

基于压缩传感的太赫兹成像

李 泽^{1,3}, 王民钢², 刘小华¹, 赵跃进¹, 张存林³

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072;
3. 首都师范大学 物理系 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 太赫兹波谱与成像
北京市重点实验室, 北京 100048)

摘 要: 介绍了一种基于压缩传感理论的 THz 成像方式, 该理论突破了传统奈奎斯特采样定律的限制, 可以以远小于图像总像素数的少量测量值来恢复出原始图像, 从而很大程度上缩短了成像时间、提高了内存资源的利用率。通过对该理论的分析可知, 变换基、测量矩阵和重构算法是该理论的三个重要因素, 通过一系列仿真试验, 分别对不同的变换基、测量矩阵和重构算法作了对比, 根据对比结果, 得到了最适合于文中被成像物体的变换基、测量矩阵以及重构算法。最后, 利用离轴抛物面镜代替聚乙烯透镜搭建了成像系统, 得到了初步的试验结果。

关键词: 压缩传感; THz; 变换基; 测量矩阵; 重构算法

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1523-05

Terahertz imaging based on compressed sensing

Li Ze^{1,3}, Wang Mingang², Liu Xiaohua¹, Zhang Cunlin³

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: A THz imaging system based on the theory of compressed sensing was described, the theory break through the limit of Nyquist sampling law, it can reconstruct the original image by only a small number of measurements, so that it can shorten the imaging time and improve the utilization of memory resources to a large extend. Through the analysis of the theory, the three important factor of the theory are the transform matrix, the measurement matrix, and the reconstruction algorithm. A series of simulation was done to contrast different transform matrixes, different measurement matrixes and different reconstruction algorithms respectively, and according to contrast results, the most suitable transform matrix, measurement matrix and reconstruction algorithm for the image object were decided. Finally, the imaging system was set up by off-axis throw lens instead of polyethylene lens, and preliminary

收稿日期: 2012-10-04; 修订日期: 2012-11-10

基金项目: 国家 973 计划(2007CB310408); 国家自然科学基金(11004140、60977009); 北京市教育委员会科技面上项目(11224010011)

作者简介: 李泽(1988-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹成像方面的研究。Email: lize586@126.com

导师简介: 张存林(1961-), 男, 教授, 博士, 主要从事太赫兹光谱与成像技术和光电信息功能材料等方面的研究。

Email: cunlin_zhang@yahoo.com

experimental results were made by this experiment system.

Key words: compressed sensing; THz; transform matrix; measurement matrix; reconstruction algorithm

0 引 言

近年来,THz 成像已成为一个深入的研究课题。然而,现有的成像系统都有其各自的缺点,如成像速度慢、分辨率低、硬件较复杂等。随着科技的发展,开发出一种速度更快、分辨率更高、成本更低的 THz 成像系统已成为一个研究重点。

压缩传感理论的提出为这一研究提供了一个很好的突破口,该理论表明:当信号具有稀疏性或可压缩性时,通过采集少量的信号投影值就可实现信号的准确或近似重构。这样就可以在很大程度上减少采样次数,美国的 Rice University 已成功将该理论应用于可见光的成像系统中,研究出了单点相机^[1]。

文中通过对压缩传感理论进行分析,将该理论应用于 THz 成像系统中,分别从压缩传感理论、变换基的对比、测量矩阵的对比、重构算法的对比、实验装置、实验结果与展望这六方面进行介绍。

1 压缩传感理论

2004 年,由 Donoho 与 Candes 等人提出的压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论是一个充分利用信号稀疏性或可压缩性的全新信号采集、编解码理论。该理论打破了奈奎斯特采样定律的限制,以很少的采样点来恢复原始信号。对于信号的采集、编码,传统的方法是(如图 1 所示):首先根据奈奎斯特采

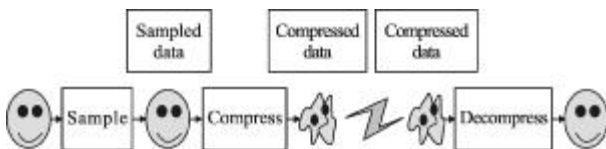


图 1 传统的信息获取与处理流程

Fig.1 Traditional information acquisition and processing

样定律对信号采样,再对所有的采样数据进行编码,然后将编码值存储、传输;在接收端,接收的信号经过解压缩、反变换后得到恢复信号,该过程是编码的逆过程。这种传统的方法存在两个缺陷^[2]:(1) 由于

受到奈奎斯特采样定律的限制,信号的采样频率必须高于信号带宽的 2 倍,这使得在对高清信号进行采集时,硬件方面很难满足要求;(2) 在对采样数据进行压缩编码时,很多压缩得到的小系数被舍弃,使得数据计算和内存资源得不到充分应用。

压缩感知理论的采样、编码思想和传统的思想有很大的不同(如图 2 所示),该理论对于信号的采样、压缩是同时进行的,其基本思想是:如果信号通过某种已知的变换(如离散余弦变换、快速傅里叶变换)是可压缩的,那么就可以用比原始像素数量少的测量值来精确恢复出原始信号。这样做的直接好处就是可以很大程度上降低采样频率,测量值也并非原始信号,而是原始信号从高维到低维的投影值。从数学上来看,每个测量值是传统理论下每个样本信号的组合函数,即每个测量值都包含所有样本信号的少量信息。解码过程不是编码的简单逆过程,而是利用信号稀疏分解中已有的重构算法在概率意义上实现信号的精确重构或一定误差下的近似重构^[3]。

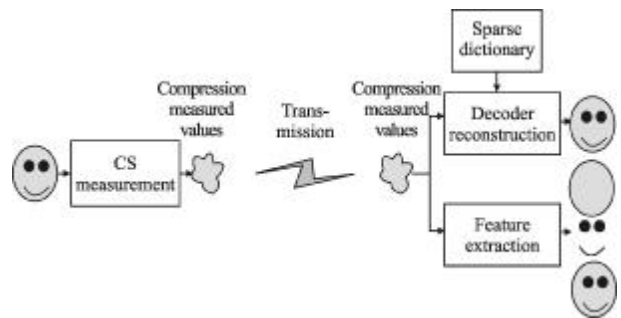


图 2 压缩传感理论框架

Fig.2 Theory frame of compressive sensing

压缩传感理论的测量过程是线性的,这里假设 X 是一个长度为 N 的一维原始信号,测得值 y 是原始信号在测量矩阵 Φ 下的线性投影,如公式(1)所示。

$$y_{M \times 1} = \Phi_{M \times N} X_{N \times 1} \tag{1}$$

式中: M 表示测量次数,因此, y 是一个长度为 M 的一维信号,由于 $M \ll N$,公式(1)是一个欠定方程组,有无穷多解,无法根据 y 重构出原始信号 X ,然而,理论表明,如果 X 是稀疏的,并且满足测量次数 $M=$

$O(K\log(N))$ 和 Φ 符合约束等距性条件这两个要求,那么, X 可以由 y 通过求解最优 l_0 范数问题精确重构^[4]。

但是,自然界中的很多信号都不是稀疏的,因此,上述过程不能直接运用于自然信号中。而信号稀疏理论表明,自然信号 X 可以通过一定的变换基变换,得到其稀疏表示,如公式(2)所示。

$$X_{N \times 1} = \psi_{M \times N} S_{N \times 1} \quad (2)$$

式中: ψ 为变换基; s 为 X 的稀疏表示,如果 s 中只有 K 个元素非零,那么就称 s 为 X 的 K 稀疏表示。

测量矩阵 Φ 与变换基 ψ 合称为传感矩阵 Θ ,如公式(3)所示。将公式(2)和(3)代入公式(1)可得公式(4),此时,如果传感矩阵 Θ 满足约束等距性条件, s 为稀疏信号,测量次数 M 满足要求,那么就可以由 y 恢复出 s ,得到稀疏信号 s 后,代入公式(2),即可得到原始信号 X 。

$$\Theta_{M \times N} = \Phi_{M \times N} \psi_{M \times N} \quad (3)$$

$$y_{M \times 1} = \Theta_{M \times N} S_{N \times 1} \quad (4)$$

从上述理论分析中可得,压缩传感理论有三个重要因素:变换基、测量矩阵、重构算法,以下将对各种因素分别进行讨论。

1.1 不同变换基的对比

压缩传感的先验条件是原始信号通过变换基得到其稀疏表示。目前,比较常用的变换基有:快速傅里叶变换基(FFT)、离散傅里叶变换基(DFT)、离散小波变换基(DWT)和离散余弦变换基(DCT)^[5]。对于如何选择变换基还没有一个统一的标准,只能根据实际图像的不同选择最合适的变换基进行变换。文中选取了三种图像,采用同样的测量矩阵、同样的重构算法和同样的测量次数对以上四种变换基做了仿真对比,对比效果如图3所示。

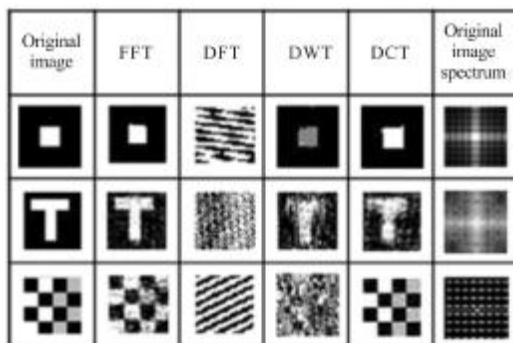


图3 不同变换基的对比

Fig.3 Contrast of different transform matrix

可以看出,快速傅里叶变换和离散余弦变换对于这三种图像都有较好的重构效果,离散小波变换对于第三个图像的重构效果不是很好,离散傅里叶变换对于这三幅图像的重构效果都很差,因此,在后续的重构算法中选择离散余弦变换作为变换基。

1.2 不同测量矩阵的对比

根据公式(3)和(4)可知,传感矩阵需要满足约束等距性条件,约束等距性的等价条件是测量矩阵 Φ 与变换基 ψ 不相关,即要求 Φ 的行向量和 ψ 的列向量不能相互线性表示。理论表明,当测量矩阵为高斯随机矩阵、 $-1/1$ 矩阵、二值随机矩阵时,传感矩阵能以较大的概率满足约束等距性条件。文中在采用同样的变换基、同样的测量次数和同样的重构算法的情况下对以上三种测量矩阵的成像效果进行了仿真对比,对比结果如图4所示。

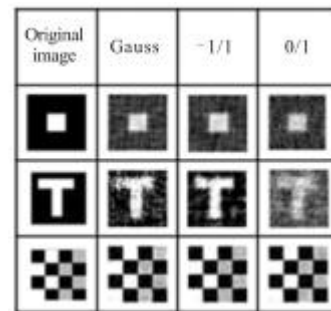


图4 不同测量矩阵的对比

Fig.4 Contrast of different measurement matrix

可以看出,这三种测量矩阵的不同对于成像效果的影响不大,从视觉角度都可以较好地对目标进行成像。

1.3 不同重构算法的对比

压缩传感理论的核心是重构算法,该算法要求由 M 次测量向量 y 重构出长度为 $N(M \ll N)$ 的稀疏信号 s 。目前,已提出了多种算法,主要包括最小 l_1 范数法、匹配追踪系列算法、迭代阈值法和最小全变分法^[6-7]。文中在采用同样的变换基、同样的测量矩阵和同样的测量次数的情况下,对压缩采样匹配追踪法、压缩采样正交匹配追踪法、最小 l_1 范数法、正交匹配追踪法、等式约束全变分法和迭代阈值法进行对比,结果如图5所示。

可以看出,压缩采样匹配追踪法和正交匹配追踪法的恢复效果较差,压缩采样正交匹配追踪法、最

小 l_1 范数法和等式约束全变分法的恢复效果较好, 迭代阈值法的恢复效果最好。

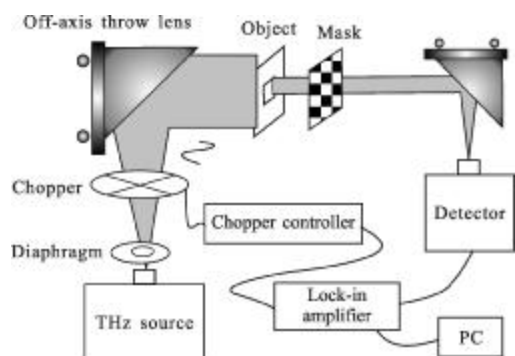


图 5 不同重构算法的对比

Fig.5 Contrast of different reconstruction algorithm

2 实验装置

实验装置图如图 6 所示, 该套装置包括一个 CO_2 泵 CH_3OH 连续 THz 源、一个热释电探测器、300 个随机掩模板和两个离轴抛物镜。由 THz 源发出的连续 THz 波通过离轴抛物镜后准直为平行光束照射到被成像物体上, 然后通过一个随机掩模板和物体, 最后由离轴抛物镜将平行光束聚焦到 THz 探测器上。THz 波依次通过被成像物体与随机掩模板, 从而也就实现了被成像物体与随机掩模板求内积的过程, 如公式(1)所示(可以将 $M \times N$ 的二维图像看成 $N^2 \times 1$

| Original image | Cosamp | Cosamp | L1 | Somp | Tveq | Iterative threshold |
|----------------|--------|--------|----|------|------|---------------------|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

图 6 成像实验装置

Fig.6 Experimental setup

的一维图像), 光路中掩模板的应用就是对压缩传感理论的实际体现, 探测器置于离轴抛物镜的焦点处, 探测到的是 THz 的强度值, 而不是物体的像素值, 300 个掩模板就可以得到 300 个强度值, 每个强度值都包含了被成像物体的一部分信息, 将这 300 个强度值组成一个列向量, 就得到了公式(1)中的 $y_{M \times 1}$ 。

根据前面进行的对比, 文中的变换基选择的是离散余弦变换基, 重构算法选择迭代阈值法, 在测量矩阵的选择上, 由于测量矩阵是通过掩模板实现的, 而受到制作工艺的限制, 掩模板只能实现透 THz(代表 1)和不透 THz(代表 0)两种状态, 其采用的是对 THz 具有高透性的聚四氟乙烯为基板的 PCB 板, 不透 THz 的部分镀铜, 从而也就实现了二值随机矩阵, 为了保证良好的成像效果, 二值随机矩阵中 0 和 1 的数目各占 50%^[8]。

文中选择离轴抛物镜代替传统的聚乙烯透镜来实现光路的准直与聚焦^[9-10], 这样做的好处是离轴抛物镜对红光和对 THz 的效果是一样的, 因此可以在实验前先将一个氦氖激光器置于探测器的位置, 氦氖激光器发出波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的红光, 通过调整, 使得红光在光阑平面处的光斑尽量小, 并且测量该光斑的直径 d , 调整孔径光阑的通光孔径 D , 使得 $D=d$, 根据光路的可逆性, 用探测器代替激光器后, 可以保证进入探测器中的光的孔径为 d , 从而实现了光路的精确对准, 保证了实验效果。

3 实验结果

将 THz 源的发射频率设定为 350 GHz, 对应的波长为 0.857 mm。被成像物体如图 7(a)所示, 该物体是一个中间有个长和宽都为 1 cm 方孔的覆铜板。图 7(b)为 1 800 次的仿真结果, 图 7(c)为 1 800 次的测量结果。

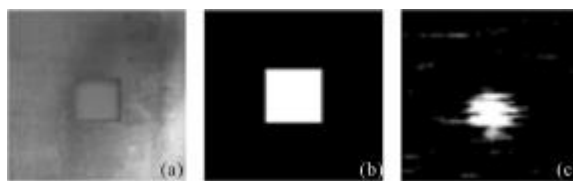


图 7 成像物体和仿真成像结果和实验成像结果

Fig.7 Image object and simulation of imaging result and experimental imaging result

从图 7(c)可以看出, 成像效果不是很理想。图 8 为仿真测得值和实验测得值的对比图, 其中, 测得值扩大了 10 倍。

通过计算, 仿真测得值和实验测得值这两组数据的相关性为 0.016 9, 从而也就造成了恢复效果差别较大的结果, 这主要是因为 THz 源发出的 THz 光

没有很好地准直、以及在更换随机掩膜板时没有保证位置精度造成的,在之后的工作中将着重对这两点进行改进。

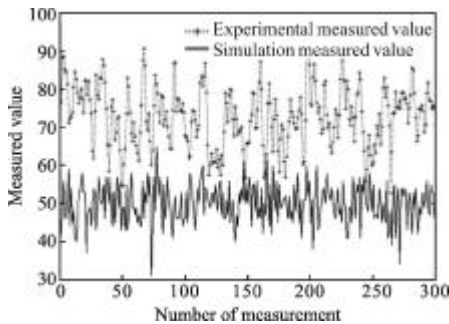


图 8 仿真测得值与实验测得值对比

Fig.8 Contrast of simulation measured value with experimental measured value

4 结 论

介绍了一种基于压缩传感的 THz 成像方式,这种方式突破了奈奎斯特采样定律的限制,可以很大程度地提高成像速度,使得高清信号的采集成为可能,同时,通过对比选择出了最适合文中被成像物体的变换基、测量矩阵以及重构算法,并且改进了实验装置,得到了实验结果。

此外,通过对比图中三个图像的频谱图可知,第一幅图像的低频成分较多,第二幅图像的高频成分较多,第三幅图像的灰度成周期排列,那么,是不是快速傅里叶变换能更好地对高频成分较多的图像进行稀疏变换,而离散余弦变换能更好地对规律性图像进行稀疏变换,还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Wai Lam Chan. Terahertz imaging with compressive sensing [D]. Houston: Rice University, 2010: 31-39.
- [2] Fan Xiaowei, Liu Zhe, Liu Can. Image reconstruction model using block compressed sensing [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(29): 153-155. (in Chinese)
- [3] Guo Junwei. Imaging system of synchronous sample and compression based on CS theory [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(6): 525-530. (in Chinese)
- [4] Zhang Chunmei, Yin Zhongke, Xiao Mingxia. Overcomplete express and sparse decomposition of signal based on the redundant dictionary[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(6): 628-633. (in Chinese)
- [5] Li Bo, Xie Jiezheng, Wang Boliang. Signal reconstruction based on compressed sensing [J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(5): 23-29. (in Chinese)
- [6] Li Shutao, Wei Dan. A survey on compressive sensing [J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(11): 1369-1377. (in Chinese)
- [7] Du Keming, Jiang Yuanda, Chen Ying, et al. Photon counting imaging system based on compressive sensing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 363-368. (in Chinese)
- [8] Zhang Yalin. Passive THz imaging and compressed sensing imaging simulation [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010: 47-49. (in Chinese)
- [9] Zhao Yaqin. Single-pixel terahertz imaging via compressed sensing [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011: 33-35. (in Chinese)
- [10] Lu Yimin, Wang Jiachun, Lin Zhidan. Continuous THz transmission imaging experiment of 337 μm laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 232-235. (in Chinese)

陈益敏, 汪家春, 林志丹. 337 μm 连续太赫兹激光透射成像[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 232-235.