

## 太赫兹成像质量提升方法

张 智<sup>1,3</sup>, 林栩凌<sup>1</sup>, 张建兵<sup>2</sup>, 何红艳<sup>1</sup>

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094; 2. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;  
3. 南京理工大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 太赫兹成像是空间光学遥感成像领域的新方向, 然而太赫兹成像分辨率受到器件加工和制造工艺水平限制。为了提高太赫兹成像的图像分辨率, 提出一种改善太赫兹过采样成像的图像处理方法。首先, 对响应在太赫兹谱段的目标进行错位观测形成多路观测结果; 然后, 对多路观测的太赫兹图像进行范数优化约束和增强滤波; 最后, 将经过范数优化约束和滤波增强后的多路太赫兹图像重构成一幅分辨率更高的图像。实验证明: 这种方法能够在抑制背景噪声的同时, 有效提高目标边缘连续性。从图像质量评价指标上看, 所提方法相较于传统方法能提升图像的有效细节信息, 进而增强图像质量。

**关键词:** 太赫兹成像; 增强; 遥感图像; 滤波; 空间光学

**中图分类号:** TP751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1126002

## Improvement method for terahertz imaging quality

Zhang Zhi<sup>1,3</sup>, Lin Xuling<sup>1</sup>, Zhang Jianbing<sup>2</sup>, He Hongyan<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Space Mechanic & Electricity, Beijing 100094, China;  
2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;  
3. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Terahertz imaging was new trend of space optical remote sensing imaging field. However, the resolution of terahertz imaging was difficultly raised, restricted by current level processing and manufacturing technology. The improvement method for terahertz imaging quality was presented to raise the quality of terahertz image. Firstly, the multi-observation stagger terahertz images were received, the target spectrum response ranges was terahertz. Then, the multi-observation images were norm optimization constrained and filtering enhanced. Finally, the higher resolution of terahertz image was reconstructed by multi-observation low resolution original terahertz images. The experimental result showed that target edge was more continuous after being processed by the proposed method. Besides, the background noise on original low resolution Terahertz image was constrained. The evaluation index of image quality was increased, which meant that the proposed method is better than conventional methods. The detail information of processed image was enhanced and then quality of the original terahertz image was improved.

**Key words:** terahertz imaging; enhancement; remote sensing image; filtering; space optics

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-04-20

基金项目: 国防科技基金(0310151)

作者简介: 张智(1978-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事模式识别与智能图像处理、新型光学传感器设计及在轨数据处理、信息处理新方法的研发等方面的研究工作。Email: wzh201014032@163.com

## 0 引言

太赫兹成像从 20 世纪 90 年代提出以来,迅速发展成为一大热门领域。太赫兹谱段位于微波和红外光谱之间,通常介于 0.1~10 THz。因其所在的独特谱段分布区间,使其兼顾微波和红外特性的前提下还拥有微波、红外无可比拟的探测优势<sup>[1]</sup>。例如太赫兹比红外更具穿透力,可以透过尘埃和烟尘颗粒。太赫兹的波长比微波更短,其发射方向性好于微波,较之微波具备更高的分辨率,成像数据更易解译。因而其探测器的尺寸和重量远小于微波器件,适于卫星搭载。但是由于太赫兹在水中衰减很明显,不利于卫星探测大气层内的目标,更适于探测大气层外的空间目标。

近年来,国际上在太赫兹成像领域发展飞快,如欧空局(ESA)开发出谱段在 0.25、0.3 THz 的相机,芬兰的 A.Luukanen 等人研制出一种 128 pixel 的阵列式被动型太赫兹相机;美国的 M.I.B. Shams 提出将压缩感知理念应用到太赫兹成像,提升了成像质量<sup>[2-3]</sup>;D. Gergelyi 等人提出可扩展的低噪声太赫兹相机,提高图像信噪比,改善了成像质量<sup>[4]</sup>。受制于探测器件的加工工艺限制,国内在该方面的研究还处于起步阶段,中国科学院、所<sup>[5]</sup>和相关高校对此开展研究<sup>[6]</sup>。

## 1 方法的提出

现有空间光学遥感器往往采用线阵推扫的方式成像,地面采样分辨率与遥感器之间存在着严格的几何映射关系<sup>[7]</sup>。为了提高光学遥感器的空间分辨率,突破现有器件加工能力的限制,采用过采样(又叫细分采样)技术提高成像分辨率,具有代表性的有法国 SPOT-5 卫星利用过采样技术得到地面分辨率从 5~2.5 m 的图像;欧洲 MSG 静止轨道气象卫星<sup>[8]</sup>采用探测元菱形排列实现 1.6 倍过采样;“风云二号”气象卫星采用过采样实现 1.7 倍的过采样;“风云四号”短波、中波红外谱段采用过采样实现了从 4~2 km 的探测。

## 2 光学遥感器多路信息合成原理

由于受到光照条件、随机噪声、成像时间、辐射源起伏效应抑制等因素的影响造成太赫兹脉冲成像的

效果差异较大,清晰度难以提高。因此,考虑采用多路信息合成且增强的处理方法提高空间分辨率。在理想情况下,视光学遥感器为理想采样系统需满足理想香农采样,即采样频率大于或等于两倍原始信号的截止频率时,能够完美的恢复出原始信号<sup>[9]</sup>。从系统设计指标的角度来看,如果探测器像元采样间隔为  $p$ ,则采样频率,即时探测器满足采样定理,但实际的系统往往属于欠采样系统。因而减小  $p$  的尺寸,可以优化采样系统,增加系统有效信息量。从这个意义上可见,采用过采样的设计,相当于减小了探测器的尺寸<sup>[10]</sup>。

另外,从光学成像系统的关键指标 MTF 来看,假设系统为理想采样系统,满足 sinc 采样,原系统 MTF 可表示为:  $MTF = \text{sinc}(pf) * \text{sinc}(pf)$ ,然而采用多路信息合成后  $MTF_{\text{过}} = \text{sinc}(pf/2) * \text{sinc}(pf/2)$ 。由参考文献[10]可见,采用过采样成像设计可以提高 20% 的成像系统分辨率。因此文中考虑采用过采样的设计思路实现太赫兹空间成像,对每一帧图像进行滤波、增强,并利用多路信息融合成一幅高分辨率的图像。不仅提高图像分辨率、增强像质,且去除了背景起伏的噪声影响。最终,将优化后的信息重建,得到更“干净”的图像。

多路信息合成系统成像质量的关键技术是采用的数据重建方法。目前,较为经典的数据重建方法包括凸集投影法(POC)和反向透射迭代法(IBP)<sup>[12]</sup>。简单的讲,凸集投影法(POC)主要采用集合论,对重建数据的解空间和凸集集合进行交叉投影,经过多次约束集合的迭代计算得到较为可行解;而反向透射迭代法通过多次迭代逐渐缩小实际低分辨率图像与模拟低分辨图像之间的误差,然后反向投影的方式将误差更新到估计的高分辨率图像中,以实现高分辨率图像的重建<sup>[12]</sup>。

## 3 方法处理流程

文中所提方法的流程图如图 1 所示。

(1) 首先,光学遥感太赫兹成像系统为多路成像系统,系统同时获取同一地物目标的多路错位观测信息,并结合光学遥感成像系统信息,对成像系统建模,得到多路光学遥感图像。每路太赫兹成像信息系统建模公式如下:

$$f(m,n) = I(m,n) \otimes H + N \quad (1)$$

式中： $(m,n)$ 为获取到光学遥感图像数据的尺寸，其中  $m$  为图像在横轴方向的尺寸， $n$  为图像在纵轴方向的尺寸； $H$  为 PSF 的二维高斯状的  $s \times s$  矩阵表示，由测量得到， $s$  为点扩展函数 PSF 在一个方向的尺寸； $I(m,n)$  为理想场景信息； $N$  为噪声项； $f(m,n)$  为光学遥感图像。

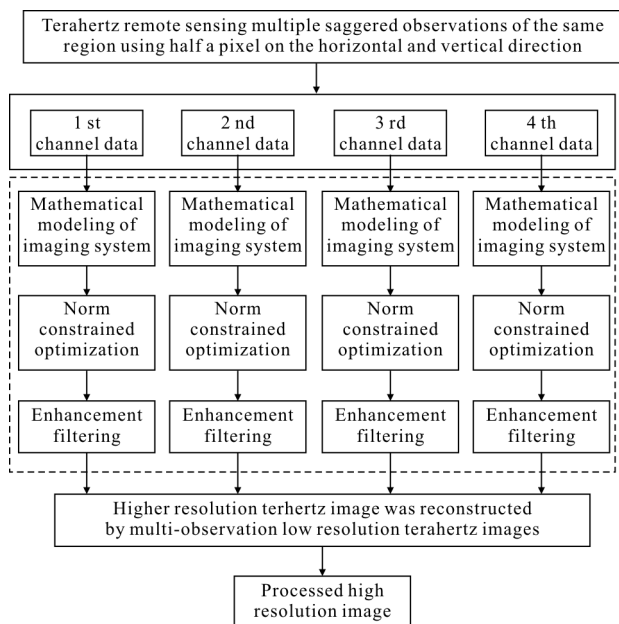


图 1 文中方法流程图

Fig.1 Block diagram of the proposed method

(2) 将多路光学图像对应进行滤波，对多路成像信息进行范数优化，通过求其最优解实现对太赫兹图像的滤波，得到滤波后的多路太赫兹图像  $I_{k,b}$ 。

$$\arg \min_{b=1 \dots 4} (\|f_{k,b}(m,n) - f_{0,b}(m_0,n_0)\|_2^2 + \lambda_b D_b) \quad (2)$$

式中： $k$  为迭代次数； $b$  为第  $b$  路成像； $\lambda_b$  为调整系数，取 0~1 之间； $\arg \min_{b=1 \dots 4}$  为求 2 范数最小化，通过优化使得  $I_{k,b}(m,n)$  趋近于理想值，最终得到优化后的多路太赫兹图像。 $H_b(m,n)$  为第  $b$  路成像系统 PSF 对应的矩阵  $H$ ； $f_{0,b}(m_0,n_0)$  为最初获取到的光学遥感图像； $N_b$  为光学遥感成像系统噪声。其中， $D_b$  为图像域梯度值，且公式如下：

$$D_b = \sqrt{(f_b(m+1,n) - f_b(m,n))^2 + (f_b(m,n+1) - f_b(m,n))^2} \quad (3)$$

(3) 多路太赫兹图像细节信息增强。将多路优化后的太赫兹图像进行双边滤波，得到细节信息增强的太赫兹图像，表示如下：

$$I_b^{\text{new}}(m,n) = \frac{\sum_{i,j=-\omega}^{\omega} G_s(m_0,n_0;m,n) G_r(m_0,n_0;m,n) I_{k,b}(m,n)}{\sum_{i,j=-\omega}^{\omega} G_s(m_0,n_0;m_i,n_j) G_r(m_0,n_0;m_i,n_j)}$$

$$G_s(m_0,n_0;m,n) = \exp\left\{-\frac{(m_0-m)^2 + (n_0-n)^2}{2\sigma_s^2}\right\}$$

$$G_r(m_0,n_0;m,n) = \exp\left\{-\frac{|I_{k,b}(m_0,n_0) - I_{k,b}(m,n)|}{2\sigma_r^2}\right\} \quad (4)$$

式中： $G_s(m_0,n_0;m,n)$  为高斯核函数，代表以  $(m_0,n_0)$  为中心，半径为  $\omega$  的矩形内点的空间相似度； $\sigma_s$  为其矩形内点的方差；而  $G_r(m_0,n_0;m,n)$  代表了以  $(m_0,n_0)$  为中心，半径为  $\omega$  的矩形内点的空间相似度； $\sigma_r$  为其矩形内点的方差。

(4) 将滤波后的多路信息合成，即对多路分解后的太赫兹图像进行重采样，进行太赫兹图像合成，得到合成后的高分辨率太赫兹图像。

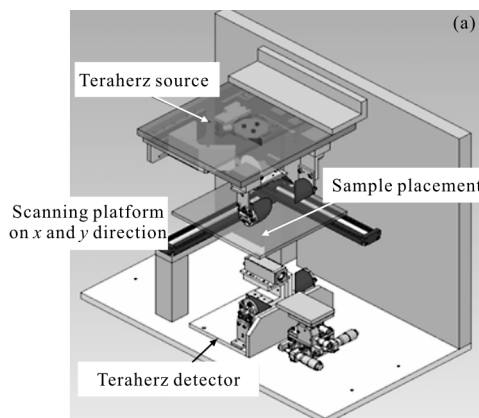
$$I'(u,v) = \frac{1}{4} \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n I_b^{\text{new}}(u+h,v+k) \quad (5)$$

式中： $I'(u,v)$  为得到的合成后的高分辨率太赫兹信息； $u$  和  $v$  分别为重建后的像素单元尺寸； $h$  和  $k$  分别为两个方向的错动量 ( $h=m/2, k=n/2$ )； $b$  为多路成像信息中的第  $b$  路信息。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验及结果

实验采用 Advantest 公司生产的太赫兹脉冲成像系统(实验中源的谱段为 1 THz)，采用移动物坐标为半个像元多次成像的方式模拟多路成像错位成像，实现 4 幅分别在横向、纵向错开半个像元的太赫兹图像，成像装置图如图 2 所示。



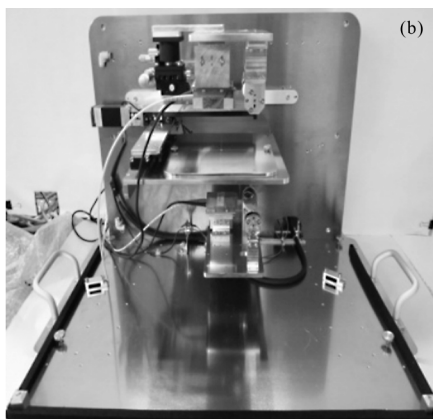


图 2 太赫兹成像装置

Fig.2 Terahertz imaging device

实验中选取 100 元人民币,纸币 100 元字样的材料与周围材料折射率不同,造成目标与周围背景的差异。因此实验中考虑采用过采样的方法,从信息处理的角度提升图像质量。文中实验中采用在两个方向上分别错位半个像元的 4 帧 733×733 灰度图像,通过两种过采样方法和文中方法处理后结果如图 3 所示。



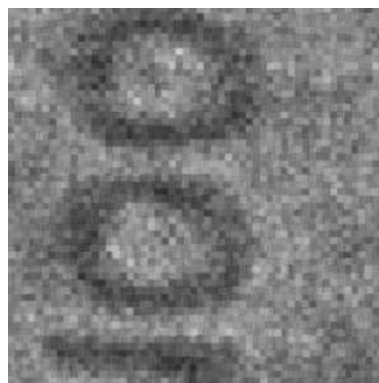
(a) 线性上采样方法

(a) Result of the linear up-sampling method



(b) 4 帧凸集投影法(POC)方法

(b) Result of the POC method of four frame image



(c) 反向透射迭代法方法

(c) Result of the IBP method



(d) 文中提出的方法

(d) Result of the proposed method

图 3 太赫兹图像各种重建方法结果比对

Fig.3 Result comparison of different reconstruction methods on the terahertz images

表 1 图像质量评价

Tab.1 Evaluation index of image quality

| Resampling method    | Linear resampling | POC   | IBP   | Proposed method |
|----------------------|-------------------|-------|-------|-----------------|
| Mean value           | 85.93             | 89.87 | 89.23 | 137.17          |
| Variance             | 37.18             | 34.49 | 30.50 | 28.10           |
| SNR/dB               | 7.27              | 8.31  | 9.32  | 13.76           |
| Contrast ratio       | 20.59             | 24.73 | 21.92 | 21.58           |
| Information          | 6.86              | 7.10  | 6.95  | 6.84            |
| Image power spectrum | 40.03             | 40.21 | 40.15 | 41.29           |

#### 4.2 实验结果分析

由图 3(a)可见,获得的原始数据经过简单的线性放大,整个像面有很多背景噪声并带有明显的“斑块”形噪点,图中的“100”数字受到噪声的影响很大;图 3(b)和图 3(c)是采用过采样方法将 4 幅图

像合成一幅图像,如图 3(b)、(c)与图 3(a)相比数字“100”的边缘更连续,噪声有所减少;图 3(d)是文中所提方法,与其他图相比数字“100”的边缘更加连续,整个像面的噪声明显减少,且无“方块形”噪点。

从表 1 的质量评价结果可见,采用过采样方法均可以提高图像信噪比和图像功率谱<sup>[11]</sup>,增强图像的细节能量。而与常规的 POC 和 IBP 方法相比,采用文中的方法可以提升更多的细节能量。另外,从图像 MTF 的指标来看,采用文中所提方法也高于传统方法。由于 MTF 能够直观的反映成像系统分辨细节的能力,因而采用文中的方法可以提升系统分辨率。

实验结果可见:太赫兹成像效果受到背景起伏噪声影响很大,目标边缘连续性差,目标被湮没在背景噪声下;采用经典数据重建方法能够抑制部分噪声,“斑块”状的噪声变得更细小、均匀,在一定程度上能提升目标边缘的连续性,目标与背景的区别变得更明显;而采用文中方法可以增加图像的有效细节信息,增加目标边缘的连续性,另外,文中提出的方法在抑制斑块噪声,减少背景起伏对目标的影响方面有特别的优势,处理后结果可见目标与背景的区别更明显,进而提高像质。当然,在点扫描的采样方式下,采用多路信息合成方法在提高空间分辨率的同时,会增加多路成像的采样时间。随着太赫兹探测器的发展,后续可考虑采用错半个像元的多路线阵同时成像方式来实现信息合成。

## 5 结 论

文中针对实验中谱段为 1 THz 的太赫兹图像,进行多路信息合成成像系统设计,构建基于过采样体制的数学模型,采用范数优化约束和双边滤波相结合的方法可以进一步提升图像的细节信息,在抑制噪声的同时提升目标边缘的连续性。实验结果显示所提方法比传统过采样方法更能有效提升像质。未来有望将该方法扩展到太赫兹成像数据的在轨实时处理业务化流程中。

## 参考文献:

[1] Na Hongyue. Improvement of terahertz active imaging system

[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016. (in Chinese)

- [2] Shams M I B, Zhenguo Jiang, Syed Rahman, et al. Approaching real-time terahertz imaging using photo-induced reconfigurable aperture arrays [C]//Terahertz Physics, Devices, and Systems VIII: Advanced Applications in Industry and Defense, 2014, 9102: 910207.
- [3] Kannegulla A, Jiang Z, Rahman S M, et al. Coded aperture imaging using photo-induced aperture arrays for mapping terahertz beams [J]. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 2014, 4(3): 321-327.
- [4] Domonkos Gergelyi, Péter Földesy, Ákos Zarándy. Scalable, low-noise architecture for integrated terahertz imagers [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 36(6): 520-536.
- [5] Xu Limin. High resolution terahertz image processing [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [6] Dong Jiameng, Peng Xiaoyu, Ma Xiaohui, et al. Progress of detection technology of ultra-broadband THz time-domain spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(5): 1277-1283. (in Chinese)
- [7] Liu Zhaojun, Zhang Zhi, Zhou Feng, et al. A geometrical mapping method optical imaging for space push-broom system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(1): 39-45. (in Chinese)
- [8] Pan Haibin, Cong Mingyu, Zhang Wei, et al. Imaging model study of space objects from space remote sensor [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(11): 1699-1702. (in Chinese)
- [9] Wang Shitao, Zhang Wei, Jin Lihua, et al. Point target detection based on temporal-spatial over-sampling system [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2013, 32(1): 68-72. (in Chinese)
- [10] Chen Boyang, Chen Fansheng, Chen Guilin, et al. A new method of improving spatial resolution of linear matrix scanner by over sample[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(7): 395-402. (in Chinese)
- [11] Qu Yingge, Zeng Shenggen, Xia Deshen. Appraise the CBERS-1 image quality with image information capacity and power spectrum [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(2): 40-45. (in Chinese)
- [12] Cao Jiahao, Li Chunlai, Jin Jian, et al. Application of super resolution reconstruction algorithm in thermal infrared image [J]. *Infrared*, 2016, 37(5): 27-32. (in Chinese)