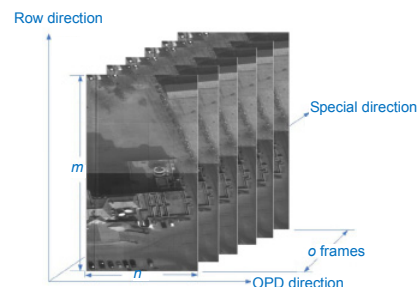




DOI: 10.12086/oe.2019.180443

基于自适应阈值的干涉高光谱图像稀疏重建

温佳^{1,2}, 刘明威^{1,2*}, 崔军^{1,2}, 闫淑霞^{1,2}¹天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387;²天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387

摘要: 干涉高光谱图像是一类特殊的图像源, 其海量数据导致很难在有限带宽信道上传输。传统的方法是对数据进行压缩, 然后进行编码传输。但是压缩后的数据还是很大, 给数据的传输和存储带来很大困难, 而压缩感知技术可以很好地解决该类图像在传输时的问题。本文在压缩感知原有算法的基础上提出了更适用于干涉高光谱图像的基于自适应阈值的正交匹配追踪算法(ATROMP), 该算法首先采用分块处理, 然后挑选出干涉条纹块。由于竖直干涉条纹具有较强的单方向特性, 水平全变分值较大。因此本文根据水平全变分值提取出图像中的干涉条纹, 进行自适应采样。然后采用一个自适应阈值来代替正则正交匹配追踪(ROMP)算法中的二次选取, 采用自适应阈值不仅可以保障每次选取的原子的相关性足够高, 而且每次可以适当地选取多个原子保证足够的循环次数, 避免了后续匹配度更高原子的遗漏。相比于传统 ROMP 算法, 大量实验数据表明本文方法稀疏重建的精度可以得到明显的提高。

关键词: 干涉高光谱图像; 压缩感知; 干涉条纹; 全变分; 自适应阈值

中图分类号: O433.4

文献标志码: A

引用格式: 温佳, 刘明威, 崔军, 等. 基于自适应阈值的干涉高光谱图像稀疏重建[J]. 光电工程, 2019, 46(6): 180443

Sparse reconstruction of interferometric hyperspectral image based on adaptive threshold

Wen Jia^{1,2}, Liu Mingwei^{1,2*}, Cui Jun^{1,2}, Yan Shuxia^{1,2}¹School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;²Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and Systems, Tianjin 300387, China

Abstract: Interferometric hyperspectral image is a special kind of image source, which contains massive data and is difficult to transmit on a limited bandwidth channel. The traditional method is to compress the data and then encode the transmission. However, the compressed data is still very large, which brings great difficulties to the transmission and storage of data. Nevertheless, the compressed sensing technology can solve this problem well. Based on the original algorithm of compressed sensing, this paper proposes an adaptive threshold-based orthogonal matching pursuit algorithm (ATROMP) which is more suitable for interfering hyperspectral images. The algorithm first uses block processing and then selects the interference fringes. Because the vertical interference fringes have strong unidirectional characteristics, the total variation of the level is larger. Therefore, the interference fringes in the images are extracted from the horizontal total variation values for adaptive sampling. Then, an adaptive threshold is used in this paper to replace the quadratic selection in the ROMP algorithm. Using an adaptive threshold can not only ensure

收稿日期: 2018-08-24; 收到修改稿日期: 2018-12-06

基金项目: 天津市自然科学基金项目(17JCNJC01400); 国家自然科学基金资助项目(61401439, 61601323)

作者简介: 温佳(1983-), 男, 博士, 讲师, 主要从事数字图像处理, 稀疏表示的研究。E-mail: dr_jwen@qq.com

通信作者: 刘明威(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事压缩感知, 图像处理的研究。E-mail: mr.liumw@qq.com

that the atomicity of each selected atom is sufficiently high, but also that multiple atoms can be properly selected each time to ensure sufficient number of cycles, to avoid the follow-up higher degree of atom missing. Compared with the traditional ROMP algorithm, a large amount of experimental data show that the sparse reconstruction accuracy of the method can be significantly improved.

Keywords: interference hyperspectral image; compression sensing; interference fringes; total variation; adaptive threshold

Citation: Wen J, Liu M W, Cui J, *et al.* Sparse reconstruction of interferometric hyperspectral image based on adaptive threshold[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(6): 180443

1 引言

干涉高光谱成像技术的应用和发展推动了现代航天遥感领域的快速发展。干涉高光谱图像在获取目标信息时,可以获得更多的空间信息和光谱信息,因而被广泛应用于军事侦察、气象预报和环境检测等多方面^[1-5]。干涉高光谱图像是一类特殊的图像源,其海量数据导致很难在有限带宽信道上传输。传统的压缩方法采用奈奎斯特原理对数据进行采样,然后再压缩传输。这种高冗余采样再压缩的过程造成极大的资源浪费,同时也增加了运算复杂度,因此并不适合低功耗、资源有限的机载或星载应用,而压缩感知技术可以很好地解决该类图像在传输时的问题。因此,针对干涉高光谱高效压缩和传输是该领域的重要研究课题。近年发表的相关文章,都是把压缩感知和高光谱图像结合的重构算法研究,干涉高光谱图像更复杂,数据量更大,处理起来比较棘手。传统意义上的高光谱数据压缩中,成像光谱仪通常以比信号最高频率大两倍的频率采集数据,然后再利用所采集数据的冗余性进行压缩处理。传统压缩方法主要有:基于谱间DPCM(differential pulse code modulation)和整数小波的超光谱图像无损压缩^[6]、针对干涉高光谱图像帧间不稳定移位的改进变换算法^[7]、针对干涉高光谱图像帧间相关的自适应光程差算法^[8]。由于机载或星载成像系统的计算能力、存储空间和功耗等资源的局限性,经典的压缩算法难以在机载或星载成像系统中实现。分布式信源编码技术虽然将编码端的一部分工作转移到了解码端,极大地降低了编码端的复杂度,但抛弃冗余数据导致的资源浪费仍然难以解决^[9]。

压缩感知(Compressive sensing, CS)理论^[10-11]提供了一种全新的信号采集框架,将压缩和采样过程巧妙地结合起来,实现了采样率低于传统奈奎斯特率下的数据采集。压缩感知理论指出,如果信号在某一变换域是K-稀疏的或者说是可压缩的,那么可以设计一个

与相变换基不相关的测量矩阵来对信号进行观测^[12]。其可利用低维测量值,通过求解一个凸的最优化问题来实现原始信号的重构。CS边压缩边采样的特性,相对于传统数据传输省去了先获得大量冗余数据再压缩的麻烦,降低了采样成本,减少采样时间。压缩感知理论为许多应用科学带来了新的启发,更对高维数据的分析指出了一条新的途径。近年来,不少学者将压缩感知理论应用在压缩成像、目标检测、高光谱图像分类、解混合等问题中,均取得显著成果^[12]。

干涉高光谱图像特殊的成像原理,使得图像存在帧间水平位移的干涉条纹。图像数据十分庞大,现有星载存储器容量有限,卫星信道带宽受限,无法适应干涉高光谱遥感图像的海量数据。本文将压缩感知理论引入干涉高光谱图像的传输处理中,能够有效提升干涉高光谱图像的处理效率,解决干涉高光谱图像巨大信息量的采集、存储、传输和处理等问题,将会给干涉高光谱图像压缩编码带来巨大的影响^[13]。由于干涉高光谱图像特性在重构阶段,传统的正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP),正则正交匹配追踪(regularized orthogonal matching pursuit, ROMP)等算法无法对图像的干涉条纹部分做到精确重构,本文根据干涉高光谱图像特点提出了基于自适应阈值的正交匹配追踪算法(adaptive threshold-based orthogonal matching pursuit algorithm, ATROMP)。该算法可以精确重构出干涉高光谱图像的细节部分,相比于传统重构算法,重构图像在信噪比和结构相似度上都有明显提高。

2 干涉高光谱图像光谱特性简介

图1显示了干涉成像光谱仪等效光路示意图, d 表示光束被分割之后的剪切量, f_{FTL} 表示傅里叶透镜的焦距, O 表示在探测器上的零光程差点,探测器上 P 点的光程差表示为

$$x = d \sin \theta = y \frac{d}{f_{FTL}} \quad (1)$$

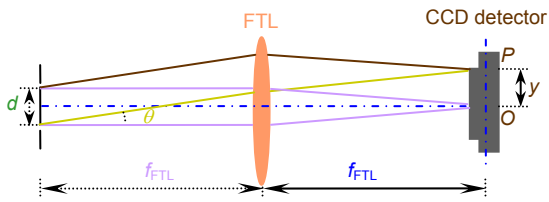


图 1 等效光路图

Fig. 1 Schematic diagram of LASIS

根据光谱学的傅里叶变换基本原理，频率范围

$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ 时，干涉光强 I 为

$$\begin{aligned} I(x) &= \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} B(f) \cos(2\pi f x) df \\ &= \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} B(f) \cos(2\pi f y \frac{d}{f_{FTL}}) df \end{aligned} \quad (2)$$

光源的光谱分布可由干涉光强 I 的傅里叶变换求得，即

$$\begin{aligned} B(f) &= \int_0^{\delta_m} I(x) \cos(2\pi f x) dx \\ &= \int_0^{\delta_m} I(x) \cos(2\pi f y \frac{d}{f_{FTL}}) dx \end{aligned} \quad (3)$$

其中： $B(f)$ 为入射光谱强度， δ_m 表示最大光程差。在实际应用中 CCD 上所得的光程差和光谱强度并不是连续的，而是离散的，无法按式(3)进行连续傅里叶变换，只可进行离散余弦变换^[7]。

干涉高光谱图像数据具有与其他图像不同的特性。图 2 为 LASIS 干涉高光谱图像三维示意图。由于其特殊的推扫式成像原理，干涉高光谱图像具有明显的竖直干涉条纹存在。

干涉高光谱图像区别普通图像的特点如下：

1) 干涉高光谱图像并非光的直接成像所得，而是

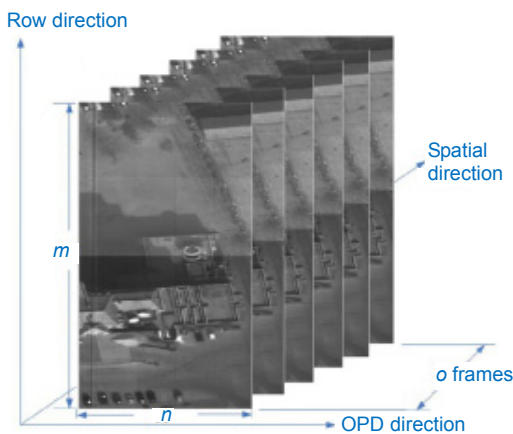


图 2 LASIS 干涉高光谱图像序列

Fig. 2 LASIS interference hyperspectral image sequences

光的干涉图像。图像有明显的竖直干涉条纹存在，这些竖直的干涉条纹随着光线调制度改变，在图像的不同位置中表现为不同的强度。

2) 干涉高光谱图像是三维数据，在图像帧间存在着平移现象，图像中的目标是一个整体的推扫平移过程^[8]。

3 正则正交匹配追踪算法(ROMP)

正则正交匹配追踪算法(ROMP)是 Needell 和 Vershynin 提出的一种新型匹配追踪算法^[14-18]。该方法首先假设稀疏度 K 已知，其次根据测量矩阵和当前残差向量的内积，选取前 K 个相关系数较大的原子，并放入候选集 J 中。

$$J = \max_{j=1,2,\dots,N} \{|\langle r_{t-1}, a_j \rangle|, K\}, \quad t=1,2,3,\dots,N, \quad (4)$$

式(4)表示集合 J 中存储 K 个匹配度最高的原子的索引，其中 r_{t-1} 表示第 t 次迭代的残差， a_j 表示矩阵 A 的第 j 列， N 为矩阵 A 的行数。然后在 J 中通过一个正则化过程(式(5))进行二次选取，保证入选的原子所携带的信息都接近一个均值且能量最大，随后放入支撑集中来重构原信号，而携带较少信息量的原子则被舍弃^[19]。

$$|\lambda_i| \leq 2|\lambda_j| \quad \text{for all } i, j \in J_0, \quad i, j=1,2,3,\dots,N, \quad (5)$$

其中： J_0 为集合 J 中满足式(5)的原子构成的子集。

ROMP 算法具体步骤如下：

输入：测量矩阵 A ，观测矩阵 y ，稀疏度 K ；

输出：信号稀疏逼近 $\hat{\theta}$ ；

1) 初始化： $r_0 = y$ ， $A_0 = \emptyset$ ， $t=1$ ；

2) 找出与残差匹配度最高的 K 个原子并放入 J 中， $J = \max_{j=1,2,\dots,N} \{|\langle r_{t-1}, a_j \rangle|, K\}$ ；

3) 按正则化 $|\lambda_i| \leq 2|\lambda_j|$ for all $i, j \in J_0$ 找出 J 中平均能量最高的子集 J_0 ；

4) 更新索引集 $A_t = A_{t-1} \cup \{J_0\}$ ， $A_t = A_{t-1} \cup a_j$ ；

5) 求最小二乘解，得到重构向量：

$$\hat{\theta}_t = \arg \min_{\theta_t} \|y - A_t \theta_t\|$$

6) 更新残差 $r_t = y - A_t \hat{\theta}_t$ ；

7) 判断是否满足 $t > K$ 或选出的原子集合 $\|A_t\|_0 \geq 2K$ ，若为真则停止迭代，否则 $t=t+1$ 并返回步骤 2)；

其中： r_t 表示残差， t 表示迭代次数， J 表示每次迭代找到的列序号， A_t 表示按索引 A_t 选出的矩阵 A 的列集合^[15]。

当使用 ROMP 算法重构干涉高光谱时,由于干涉高光谱特性在进行二次选取时的计算量较大,并且在筛选原子时,会选到相关性较差的原子,从而导致重构效果不理想。本文针对传统 ROMP 算法的不足,在式(5)的基础进行改进,提出了一种基于自适应阈值进行最优原子筛选的 ATROMP 算法。

4 基于自适应阈值的压缩感知算法

干涉高光谱数据每帧存在大幅值且位置固定的垂直干涉条纹,而背景图像在帧与帧间存在着移位,因此传统的压缩感知重构算法难以得到理想的稀疏重建效果。ROMP 算法重构干涉高光谱图像时,需要计算测量矩阵与残差内积的绝对值并存入集合 J 中。由于干涉高光谱图像为 12 位图像,数量级高且存在位置固定幅值波动较大的干涉条纹,使得集合 J 中存在幅值偏离均值较大的量且集合中数据方差较大。在 ROMP 算法中正则化标准要求选取的原子所携带的信息都接近一个均值且能量最大原子,这会导致每次迭代按正则化标准(式(5))进行二次选取时可能会漏选集合 J 中这部分能量高的原子,而选取更多能量较低的原子(能量高的原子求解出的重构向量相关性更高,重构效果也更好)。选取的原子放入索引集 Λ_t 中,导致索引集中的元素个数迅速增多。但是索引集要满足 $\|\Lambda_t\|_0 < 2K$,导致重构过程中算法循环次数减少,使得集合 J 中匹配度更高的原子没有选到,支撑集中匹配度高的原子个数比例较低。严重影响干涉高光谱的重构质量,尤其是干涉条纹部分。针对 ROMP 算法重构干涉高光谱图像在二次选取时相关性低的原子被选入支撑集的问题,本文提出了基于自适应阈值的正交匹配追踪算法(ATROMP)。

4.1 自适应阈值的选取

在 ATROMP 中采用一个自适应阈值来代替 ROMP 算法中正则化的二次选取,自适应阈值:

$$G_t = T \times \max_{j=1,2,\dots,N} \{|\lambda_j = \langle r_{t-1}, a_j \rangle|\}, t=1,2,3,\dots,N \quad (6)$$

式中: T 表示自适应阈值系数, t 表示迭代次数, G_t 表示在 t 次迭代时根据自适应阈值系数确定的自适应阈值。然后根据自适应阈值筛选出大于自适应阈值的原子放入原子集 J_0 中

$$J_0 = \{|\lambda_j = \langle r_{t-1}, a_j \rangle| \geq G_t, j=1,2,\dots,N\} \quad (7)$$

式中: $t=1,2,3,\dots, N$ 。仿真过程中的残差可以反映重构数据和采样数据之间的差异,帮助选出最优自适应阈值系数。残差的计算式如下:

$$r_t = y - A_t \hat{\theta}_t \quad (8)$$

其中: y 是观测矩阵, $\hat{\theta}_t$ 为重构向量, A_t 表示按索引 J 选出的矩阵 A 的列集合。重构向量的确定和自适应阈值系数有关,而残差取决于重构向量,因此可以用残差来衡量自适应阈值系数。对于自适应阈值系数的选取采用以下算法,其基本步骤如下:

- 1) 初始化。生成初始阈值系数 $T_{opt}(T_{opt}=0)$, 计算目标函数残差 r_{t1} ;
- 2) $T_{tmp1} = T_{opt} + s_{step} (s_{step} = 0.2)$,
 $T_{tmp2} = T_{opt} + \alpha \cdot s_{step} (\alpha \in [-1, 1])$;
- 3) 如果 $T_{tmp1} \notin (0,1)$, 则舍弃并返回步骤 2); 如果满足 $T_{tmp1} \in (0,1)$, 则计算目标函数值 r_{t2} ;
- 4) 如果 $T_{tmp2} \notin (0,1)$, 则舍弃并返回步骤 2); 如果满足 $T_{tmp2} \in (0,1)$, 则计算目标函数值 r_{t3} ;
- 5) 如果 $r_{t2} < r_{t1}$, 则 $T_{opt} = T_{tmp1}$, $r_{t1} = r_{t2}$;
- 6) 如果 $r_{t3} < r_{t1}$, 则 $T_{opt} = T_{tmp2}$, $r_{t1} = r_{t3}$; 否则返回步骤 2);
- 7) 判断是否满足停止迭代(迭代多次以后没有出现新的最优解), 如果满足停止迭代条件则输出当前解作为最优解, 否则返回步骤 2);

T_{opt} 、 T_{tmp1} 和 T_{tmp2} 为阈值系数, s_{step} 为步长, α 为随机取值的步长系数, r_{t1} 、 r_{t2} 和 r_{t3} 对应阈值系数求得的残差。

本文提出的最优阈值系数算法流程图如图 3。

4.2 基于自适应阈值的正交匹配追踪算法(ATROMP)

针对 ROMP 算法在重构干涉高光谱图像时存在的问题, 本文提出了基于自适应阈值的正交匹配追踪算法(ATROMP), 该算法采用自适应阈值来快速选取最优, 采用一个自适应阈值来进行二次选取, 相比于 ROMP 算法该方法简化了正则化过程大量计算, 而且本文算法每次可以适当地选取多组, 不仅避免了相关性低的原子选取, 而且加快了算法收敛, 提高了重构精度。本文提出算法具体步骤如下:

输入: 测量矩阵 A , 观测向量 y , 稀疏度 K ;

输出: 信号稀疏逼近 $\hat{\theta}$;

- 1) 初始化: $r_0 = y$, $A_0 = \emptyset$, $t=1$;
- 2) 求 $J = \max_{j=1,2,\dots,N} \{|\langle r_{t-1}, a_j \rangle|\}, K$ 求测量矩阵的每一列与残差内积的绝对值并把最大的 K 个放入 J ;
- 3) 选取自适应阈值, 并从 J 中筛选出大于阈值的因子放入 J_0 :

$$J_0 = \{|\lambda_j = \langle r_{t-1}, a_j \rangle| \geq G_t, j=1,2,\dots,N\};$$

- 4) 更新索引集合 $\Lambda_t = \Lambda_{t-1} \cup \{J_0\}$, $A_t = A_{t-1} \cup a_j$;

5) 求解最小二乘解, 得到重构向量:

$$\hat{\theta}_t = \arg \min_{\theta_t} \|y - A_t \theta_t\|;$$

6) 更新残差 $r_t = y - A_t \hat{\theta}_t$;

7) 判断选出的原子集合 $\|A_t\|_0 \geq 2K$ 或 $r_t = 0$, 若为真则停止迭代并输出最后一次所求 $\hat{\theta}_t$, 否则 $t = t + 1$ 并返回步骤 2)。

本文提出算法流程图如图 4 所示。

5 仿真实验与结果分析

实验采用三组 12 位 Lasis 干涉高光谱图像数据,

大小均为 256×256 , 仿真试验中分块均采用 16×16 。在仿真试验中对于采用 ROMP 算法的干涉高光谱图像采样率分别为 0.35 和 0.5, 使用基于自适应阈值的正交匹配追踪算法(ATROMP)算法的干涉高光谱采用自适应采样。对于选出的干涉条纹部分适当多采样, 其他部分少采样, 以达到平均采样率也为 0.35 和 0.5, 具体情况如表 1。仿真时对 Lasis01、Lasis02、Lasis03 三幅干涉高光谱图像分别进行了本文重构算法, 并和 ROMP 算法来进行对比。图 5 是两幅原始图, 图 6、图 7 分别为两幅图 CS 重构结果。

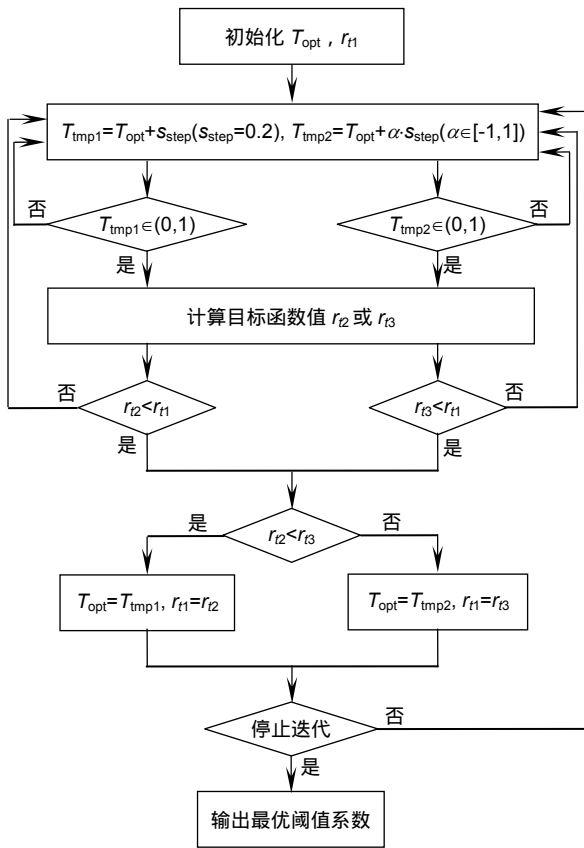


图 3 本文提出的最优阈值系数算法流程图
Fig. 3 The flow chart of the optimal threshold coefficient algorithm proposed in this paper

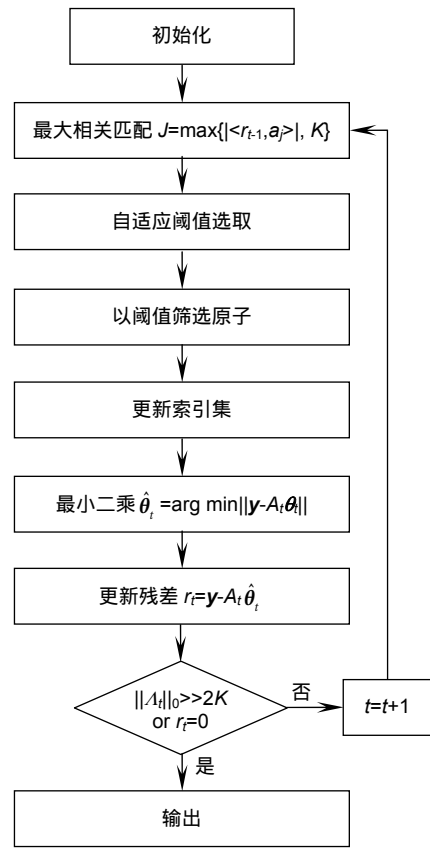


图 4 ATROMP 算法流程图
Fig. 4 The flow chart of the ATROMP algorithm

表 1 均匀采样时具体采样数据

Table 1 Specific sampling data for uniform sampling

平均采样率	0.3	0.35	0.4	0.5
干涉条纹块	150/256	160/256	170/256	200/256
非干涉条纹块	72/256	85/256	98/256	123/256

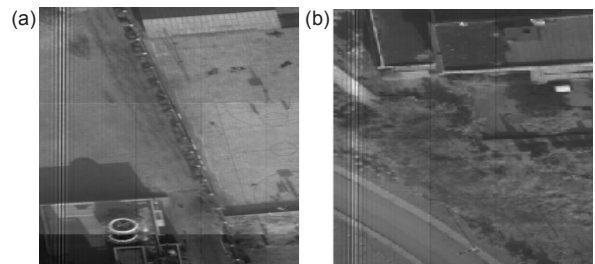


图 5 原始图像。(a) Lasis01; (b) Lasis02
Fig. 5 Original image. (a) Lasis01; (b) Lasis02

从图 6、图 7 的视觉效果上可以看出，本文提出的 ATROMP 算法相对于 ROMP 算法有较大提升。本文算法的重构图像更接近原图像，在图像细节部分也能更好地还原。表 2 为三幅图在采样率分别为 0.35 和 0.5 时采用本文算法和 ROMP 算法信噪比(SNR)和结构相似度(SSIM)的具体数据。采样率为 0.35 时三幅图像的自适应阈值系数分别为 0.65, 0.68 和 0.67, 采样率为 0.5 时三幅图像的自适应阈值系数分别为 0.58、0.65

和 0.67。

从数据上可以很直观地看出，在采样率为 0.35 的情况下 ATROMP 算法对于干涉高光谱的重建效果比传统的 ROMP 算法效果好很多。即使在 ROMP 算法采样率达到 0.5 的情况下，ATROMP 算法还是有巨大的优势，并且 ATROMP 算法对于干涉高光谱图像中的干涉条纹也有很好的重构效果，而传统的 ROMP 算法就无法做到。

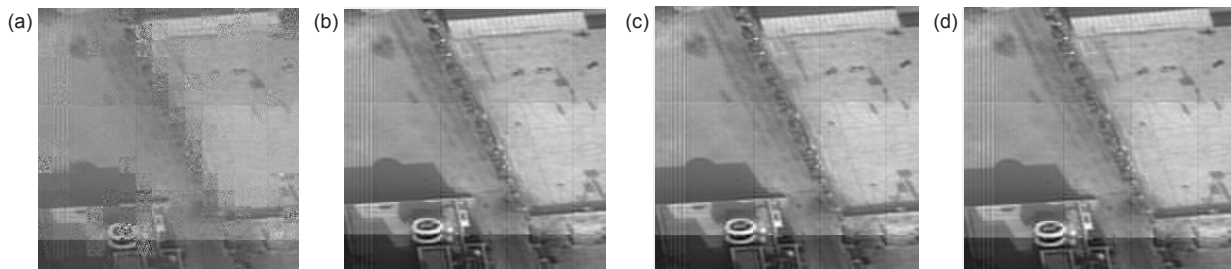


图 6 Lasis01 的 CS 重构图像。(a) 采样率 0.35 ROMP 算法; (b) 采样率 0.5 ROMP 算法; (c) 采样率 0.35 ATROMP 算法; (d) 采样率 0.5 ATROMP 算法

Fig. 6 CS reconstruction image of Lasis01. (a) Sampling rate 0.35 in ROMP algorithm; (b) Sampling rate 0.5 in ROMP algorithm; (c) Sampling rate 0.35 in ATROMP algorithm; (d) Sampling rate 0.5 in ATROMP algorithm

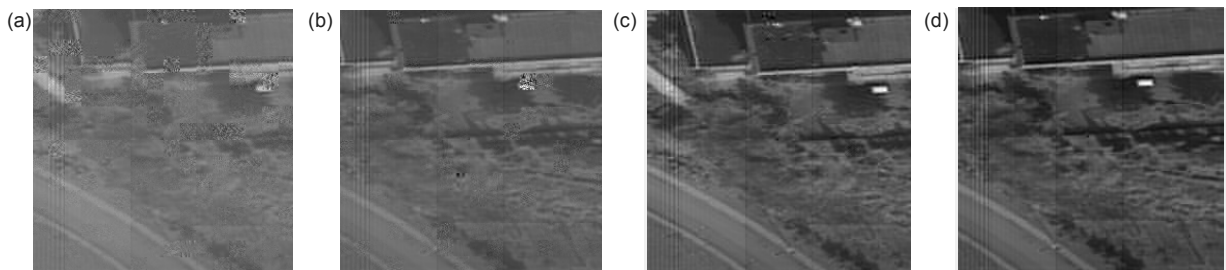


图 7 Lasis02 的 CS 重构图像。(a) 采样率 0.35 ROMP 算法; (b) 采样率 0.5 ROMP 算法; (c) 采样率 0.35 ATROMP 算法; (d) 采样率 0.5 ATROMP 算法

Fig. 7 CS reconstruction image of Lasis02. (a) Sampling rate 0.35 in ROMP algorithm; (b) Sampling rate 0.5 in ROMP algorithm; (c) Sampling rate 0.35 in ATROMP algorithm; (d) Sampling rate 0.5 in ATROMP algorithm

表 2 采样率 0.35 和 0.5 时三幅图像不同算法下信噪比和结构相似度(SSIM)对比表

Table 2 Comparison of SNR and reconstruction time of three images under different algorithms at sampling rate 0.35 and 0.5

	采样率 0.35				采样率 0.5			
	ROMP 算法		ATROMP 算法		ROMP 算法		ATROMP 算法	
	信噪比/dB	SSIM	信噪比/dB	SSIM	信噪比/dB	SSIM	信噪比/dB	SSIM
Lasis01	26.4556	0.8293	31.0979	0.9232	29.5770	0.9048	32.9129	0.9476
Lasis02	26.7208	0.8321	31.4439	0.9291	29.7985	0.8918	31.7564	0.9354
Lasis03	26.9426	0.8603	31.2438	0.9265	29.8668	0.9077	31.5194	0.9318

6 结束语

针对 ROMP 算法重构干涉高光谱图像在二次选取时相关性低的原子被选入支撑集的问题, 本文提出了一种基于自适应阈值的正交匹配追踪算法 (ATROMP)。采用自适应阈值不仅可以保障每次选取的原子相关性足够高, 而且不会漏选能量最高的原子。在选取原子时每次可以适当地选取多个原子保证足够的循环次数, 避免了后续匹配度更高原子的遗漏。这样不仅提高了算法精度, 也保证了每次循环的运算速度。该算法通过对干涉高光谱图像分块后求每块图像的水平全变分进行分类, 筛选出干涉条纹块。这样能简化计算复杂度, 改善图像的稀疏性, 在重构数据时采用基于自适应阈值的正交匹配追踪算法, 来适应干涉高光谱图像的特殊成像, 提高了正则化后索引的收敛速度, 能更快地找出匹配原子。与 ROMP 算法比较, 该算法的重构精度更高, 信噪比有很大提高。

参考文献

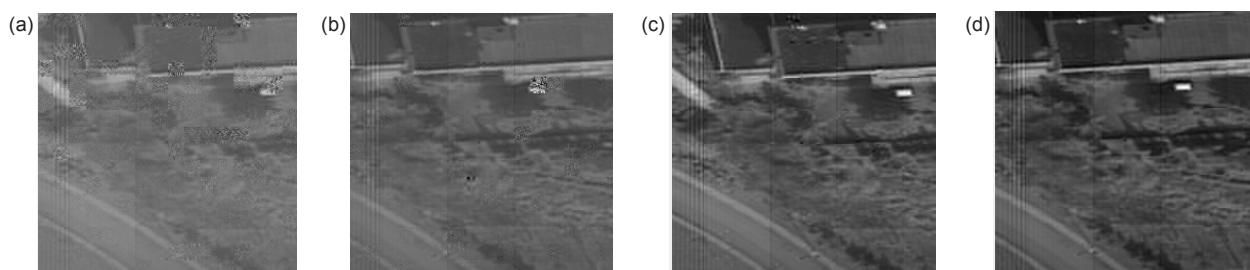
- [1] Tong Q X, Zhang B, Zhang L F. Current progress of hyperspectral remote sensing in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, **20**(5): 689–707.
童庆禧, 张兵, 张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. *遥感学报*, 2016, **20**(5): 689–707.
- [2] Tang Y, Wan J W, Nian Y J. Distributed near lossless compression of hyperspectral images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(3): 0310001.
汤毅, 万建伟, 粘永健. 高光谱图像的分布式近无损压缩[J]. *光学学报*, 2015, **35**(3): 0310001.
- [3] Wang Z L, Feng Y, Xiao H, et al. Distributed compressive sensing imaging and reconstruction of hyperspectral imagery[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(4): 1131–1137.
王忠良, 冯燕, 肖华, 等. 高光谱图像的分布式压缩感知成像与重构[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(4): 1131–1137.
- [4] Du S S, Wang Y M, Wang Y J. The research of the space applied interference imaging spectrometer[J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(3): 77–82.
杜述松, 王咏梅, 王英鉴. 空间应用干涉成像光谱仪的研究[J]. *光学仪器*, 2008, **30**(3): 77–82.
- [5] Wen J, Zhao J S, Wang C L, et al. Decomposition of interference hyperspectral images using improved morphological component analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(1): 254–258.
温佳, 赵军锁, 王彩玲, 等. 基于改进 MCA 的干涉高光谱图像分解[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(1): 254–258.
- [6] Wu D M, Wang J, Zhang H N. Research of hyper-spectral image lossless compressing technology based on DPCM between spectra and IWT[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 156–159.
吴冬梅, 王军, 张海宁. 基于谱间 DPCM 和整数小波变换的超光谱图像无损压缩[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 156–159.
- [7] Wen J, Ma C W, Shui P L. A 3D non-linear orientation prediction wavelet transform for interference hyperspectral images compression[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(7): 1770–1777.
- [8] Wen J, Ma C W, Shui P L. An adaptive OPD and dislocation prediction used characteristic of interference pattern for interference hyperspectral image compression[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(20): 4903–4909.
- [9] Li Y, Chen L W, Kong F, et al. Functional micro-concrete 3D hybrid structures fabricated by two-photon polymerization[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(4): 393–399.
- [10] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, **52**(4): 1289–1306.
- [11] Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, **52**(2): 489–509.
- [12] Yan G, Xu T F, Ma X, et al. Hyperspectral image compression sensing based on dynamic measurement[J]. *Chinese Optics*, 2018, **11**(4): 550–559.
闫歌, 许廷发, 马旭, 等. 动态测量的高光谱图像压缩感知[J]. *中国光学*, 2018, **11**(4): 550–559.
- [13] Mun S, Fowler J E. Block compressed sensing of images using directional transforms[C]//*Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Image Processing*, Cairo, Egypt, 2009: 3021–3024.
- [14] Wang R F, Jiao L C, Liu F, et al. Block-based adaptive compressed sensing of image using texture information[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, **41**(8): 1506–1514.
王荣芳, 焦李成, 刘芳, 等. 利用纹理信息的图像分块自适应压缩感知[J]. *电子学报*, 2013, **41**(8): 1506–1514.
- [15] Ma C H. Study on the compressed sensing reconstruction algorithms[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2012.
马春晖. 压缩感知重构算法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- [16] Jia Y B, Feng Y, Wang Z L, et al. Hyperspectral compressive sensing recovery via spectrum structure similarity[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, **36**(6): 1406–1412.
贾应彪, 冯燕, 王忠良, 等. 基于谱间结构相似先验的高光谱压缩感知重构[J]. *电子与信息学报*, 2014, **36**(6): 1406–1412.
- [17] Kittle D, Choi K, Wagadarikar A, et al. Multiframe image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(36): 6824–6833.
- [18] Wu H L, Wang S. Adaptive sparsity matching pursuit algorithm for sparse reconstruction[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, **19**(8): 471–474.
- [19] Zhang L, Zhang S C, Bin X L, et al. The analysis of the interference hyperspectral image features and compression[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7658**: 765839.

Sparse reconstruction of interferometric hyperspectral image based on adaptive threshold

Wen Jia^{1,2}, Liu Mingwei^{1,2*}, Cui Jun^{1,2}, Yan Shuxia^{1,2}

¹School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

²Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and Systems, Tianjin 300387, China



CS reconstruction image of Lasis02. (a) Sampling rate 0.35 in ROMP algorithm; (b) Sampling rate 0.5 in ROMP algorithm; (c) Sampling rate 0.35 in ATROMP algorithm; (d) Sampling rate 0.5 in ATROMP algorithm

Overview: The interference hyperspectral image data is a three-dimensional image data generated by satellite scanning by a Large Aperture Static Imaging Spectrometer (LASIS) based on the principle of push-scan Fourier transform imaging. The resolution is extremely high, and its massive amount Data poses a certain degree of difficulty for data storage and transmission over limited bandwidth channels. Therefore, it is imperative to design an efficient transmission method suitable for interfering hyperspectral data for its data characteristics. Compressed sensing, as a new theoretical framework, provides new research ideas for signal description and processing. Unlike the existing sampling theorem, the theory samples the signal using a rate much smaller than the Nyquist sampling law, and then reconstructs the original signal with high probability from these small observations. This efficient sampling method greatly reduces the sampling rate, so it has great application prospects in many research fields. Based on the traditional compressed sensing reconstruction algorithm, this paper proposes a reconstruction method for interference hyperspectral image. The interference hyperspectral image is a three-dimensional image with multi-dimensional correlation, and its interference fringes contain abundant spectral information. However, when using traditional ROMP algorithm to reconstruct the image, the absolute value of the inner product of the measurement matrix and the residual needs to be calculated. As the interference hyperspectral image has interference fringes with large fluctuations in the fixed amplitude, the variance of the calculation result of the inner product is large, which will result in too many atoms to be selected in the secondary selection according to the regularization standard in each iteration. The atomic number with higher matching degree in the subsequent phase is not selected, resulting in support. The proportion of atoms with high degree of central matching is low. This will seriously affect the reconstruction quality of interference hyperspectral, especially the interference fringe. To solve the above problems, in this paper we propose an adaptive threshold regularized orthogonal matching pursuit algorithm (ATROMP). The algorithm first uses block processing and then selects the interference fringes. Because the vertical interference fringes have strong unidirectional characteristics, the interference fringes in the images are extracted from the horizontal total variation values for adaptive sampling. Then an adaptive threshold is used in this paper to replace the quadratic selection in the ROMP algorithm. Using an adaptive threshold can not only ensure that the atomicity of each selected atom is sufficiently high, but also that multiple atoms can be properly selected each time to ensure sufficient number of cycles, to avoid the follow-up higher degree of atom missing. Compared with the traditional ROMP algorithm, a large amount of experimental datas show that the sparse reconstruction accuracy of the method can be significantly improved.

Citation: Wen J, Liu M W, Cui J, *et al.* Sparse reconstruction of interferometric hyperspectral image based on adaptive threshold[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(6): 180443

Supported by Natural Science Foundation of Tianjin (17JCQNJC01400) and National Natural Science Foundation of China (61401439, 61601323)

* E-mail: mr.liumw@qq.com