

文章编号: 1001 - 9014 (2009) 05 - 0367 - 04

一种改进的非线性频谱外推算法及其在无源毫米波图像增强中的应用

邓玥琳, 王建国, 李良超

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 610054)

摘要: 由于天线的低通滤波效应和噪声的影响, 导致无源毫米波图像严重模糊. 针对该问题, 提出了一种改进的非线性频谱外推算法, 用于无源毫米波图像增强. 该算法改变了原算法中非线性滤波的方式, 并结合总变分最小化方法对图像进行降噪处理. 实验结果证明, 较之于原算法, 新算法更有效地改善了无源毫米波图像的质量, 抑制了图像中的噪声.

关键词: 无源毫米波成像; 图像增强; 非线性频谱外推; 总变分最小化

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A

IMPROVED ALGORITHM OF NONLINEAR EXTRAPOLATION IN FREQUENCY SPACE AND ITS APPLICATION IN PASSIVE MILLIMETER-WAVE IMAGE ENHANCEMENT

DENG Yue-Lin, WANG Jian-Guo, LI Liang-Chao

(College of Electronic and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Passive millimeter-wave images are heavily blurred due to the low-pass filter effect of antenna and the influence of noise. Aiming at the problem, an improved method of nonlinear extrapolation in frequency space was proposed and applied to passive millimeter-wave image enhancement. This algorithm changes the form of nonlinear filter, and denoises the image by combining with the method of total variation minimization. Experimental results show that the new method can improve the quality of passive millimeter-wave image and reduce the noise more effectively compared with the original algorithm.

Key words: passive millimeter-wave imaging; image enhancement; nonlinear extrapolation in frequency space; total variation minimization

引言

无源毫米波成像系统是利用毫米波辐射计探测物体本身的电磁热辐射来实现成像的, 具有全天候的工作能力^[1], 在军事、安检、反恐和环境监控等领域具有广泛的应用前景^[2]. 由于其空间分辨率受限于天线尺寸和系统工作频率, 获得的图像分辨率比较低, 且高频成分退化严重. 因此, 为了满足应用的需求, 引入了图像增强方法, 用于改善无源毫米波辐射计图像质量.

1 无源毫米波成像机理及主要问题分析

根据黑体辐射理论, 处于绝对零度以上的所有物质都会辐射不同强度的电磁波. 无源毫米波成像系统就是利用辐射计探测物体辐射的毫米波能量, 根据不同部位的辐射强度差异来实现成像^[3]. 成像系统天线接收目标辐射的亮温, 经放大、滤波、检波、采样等处理后, 把接收到的信号转换成数字图像信号^[1]. 其成像模型的卷积公式为: $g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y)$ ^[1]. 其中 $f(x, y)$ 是目标场景图像; $h(x, y)$ 为接收系统传输函数, 即系统的点扩展函数 PSF (Point Spread Function), 在空间频谱相当于一个低通滤波器; $n(x, y)$ 为加性噪声. 受成像系统硬件条件限制, 一般需要采用各种图像处理技术

提高成像质量.目前,在对无源毫米波图像进行处理时面临以下几个需要解决的问题:(1)天线的孔径限制造成图像高频成分退化严重,需恢复出目标在通带以外的高频信息;(2)带有高噪声的微波辐射弱信号是制约辐射图像重构的第二大难点^[1];(3)在焦平面阵列体制多波束凝视的工作方式中,点扩展函数具有空间变化特性,很难建立规范的数学模型,所能利用的PSF信息有限,且大多数图像复原的算法需经过大量迭代运算才能获得满意的效果,耗时长,成像的实时性很难满足^[4].

由此可见,若能更有效地利用无源毫米波图像所提供的信息,拓展出图像中被抑制的高频分量,降低噪声的影响,就能对提高成像质量起到至关重要的作用.非线性频谱外推算法可作为解决该问题的途径之一.文献[5]将非线性频谱外推方法引入到无源毫米波图像增强中,基于此,本文对原算法的理论进行分析并结合无源毫米波图像的特点做出相应改进,以得到更好的增强效果.

2 传统非线性频谱外推算法的基本原理

非线性频谱外推算法是Gerenspan等人在2000年提出的^[6].该算法的基本思想为:一幅图像可以表示成一幅低频图像加上相应的高频图像,如果把待增强图像 I_0 看作低频图像,若能够构造出对应的更高频图像 H_0 ,迭加 I_0 和 H_0 将得到比 I_0 更清晰的图像 I .对 I_0 中的高频分量 H_0 进行非线性滤波,可以外推出与 H_0 相位一致的更高频图像 H ,从而实现图像高频分量增强^[6].其非线性滤波是通过将 H_0 削波而获得的,如式(1)、(2)和(3)所示:

$$H = \text{BP}(s \times (\text{BOUND}(H_0))) \quad (1)$$

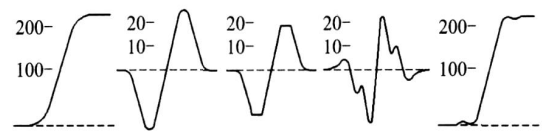
$$\text{BOUND}(x) = \begin{cases} T & x > T \\ x & -T \leq x \leq T \\ -T & x < -T \end{cases} \quad (2)$$

$$T = (1 - c) \times H_{0\max} \quad (3)$$

式中,BP表示高通滤波, s 表示放大系数, T 表示剪切门限, c 为剪切参数, $c \in (0, 1)$, $H_{0\max}$ 表示 H_0 的最大值.非线性滤波通过 $\text{BOUND}(H_0)$ 完成. c 、 s 的不同取值在增强后的边缘中会产生不同程度的影响, c 决定了新增高频分量的位置(相位), s 为高频分量放大倍数.一维边缘的频域非线性外推原理如图1所示.

3 改进非线性频谱外推算法

3.1 传统非线性频谱外推算法存在问题分析



待增强边缘 I_0 , 高频分量 H_0 , 剪切结果, 外推高频分量 H , 增强结果 I

图1 一维边缘非线性外推增强原理图

Fig 1 The principle of 1-D enhancement by nonlinear extrapolation

一幅图像中的高频分量的幅度总是参差不齐,在进行整幅图像增强时使用“一刀切”的全局阈值很不合理.为此可利用高频图像 H_0 的局部信息取代其整体信息,对 H_0 进行包络检波,用得到的包络代替 $H_{0\max}$ 作为剪切阈值的基准,在整幅图像增强时能兼顾各种幅度的高频分量,使图像在整体上均匀增强.但是在无源毫米波图像增强的过程中仍面临以下两个突出问题:

(1) 原算法中“削波”这一截断的操作不可避免地会带来幅度值的突变现象,并且参数 c 、 s 的选取不当会使图像边缘产生振铃与过冲效应,增强的“度”难以把握;

(2) 无源毫米波图像中的细节和噪声难以区分.在频谱外推的过程中,将图像中的噪声不可避免地也会放大.既要增强图像中含边缘信息的高频成分,又要去除图像中同样是高频的噪声,这是原算法不能解决的矛盾.

3.2 对非线性频谱外推算法的改进

针对上述两个问题,本文对传统非线性频谱外推算法做出以下改进.

(1) 改变非线性滤波的形式

改变原算法中非线性滤波的形式,将原算法中对高频分量进行“削波”这一截断的操作改为“校正”,将幅度值“突变”改为“缓变”,用一个函数来调整图像中的高频分量 H_0 .在具体实现的过程中可以用幂函数、反正切函数、双曲正切函数等缓变的S形函数取代原算法中的截断操作.在经过仿真比较之后,本文所提出的公式采取幂函数的方式来校正高频分量 H_0 ,如式(4)所示.该方法将 H_0 的包络这一局部信息加到幂函数的参数 T 上引入到校正过程中,兼顾各种幅度的高频分量,避免增强过程中出现的“马太效应”; T 的作用类似于传统算法中门限 T .

$$\text{BOUND}(H_0(i, j)) = \text{sgn}(H_0(i, j)) T(i, j) \left| \frac{H_0(i, j)}{T(i, j)} \right|^k \quad (4)$$

$k \in (0, 1)$

式(4)中的 k 即对高频分量的校正参数, k 越大对 H_0 的校正程度也就越小. $T(i, j)$ 通过 H_0 的包络 H_0 乘以比例系数获得, 包络 H_0 中的每一点 $H_0(i, j)$ 对应着 $H_0(i, j)$ 在局部的最大值; 获取包络 H_0 的方法为将 H_0 取绝对值后, 经过一个低通滤波. 如式(5)、式(6)所示:

$$H_0 = LP(|H_0|) \quad (5)$$

$$T(i, j) = (1 - c) H_0(i, j), \quad c \in (0, 1) \quad (6)$$

所提取的包络跟随局部波动的灵敏度取决于所使用的低通滤波器的通带范围, 通带较宽时, 包络对局部幅度波动反应灵敏. 当然, 在算法实现的过程中会面临一个细节上的问题, 即当 $T(i, j)$ 为 0 的时候, 直接令 $BOUND(H_0(i, j))$ 为 0 既可.

该滤波形式与传统非线性滤波形式的对比如图 2 所示. 构造出对应的更高频图像 H 的公式也相应地改为:

$$H = BP(s \times (BOUND(H_0))) \quad (7)$$

同传统非线性频谱外推算法一样, 迭加 I_0 和 H_0 将得到比 I_0 更清晰的图像 I

(2) 将非线性频谱外推与总变分最小化方法整合

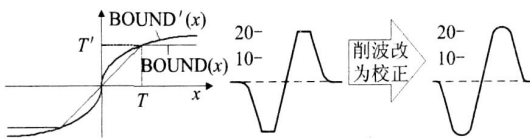
在无源毫米波成像的过程中, 不仅面临高频成分丧失的问题, 还面临加性噪声的影响, 用传统算法处理的时候, 不可避免地将图像中的噪声也放大. 为缓解这个问题, 现融入总变分最小化方法对噪声加以抑制^[7].

Rudin 等人观察到, 受噪声污染的图像总变分明显比无噪声的图像大. 总变分定义为一梯度函数的积分:

$$J_T(u) = \int_{D_u} (|\nabla u|) dx dy \quad (8)$$

限制总变分就会限制噪声, 于是将问题转化为对最优化问题的求解: $\min_u J_T(u)$, 简单地说就是令

$$\frac{\partial J_T(u)}{\partial u} = 0. \text{ 本文中取 } (|\nabla u|) = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}, \text{ 其中 } u_x = \frac{\partial u}{\partial x}, u_y = \frac{\partial u}{\partial y}. \text{ 为了避免总变分在 } u_x = u_y = 0 \text{ 处不可}$$



两种非线性滤波函数 两种非线性滤波对高频分量波形的影响

图 2 两种非线性滤波方式对比图
Fig 2 The comparison between the two forms of nonlinear filter

微, 引入微小的可调参数 $\epsilon > 0$, 于是 $J_T(u) =$

$$\int_{D_u} \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + \epsilon^2} dx dy. \text{ 在离散化处理的时候, 按照}$$

文献 [7] 中给出的降噪定点迭代方程, 从一个起始猜测 u_0 进行迭代计算便可得到该最优化问题的解. 降噪定点迭代方程如式(9)所示:

$$[I + \tilde{D} Q_m^{-1} \tilde{D}] u_{m+1} = g \quad (9)$$

其中, g 为降噪图像, I 为单位阵, \tilde{D} 为规整化因子, Q_m 为一对角矩阵, 相当于离散化的 $\sqrt{|\nabla u_m|^2 + \epsilon^2}$, 计算式为: $Q_m(k, k) =$

$$\sqrt{[u_m(i, j) - u_m(i-1, j)]^2 + [u_m(i, j) - u_m(i, j-1)]^2 + \epsilon^2},$$

其中, \tilde{D} 是一个由一阶差分算子形成的卷积矩阵^[7].

总变分最小化方法能够有效地抑制噪声, 但并不对图像强加一种平滑作用, 这样能使得我们所需要的图像的跳变边缘得到保持^[7]. 总变分最小化方法的引入刚好弥补了非线性外推算法的不足, 解决了原算法外推高频分量的同时把噪声也放大这一问题, 如同为非线性频谱外推算法的有效实现加上了一道保险. 这样, 我们在选取外推高频分量的放大系数 s 时, 还可以适当加强放大的倍数而不用担心将图像中的噪声也放大.

3.3 改进非线性频谱外推算法流程图

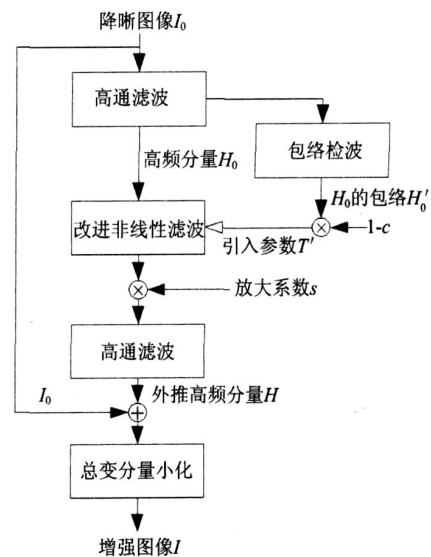


图 3 改进算法的流程图
Fig 3 The flow diagram of the improved algorithm

4 实验结果

4.1 仿真实验

下面用同心圆图片的仿真实验来验证改进算法的有效性.

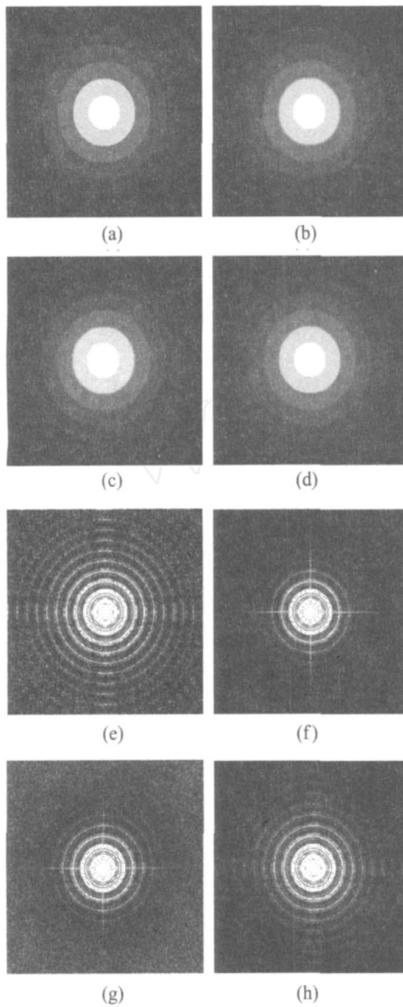


图 4 两种算法的仿真图像实验结果对比图 (a)原始清晰图像 (b)低通滤波后加噪声的降晰图像 (c)传统算法处理结果 (d)改进算法处理结果 (e)图 (a)的频谱 (f)图 (b)的频谱 (g)图 (c)的频谱 (h)图 (d)的频谱

Fig 4 Comparison of simulation results between the two algorithms (a)original clear image (b) blurring image with noise (c) result using original algorithm (d) result using improved algorithm (e) spectra of the image(a) (f) spectra of the image(b) (g) spectra of the image(c) (h) spectra of the image(d)

两种算法对比结果如图 4 所示,其中图 4(a)为原始降清晰图像,图 4(b)为原始图像经过高斯低通滤波后再加上噪声的降晰图像 (SNR = 30dB),图 4(c)为传统非线性频谱外推算法处理结果图 (取 $c = 0.3, s = 3$),图 4(d)为本文所提出的改进算法处理结果图 (取 $c = 0.3, s = 7$),图 4(e)、(f)、(g)、(h)分别为图 4(a)、(b)、(c)、(d)的频谱图。

从频谱图上可以看出,传统非线性频谱外推算法虽然在一定程度上拓展了降晰图像的高频成分,但是效果并不明显,同时还放大了图像中的噪声,而改进算法适当加强放大的倍数 s ,有效地拓展了原图像中高频成分,避免了边缘带来的振铃效应与过

表 1 两种算法的 MSE、PSNR 和 M_{dB} 对比

Table 1 Comparison of MSE, PSNR and M_{dB} between the two algorithms

| | 传统算法 | 改进算法 |
|-------------------|---------|---------|
| MSE(最小均方差) | 13.8384 | 9.8143 |
| PSNR(峰值信噪比/dB) | 36.7199 | 38.2380 |
| M_{dB} (信噪比改善量) | 0.5991 | 4.0371 |

冲现象;同时引入总变分最小化方法,解决了原算法外推高频分量的同时放大噪声的问题,有效地抑制了图像中的噪声。

现用三种评判图像处理的客观标准:MSE(最小均方差)、PSNR(峰值信噪比)和 M_{dB} (信噪比改善量)对两种算法的结果进行比较,如表 1 所示.可以看出在三种指标的衡量下,改进算法均优于原算法。

MSE、PSNR 和 M_{dB} 的计算公式分别如式 (10)、(11)和 (12)所示:

$$MSE = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{(i,j)} (x(i,j) - \hat{x}(i,j))^2, \quad (10)$$

$$PSNR = 10 \log \frac{M \cdot N \cdot \max_{(i,j)} I^2}{\sum_{(i,j)} (x(i,j) - \hat{x}(i,j))^2}, \quad (11)$$

$$M_{dB} = 10 \log \frac{\sum_{(i,j)} (y(i,j) - x(i,j))^2}{\sum_{(i,j)} (x(i,j) - \hat{x}(i,j))^2}, \quad (12)$$

式中, $x(i,j)$ 为原始图像, $y(i,j)$ 为降质图像, $\hat{x}(i,j)$ 为处理结果, M, N 为图像的大小。

4.2 实测图像实验

下面用英国国防评估研究中心于 1997 年公布的伦敦希斯罗机场无源毫米波成像结果图来验证改进算法的有效性。

两种算法对比结果如图 5 所示,其中图 5(a)为无源毫米波辐射计得到的原始图像,图 5(b)为传统

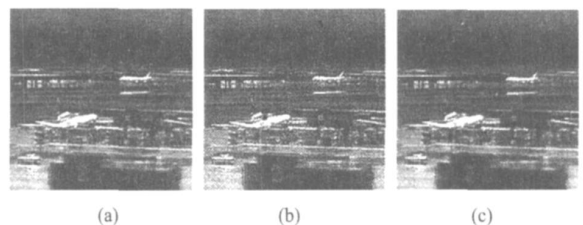


图 5 两种算法的实测图像实验结果对比图 (a)原始降晰图像 (b)传统算法处理结果 (c)改进算法处理结果

Fig 5 Comparison of experimental result between the two algorithms (a) original blurring image (b) result using original algorithm (c) result using improved algorithm

Kailua-Kona Hawaii, SPIE- the International Society for Optical Engineering, 1998, 10—13.

- [15] Doerffer R, Fischer J. Concentrations of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff in case waters derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods [J]. *Journal of Geophysical Research*,

1994, **99** (C4): 7457—7466.

- [16] Tang J W, Wang X M, Song Q J, et al. The statistic inversion algorithms of water constituents for Yellow Sea & East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, **23** (4): 617—626.

(上接 370页)

非线性频谱外推算法处理结果图,图 5(c)为改进算法处理结果图。从实验结果可以看出,改进算法在控制图像的过冲现象、振铃效应与抑制噪声等方面均优于原算法。

但是,从算法的计算复杂性和实时性方面来看,由于改进算法引入了包络提取、校正操作以及总变分最小化的迭代计算,计算复杂性在一定程度上要比原算法大,运算耗时也略比原算法长。4.2的实测图像实验在 MATLAB 7.0的环境下,对同一幅 164×153 大小的图像进行处理,原算法耗时 0.593 s,改进算法在取迭代次数 $m = 40$ 的情况下,耗时 1.25 s,仍然满足实时性的要求。

5 结论

本文针对无源毫米波成像过程中的问题,在传统非线性频谱外推法算法的基础上,改进了原算法中非线性滤波的形式,将“削波”这一截断的操作改为“校正”,并提出校正公式,引入图像的局部信息作为参数添加到公式中,有效地抑制了频谱外推的过程中产生的过冲现象与振铃效应,并且融入总变分最小化的方法抑制噪声。经实验验证,该方法为无源毫米波辐射计成像处理提供了新的有效途径,日后还可在非线性滤波的设计、参数设置及算法实时性的提高等方面做更深一步的研究与改进。

REFERENCES

- [1] ZHANG Guang - Feng. Research on millimeter wave radiometric characteristic and imaging [D]. *Doctoral Thesis of Huazhong University of Science and Technology* (张光锋.毫米波辐射特性及成像研究.华中科技大学博士学位论文), 2005.
- [2] ZHANG Guang - Feng, LI Xing - Guo, LOU Guo - Wei. Research on passivemmw imaging based on an alternating current radiometer [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (张光锋,李兴国,娄国伟.基于交流辐射计的被动毫米波成像研究.红外与毫米波学报), 2007, **26** (6): 461—464.
- [3] Yujiri L. Passive millimeter wave imaging [C]. *Microwave Symposium Digest IEEE MTT-S International*. San Francisco, June 2006: 98—101.
- [4] HONG Han - Yu, WANG Jin, ZHANG Tian - Xu, et al. Study on acceleration technique of circulation iterative restoration algorithm for infrared target images [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (洪汉玉,王进,张天序,等.红外目标图像循环迭代复原算法的加速技术研究.红外与毫米波学报), 2008, **27** (1): 115—118.
- [5] LI Ren, DU Hui - Qian, MEI Wen - Ba. Image enhancement method applied to passive millimetre - wave imaging [J]. *Modern Radar* (李韧,杜慧茜,梅文博.被动式毫米波成像图像的一种增强算法.现代雷达), 2004, **26** (10): 35—37.
- [6] Greenspan H, Anderson C H, Akber S. Image enhancement by nonlinear extrapolation in frequency space [J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2000, **9**: 1035—1048.
- [7] ZOU Mou - Yan. *Deconvolution and Signal Recovery* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (邹谋炎.反卷积和信号复原.北京:国防工业出版社), 2001.