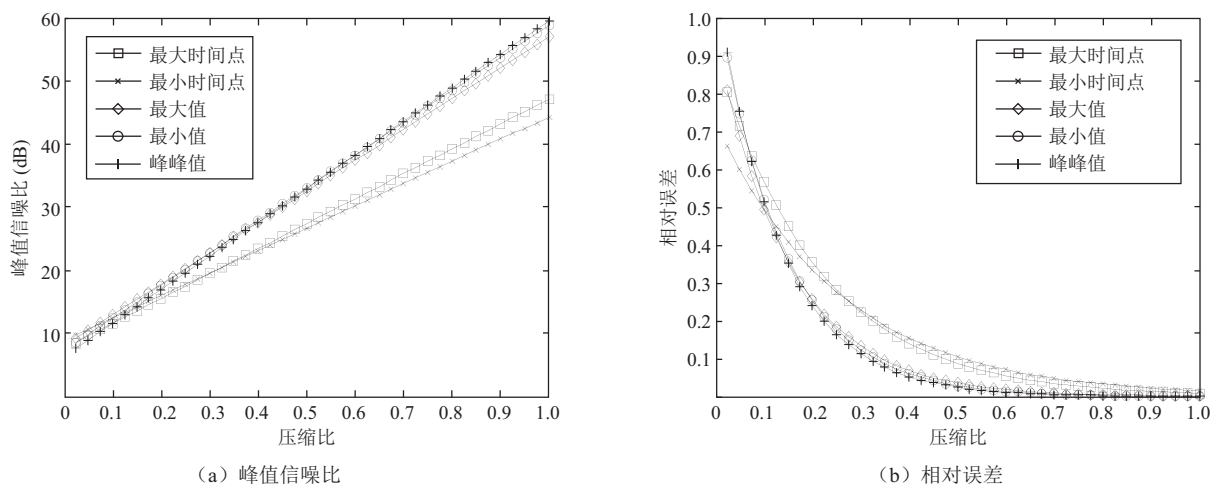


图 8 不同压缩比下时域成像性能

Fig. 8 Performance of time domain imaging under different compressed ratio

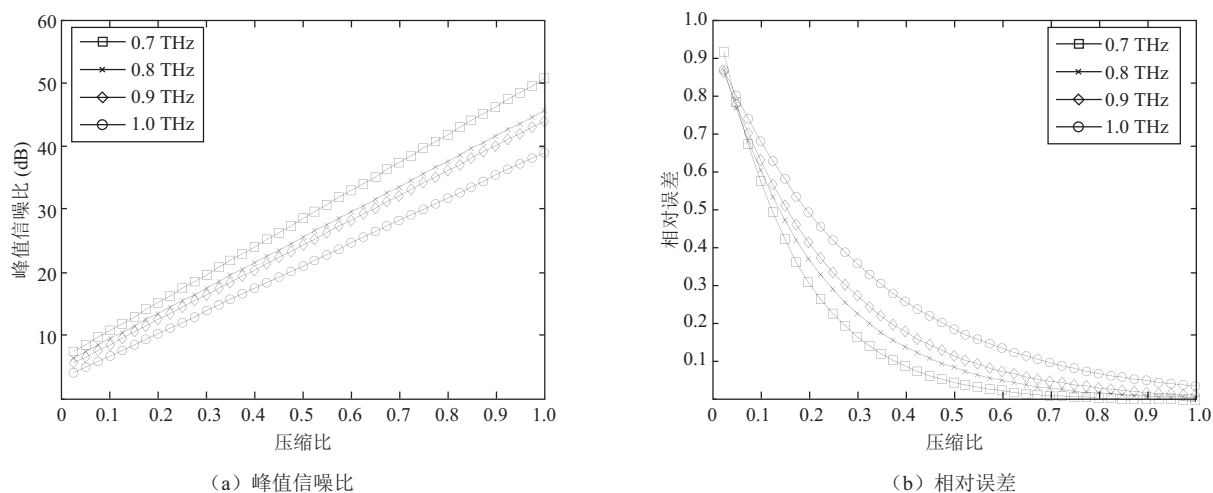


图9 不同压缩比下部分频谱成像性能

Fig. 9 Performance of part of spectrum imaging under different compressed ratio

表3 本文方法与部分其他相似研究的比较结果

Table 3 Comparison results with some research unit methods

| 评价指标 | 研究方法 | | | | | | |
|-----------|-----------------------|---------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------|
| | Chan 等 ^[5] | 张琳昊等 ^[6] | Shen 等 ^[22] | Shen 等 ^[23] | Augustin 等 ^[24] | Duan 等 ^[25] | 本文方法 |
| 调制器件 | 刻蚀 PCB 掩膜板 | 刻蚀 PCB 掩膜板 | 优化模板 | 圆形编码盘 | 液晶调制器 | 金属掩膜 | 无 |
| 压缩比 | 0.20~0.40 | 0.50 | 0.16 | 0.10 | 0.30 | 0.20 | 0.40~0.60 |
| 图像分辨率 | 32×32 | 32×32 | 32×32 | 20×20 | 32×32 | 20×20 | 101×101, 71×71 |
| 频谱范围(THz) | 0.15 | 0.20 | 0.10~0.45 | 0.10~2.00 | 0.35 | 1.75 | 0.10~1.00 |

部分为压缩感知成像)普遍依赖调制器的实现,如 Chan 等^[5]和张琳昊等^[6]采用了刻蚀 PCB 掩膜板, Shen 等^[22]和 Shen 等^[23]分别使用了优化模板和圆形编码盘, Augustin 等^[24]使用了液晶调制器和本征硅片,而 Duan 等^[25]则使用了金属掩膜。由于调制器能够提供较好的非相干模板,因此这些方法能够实现相对较低的压缩比,如 Shen 等^[23]圆形编码器系统的压缩比能达到 0.1。另一方面,调制器件的使用会导致系统的成本和复杂度有所增加,而本文方法并不需要调制器,因此不需要额外的硬件条件,不增加系统的复杂度,从而能够较低成本实现太赫兹压缩感知成像。此外,与本文方法相比,其他方法目前所获得的图像分辨率通常较低,如 Shen 等^[23]使用的圆形编码器系统和 Duan 等^[25]使用的金属掩膜系统的图

像分辨率仅为 20×20 。即使在压缩比为 0.5 的情况下,本文方法获得的图像分辨率也是其他方法的 4 倍以上。另外,其他方法的图像分辨率受限于模板调制器的空间分辨率,而本文方法不需要调制器,因此其图像分辨率并没有这方面的限制。

5 结论

本文主要研究了压缩感知在太赫兹时域光谱系统的应用,提出一种空间欠采样压缩感知重构方法。相比传统的全扫描方式,此方法可以减少约 40%~60% 的数据和成像时间。相比模板操作单点测量的压缩感知太赫兹系统,该方法不需要保存和控制大量的测量模板,不增加硬件条件和负担。该欠采样采集策略和重构方法也可以运用

到单频/连续太赫兹单点成像。欠采样虽带来部分优化,但是从结果可以看出,欠采样恢复对缓变图像的恢复效果较好,而细节过多图像的恢复效果有待提升。另外,频谱成像中信号恢复具有一定的频率范围,且随着压缩比减小,可接受带宽变窄。究其原因,复杂图像或高频图像在本文的测量矩阵和变换基下不能很好地稀疏化,导致压缩比确定的情况下,测量点数不能较好地满足压缩感知的测量条件,这将是后期需要改进的地方。

参 考 文 献

- [1] Mittleman DM, Jacobsen RH, Nuss MC. T-ray imaging [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(3): 679-692.
- [2] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 80-88.
- [3] Donoho DL. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [4] Laska JN, Wakin MB, Duarte MF, et al. A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression [C] // *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE): Computational Imaging IV*, 2010, 6065: 43-52.
- [5] Chan WL, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121105-121105-3.
- [6] 张琳昊, 张亮亮, 张存林. 基于压缩传感的单点太赫兹成像 [J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(6): 14-18.
- [7] 李泽, 王民钢, 刘小华, 等. 基于压缩传感的太赫兹成像 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1523-1527.
- [8] Chen HT, Padilla WJ, Cich MJ, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 148-151.
- [9] Chan WL, Chen HT, Taylor AJ, et al. A spatial light modulator for terahertz beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(21): 213511-213511-3.
- [10] Watts CM, Montoya J, Krishna S, et al. Coded and compressive THz imaging with metamaterials [C] // *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE): Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications VII*, 2014.
- [11] Watts CM, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 605-609.
- [12] Cheng LJ, Liu L. Optical modulation of continuous terahertz waves towards cost-effective reconfigurable quasi-optical terahertz components [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28657.
- [13] Donoho DL, Tanner J. Thresholds for the recovery of sparse solutions via L1 minimization [C] // *2006 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems*, 2006: 202-206.
- [14] Gribonval R, Schnass K. Some recovery conditions for basis learning by L1-minimization [C] // *The 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing*, 2008: 768-773.
- [15] Do TT, Gan L, Nguyen N, et al. Sparsity adaptive matching pursuit algorithm for practical compressed sensing [C] // *2008 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computer*, 2008: 581-587.
- [16] Fang H, Yang H. A new compressed sensing-based matching pursuit algorithm for image reconstruction [C] // *International Congress on Image & Signal Processing*, 2012: 338-342.

- [17] Mohimani H, Babaie-Zadeh M, Jutten C. A fast approach for overcomplete sparse decomposition based on smoothed l_0 norm [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(1): 289-301.
- [18] Hyder MM, Mahata K. An improved smoothed l_0 approximation algorithm for sparse representation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(4): 2194-2205.
- [19] Liu WQ, Lu YF, Jiao GH, et al. Terahertz optical properties of the cornea [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 344-348.
- [20] Mickan SP, Zhang XC. T-ray sensing and imaging [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(8): 1528-1558.
- [21] Candès EJ. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing [J]. *Comptes Rendus Mathématique*, 2008, 346(9-10): 589-592.
- [22] Shen YC, Gan L, Stringer M, et al. Terahertz pulsed spectroscopic imaging using optimized binary masks [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(23): 231112-231112-3.
- [23] Shen H, Newman N, Gan L, et al. Compressed terahertz imaging system using a spin disk [C] // *The 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010: 1-2.
- [24] Augustin S, Hieronymus J, Jung P, et al. Compressed sensing in a fully non-mechanical 350 GHz imaging setting [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2015, 36(5): 496-512.
- [25] Duan P, Wang Y, Xu D, et al. Single pixel imaging with tunable terahertz parametric oscillator [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3670-3675.