

# 无源毫米波成像最大似然频域校正超分辨率算法

郑鑫<sup>1</sup> 杨建宇<sup>1</sup> 李良超<sup>1</sup>

**摘要** 在无源毫米波成像中, 因为天线孔径大小的限制而导致获取的图像分辨率低, 所以必须采取有效的后处理措施增强分辨率. 本文提出了一种针对无源毫米波成像应用的最大似然频域校正超分辨率算法. 该算法首先使用 Wiener 滤波复原算法恢复图像通带内的频谱分量, 然后运用 Richardson-Lucy 算法实现频谱外推, 最后通过一种频域校正算法, 用 Wiener 滤波器恢复的频谱代替通带内的频谱, 保证图像的低频分量不被破坏. 实验结果表明, 该算法改善了收敛速度, 增强了图像的分辨率, 同时能够有效地减轻恢复图像中的振铃波纹, 有利于无源毫米波成像超分辨的实现.

**关键词** 无源毫米波成像, 超分辨, 最大似然, 图像恢复, 频谱外推, 维纳滤波器  
**中图分类号** TP391.41

## Maximum Likelihood Frequency Domain Correction Super-resolution Algorithm for Passive Millimeter Wave Imaging

ZHENG Xin<sup>1</sup> YANG Jian-Yu<sup>1</sup> LI Liang-Chao<sup>1</sup>

**Abstract** The problem of poor resolution of acquired image in the passive millimeter wave imaging stems mainly from antenna size limitations, thus necessitating some efficient post-processing to achieve resolution improvements. A maximum likelihood (ML) super-resolution algorithm based on frequency domain correction is proposed. First, we employ Wiener filter to restore passband spectrum, then we implement Richardson-Lucy algorithm to complete spectral extrapolation, lastly we implement a spatial spectrum correction algorithm in which the calculated spectrum within the passband is replaced by the low frequency component restored by Wiener filter. Experimental results demonstrate the algorithm improves the convergent rate and enhances the resolution and reduces the ringing effects which are caused by regularizing the image restoration problem. Furthermore, the algorithm is easily implemented for passive millimeter wave imaging.

**Key words** Passive millimeter wave (PMMW) imaging, super-resolution, maximum likelihood (ML), image restoration, spectral extrapolation, Wiener filter.

无源毫米波成像利用场景和目标辐射能量分布差异实现成像. 由于天线孔径限制, 其传递函数是一个低通滤波器 (在衍射受限截止频率之外的频谱为零), 获取的图像分辨率较低. 传统的基于反卷积和逆滤波的图像恢复方法主要用于通带内频谱恢复和消除加性噪声的影响<sup>[1]</sup>, 仅有有限的分辨率增强能力. 分辨率的进一步改善只能通过一类更复杂的算法来实现, 即超分辨率算法<sup>[2]</sup>. 它不仅能够实现通带内频谱恢复, 而且可以恢复孔径衍射受限截止频率之外的高频信息, 即场景的细节分量.

目前, 用于无源毫米波成像的超分辨率算法主要有自适应投影 Landweber 算法<sup>[3]</sup>、凸集投影 (Project onto convex set, POCS) 算法<sup>[4]</sup>、基于期望最大化 (Expectation maximization, EM) 方法<sup>[5]</sup> 的

最大似然 (Maximum likelihood, ML) (Richardson-Lucy, RL) 算法<sup>[6-7]</sup>、最大后验 (Maximum a posteriori, MAP) 算法<sup>[8]</sup>、凸集投影最大似然 (Project onto convex set-maximum likelihood, POCS-ML) 算法<sup>[9]</sup> 等. 其中, RL 算法因具有容易实现、收敛等优点, 而被广泛应用于无源毫米波成像超分辨处理中<sup>[3, 10-11]</sup>.

RL 算法是一种基于泊松分布的最大似然图像复原算法. 它是一种乘积形式的迭代恢复方法, 最初主要运用于医学和天文图像恢复<sup>[5, 12]</sup>. RL 算法属于非线性图像恢复方法, 具有超分辨 (频谱外推) 能力. 由于噪声的存在, RL 算法虽然能够外推部分高频分量, 但同时也破坏了图像通带内的低频分量, 其分辨率的增强是有限的. Wiener 滤波复原算法能够很好地恢复通带内的频谱分量, 用比较少的计算代价获得较好的恢复效果, 它仍然是一种常用的图像恢复算法<sup>[13]</sup>.

为了进一步改善 RL 算法的超分辨处理能力, 把 RL 算法和 Wiener 滤波器的优点结合在一起, 本文提出了一种针对无源毫米波成像运用的最大似然频域校正超分辨率算法. 该算法以 RL 算法作为主选

收稿日期 2007-09-07 收修改稿日期 2008-03-09  
Received September 7, 2007; in revised form March 9, 2008  
国家自然科学基金 (60632020) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (60632020)  
1. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054  
1. School of Electronic and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00028

代过程, 通过一种频域校正算法, 用 Wiener 滤波器恢复的频谱代替通带内的频谱, 在外推图像高频分量的同时, 保证图像的低频分量不被破坏.

## 1 超分辨算法数学模型

进行无源毫米波成像超分辨处理必须建立衍射受限成像数学模型. 假定成像是线性和位移不变的, 衍射受限成像数学模型为

$$g(x, y) = h(x, y) \otimes f(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

其中,  $f(x, y)$  表示原始图像;  $g(x, y)$  表示由成像系统获取的图像,  $n(x, y)$  表示由成像系统引入的加性噪声,  $h(x, y)$  是衍射受限点扩展函数 (Point spread function, PSF), “ $\otimes$ ” 表示二维卷积运算.

也可以使用矩阵向量形式表示

$$\mathbf{g} = \mathbf{H}\mathbf{f} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{g}$ ,  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{n}$  分别是辞书式排列的获取、原始、噪声图像向量. 如果原始图像是  $M \times N$  矩阵, 那么这些向量就是  $MN \times 1$ , 并且  $\mathbf{H}$  是  $MN \times MN$  Toeplitz 矩阵.

相应的频域成像模型为

$$G(u, v) = OTF(u, v)F(u, v) + N(u, v) \quad (3)$$

其中,  $u, v$  是离散频率变量,  $G(u, v)$ 、 $OTF(u, v)$ 、 $F(u, v)$  和  $N(u, v)$  分别是式 (1) 中的  $g, h, f, n$  的傅里叶变换.

图像超分辨问题就是在给定  $g$  和  $h$  情况下, 对  $f$  的求解, 即式 (1) 的逆问题. 而逆问题通常是奇异的或者是病态的. 由式 (3) 可知

$$F(u, v) = \frac{G(u, v)}{OTF(u, v)} - \frac{N(u, v)}{OTF(u, v)} \quad (4)$$

由于在成像系统截止频率之外  $OTF(u, v) = 0$ , 仅从频域角度来讲, 要恢复截止频率之外的高频分量似乎是不可能的.

解析延拓理论是实现超分辨的理论基础. 解析延拓理论包括两个方面的内容: 1) 任何空域有界函数的傅里叶变换是解析函数; 2) 对任何解析函数, 只要能准确地知道它在有限区间内的部分信息, 就可以唯一地确定整个函数<sup>[4]</sup>. 根据给定解析函数在某区间上的取值对函数整体进行重建称为解析延拓.

对于一幅图像, 由于其空域有界, 因此其频谱函数必然解析. 根据解析延拓理论, 截止频率以上的频谱信息可以通过截止频率以下的频谱得以重建, 从而实现图像的超分辨复原.

从式 (4) 也可以看到, 由于噪声存在, 通常不可能准确地知道有限区域内的频谱信息, 因此超分辨

问题是非常病态的. 为了成功地实现超分辨, 还有另外两个方面的要求: 1) 使用非线性算法; 2) 使用一些关于成像系统和解的先验信息. 由此带来的运算是一个非线性运算, 而信号的非线性运算具有外推高频分量的性质, 从而实现图像的超分辨复原.

## 2 RL 算法

RL 算法获得  $f(x, y)$  的最大似然估计 (试图找到一个估计使似然函数  $p(g|f)$  最大化), 即

$$\tilde{f} = \arg \max_f p(g|f) \quad (5)$$

从式 (5) 可以看出, ML 方法的关键是选择一个能够反映成像场景辐射分布的统计模型. 不同的统计模型产生了不同的估计方法. 若  $p(g|f)$  为泊松分布, 最大化似然函数的自然对数 ( $L(g|f) = \ln p(g|f)$ ), 即求解方程  $\partial L(g|f)/\partial f = 0$ , 通过 Picard 迭代方法得到如下迭代方程

$$\tilde{f}^{n+1}(x, y) = \tilde{f}^n(x, y) \left( \frac{g(x, y)}{(h \otimes \tilde{f}^n)(x, y)} \otimes h(x, y) \right) \quad (6)$$

其中,  $\sum_{x,y} h(x, y) = 1$ ,  $h(-x, -y) = h(x, y)$ . 初始条件一般设定  $\tilde{f}^0(x, y) = g(x, y)$ .

从以上分析可以看出, 该算法的超分辨能力来自于每步迭代中涉及的非线性处理, 而且该算法的更新规则自动实现了  $f(x, y)$  估计的非负性限制, 其实质是实现了有约束条件的频谱外推, 可用于无源毫米波图像的超分辨处理. RL 算法具有半收敛属性<sup>[15]</sup>, 即随着迭代的进行, 恢复图像首先逼近原始图像, 然后又偏离原始图像. 迭代次数可作为一个规整化参数, 因此必定存在一个最优的迭代次数  $k_{opt}$ , 在迭代  $k_{opt}$  次后, 获得的图像能够同时满足分辨率和解的稳定性要求.

在有噪声的环境下, RL 算法的非线性运算外推了通带外的部分高频分量, 但同时也破坏了通带内的低频分量, 出现了一些寄生波纹, 分辨率增强有限, 而且收敛速度比较慢.

## 3 最大似然频域校正算法

Wiener 滤波复原算法是一种简单的频域恢复方法<sup>[13]</sup>, 能够很好地恢复通带内的频谱分量. Wiener 滤波器的估计公式为

$$F_W(u, v) = \frac{OTF^*(u, v)G(u, v)}{|OTF(u, v)|^2 + \frac{S_{nn}(u, v)}{S_{ff}(u, v)}} \quad (7)$$

其中,  $G(u, v)$ ,  $OTF(u, v)$ ,  $F_W(u, v)$ ,  $N(u, v)$  分别是式 (1) 中  $g, h, f, n$  的傅里叶变换.  $OTF^*(u, v)$  表

示  $OTF(u, v)$  的共轭.  $S_{nn}(u, v)$  和  $S_{ff}(u, v)$  分别是噪声和原始图像的功率谱, 比值  $S_{nn}(u, v)/S_{ff}(u, v)$  起到了规则化参数的作用. 但是这两个功率谱常常难于估计, 因此用下面的公式近似 Wiener 滤波器

$$F_W(u, v) = \frac{OTF^*(u, v)G(u, v)}{|OTF(u, v)|^2 + \gamma} \quad (8)$$

其中,  $\gamma$  是一个正常数, 在数值上最好取获取图像的信噪比的倒数.

由式 (7) 可知, Wiener 滤波复原算法考虑到了图像信噪比对图像恢复性能的影响<sup>[16-17]</sup>. 当  $S_{nn}(u, v) \gg S_{ff}(u, v)$  (信噪比小) 时,  $F_W(u, v)$  趋近于 0. 而当  $S_{nn}(u, v) \ll S_{ff}(u, v)$  (信噪比大) 时,  $F_W(u, v) \approx G(u, v)/OTF(u, v)$ . 所以 Wiener 滤波复原算法能够比较好地恢复高信噪比的图像.

在实际的无源毫米波图像中, 不同空域频谱分量受噪声的污染是不同的. 在无源毫米波成像系统截止频率之内, 获取图像的低频分量受噪声的污染相对小些, 信噪比高; 其高频分量中包含了更多的噪声分量, 信噪比低. 而在成像系统截止频率之外, 基本上只有噪声分量存在. 由此可知, Wiener 滤波复原算法能够比较好地恢复无源毫米波图像通带内的频谱分量, 滤除成像系统截止频率之外的频谱分量.

为了能够把 Wiener 滤波复原算法和 RL 算法的优点结合在一起, 进一步增强图像的分辨率, 我们提出了最大似然频域校正 (Maximum likelihood frequency domain correction, MLFDC) 算法, 该算法以 RL 算法作为主迭代过程, 并对迭代恢复频谱进行相应的校正, 用 Wiener 滤波器恢复的低频分量代替通带内频谱分量. 在外推图像高频分量的同时, 保证通带内低频分量不被破坏. MLFDC 算法流程图如图 1 所示, 其迭代过程主要通过以下四个步骤完成:

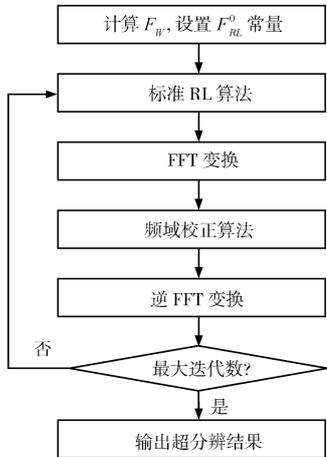


图 1 MLFDC 算法流程图

Fig. 1 MLFDC algorithm flow chart

**步骤 1.** 用式 (8) 计算 Wiener 滤波器恢复频谱  $F_W$ , 并设置初始图像  $f_{RL}^0$  为常量, 实现 RL 迭代过程 (式 (6)), 获得恢复图像  $f_{RL}^k$ .

**步骤 2.** 对  $f_{RL}^k$  作 FFT 变换获得  $F_{RL}^k$ .

**步骤 3.** 实现频域校正算法.

$$F^k = F_W \times OTF + (1 - OTF) \times F_{RL}^k \quad (9)$$

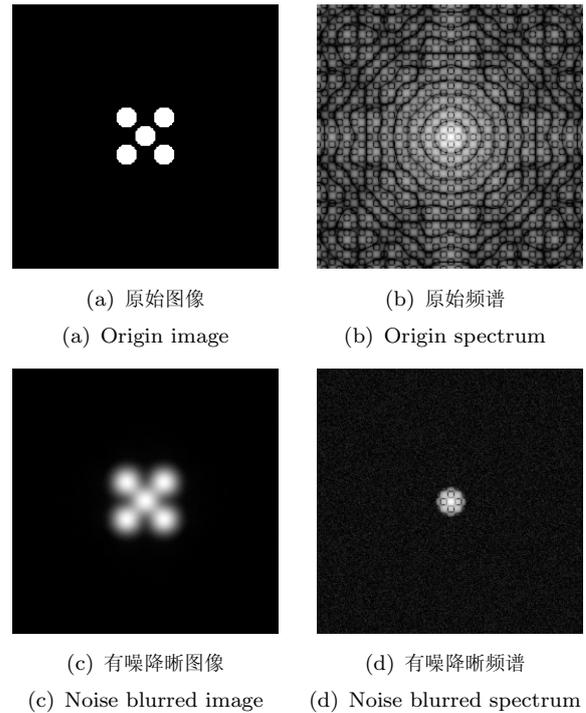
其中,  $F^k, OTF, F_{RL}$  分别表示  $f^k, H, f_{RL}$  的离散傅里叶变换.

**步骤 4.** 对  $F^k$  作逆 FFT 变换获得恢复图像  $f^k$ , 并设  $f_{RL}^k = f^k$ .

## 4 仿真与实验

为了验证 MLFDC 算法的有效性, 这里给出了三个仿真实验结果. 第一个实验如图 2 所示, 图 2 (a) 为由五个大小相同的圆盘构成的大小为  $256 \times 256$  的图像. 为了模拟衍射受限成像系统所产生的降晰效果, 把图 2 (a) 与一个圆孔径天线所产生的直径为 16 像素的 PSF 相卷积, 并增加零均值高斯白噪声, 其降晰信噪比 (Blurred signal-to-noise ratio, BSNR) 为 30 dB. BSNR 定义为

$$BSNR = 10 \lg \left( \frac{\frac{1}{MN} \sum_{i,j} [y(i, j) - \bar{y}(i, j)]^2}{\sigma^2}} \right) \quad (10)$$



(a) 原始图像

(a) Origin image

(b) 原始频谱

(b) Origin spectrum

(c) 有噪降晰图像

(c) Noise blurred image

(d) 有噪降晰频谱

(d) Noise blurred spectrum

图 2 实验 1 的原始数据

Fig. 2 Original data of Experiment 1

其中,  $y(i, j) = h(i, j) \otimes f(i, j)$ , 也即没有噪声的降晰图像;  $\bar{y}(i, j) = E(y)$  表示  $y$  的均值;  $\sigma^2$  表示噪声方差<sup>[18]</sup>. 有噪降晰图像及其频谱分别如图 2(c) 和图 2(d) 所示.

RL 算法、MLFDC 算法分别进行 150 次迭代后恢复的图像及其频谱如图 3 所示. 由图 3 可以看出, RL 算法和 MLFDC 算法都有明显的超分辨(频谱外推)能力, 在相同迭代次数的情况下, MLFDC 算法的超分辨能力好于 RL 算法, 且 MLFDC 算法引入的寄生波纹也小于 RL 算法.

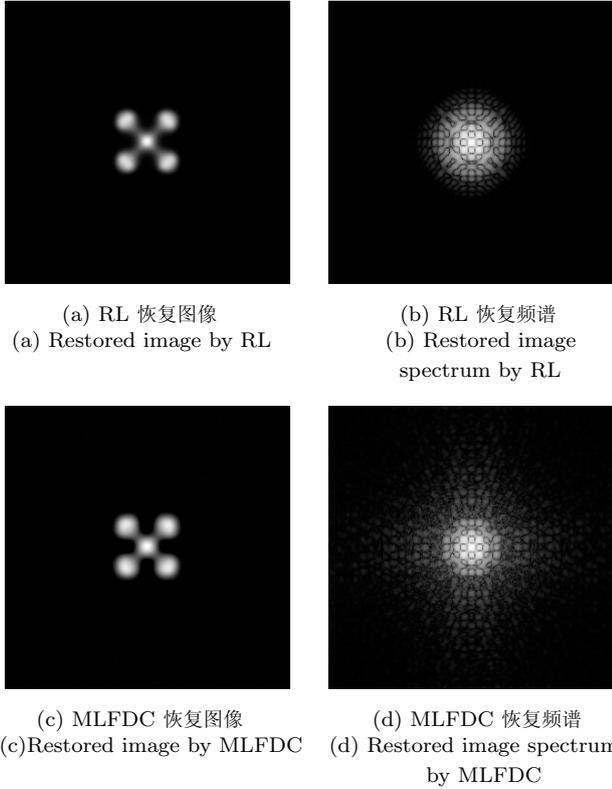


图 3 实验 1 的结果

Fig. 3 Results of Experiment 1

当原始未降晰图像有效时, 可以使用各种评估准则来评价超分辨算法的恢复能力. 最常用也是最简单的评估准则为均方误差准则 (Mean square error, MSE)

$$\text{MSE} = \frac{1}{MN} \sum |f - f^k|^2 \quad (11)$$

其中,  $f$  表示原始图像,  $f^k$  表示第  $k$  次恢复结果.

为了研究 MLFDC 算法在不同噪声环境下对超分辨性能的影响, 我们分别对在四种不同 BSNR 情况下 MLFDC 算法的 MSE 作了比较, 如图 4 所示. 由图 4 可知, 在低信噪比的情况下, MLFDC 算法的半收敛性非常明显, 随着迭代的进行, 图像质量变得越来越差. 当  $\text{BSNR} \geq 20 \text{ dB}$  时, MLFDC 算法收

敛速度加快, MSE 呈下降趋势.

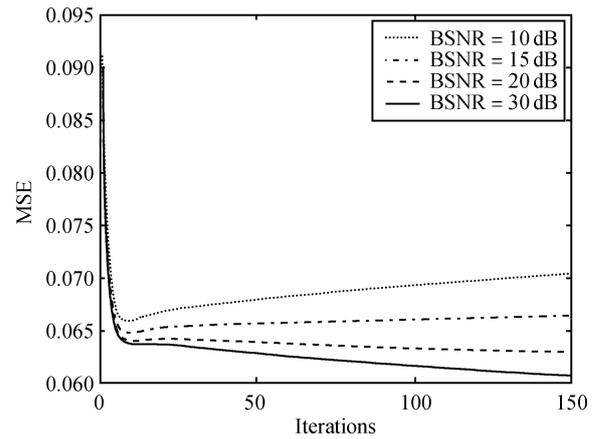


图 4 MSE 与信噪比的关系

Fig. 4 MSE vs. SNR

第二个实验图像如图 5(b) (见下页) 所示, 是我们研制的 91.5 GHz 单通道毫米波辐射计进行二维机械扫描获取的手枪的无源毫米波图像, 属于简单场景无源毫米波成像, 大小为  $32 \times 32$ , 相应的光学图像如图 5(a) 所示. 我们采用了与实验 1 相同的实验方案. 为了更好地观察超分辨恢复效果, 我们使用了一种频域内插方法把获取的无源毫米波图像内插到  $256 \times 256$ . 其频域内插表达式为

$$\bar{G}(n', m') = \begin{cases} \sum_{n=1}^{32} \sum_{m=1}^{32} g(n, m) e^{-j2\pi(\frac{n'n}{N} + \frac{m'm}{M})}, & n' \in [1, 32], m' \in [1, 32] \\ 0, & n' \in [33, 256], m' \in [33, 256] \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $\bar{G}(n', m')$  表示频域内插后的频谱,  $g(n, m)$  是式 (1) 中  $g(x, y)$  的离散化表示. 由式 (12) 可知, 获取图像的频谱信息完全保留在内插后的图像中, 没有引入类似于空域内插所带来的近似误差.

RL 算法和 MLFDC 算法分别进行 50 次迭代后的超分辨恢复图像分别如图 5(c), 5(d) 所示. 它们相应的频谱如图 6 (见下页) 所示. 由图 5 和图 6 可以看出, 在相同迭代次数的情况下, MLFDC 算法所恢复的简单场景无源毫米波图像分辨率好于 RL 算法, 其轮廓更加明显, MLFDC 算法的频谱外推能力更强.

第三个实验原始图像如图 7(a) 所示, 大小为  $256 \times 256$  的坦克图像, 主要为了验证 MLFDC 算法对低信噪比的复杂场景降晰图像是否有效. 我们采用了与实验 1 相同的实验方案. 但其 BSNR 为 20 dB, 有噪降晰图像及其频谱分别如图 7(c) 和图 7(d) 所示. MLFDC 算法进行 150 次迭代后恢

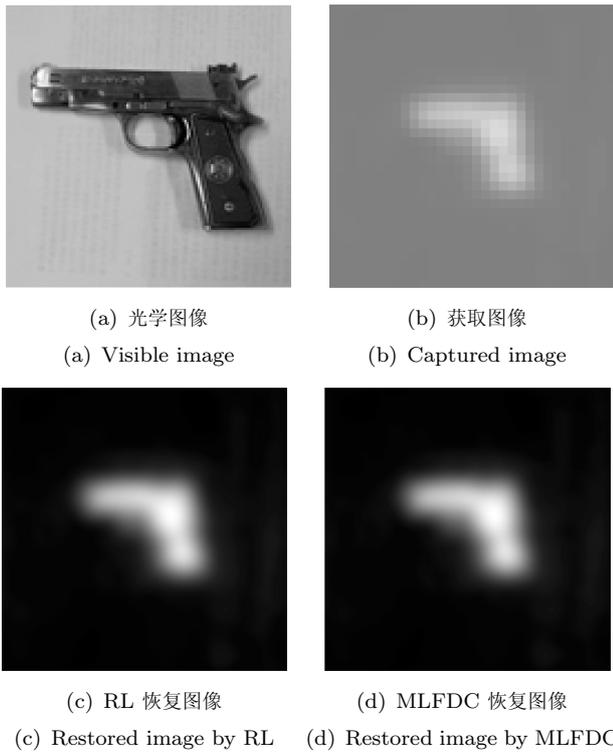


图 5 实验 2 的图像  
Fig. 5 Images of Experiment 2

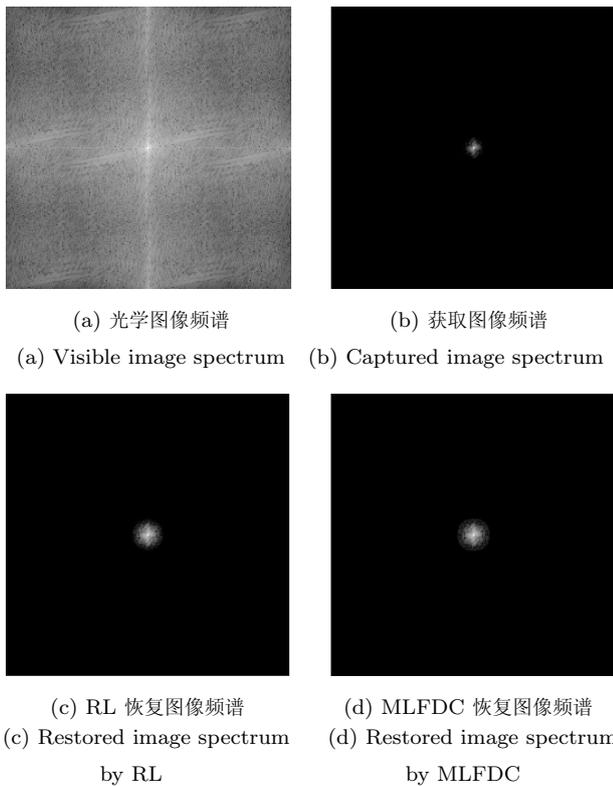


图 6 实验 2 的频谱  
Fig. 6 Spectra of Experiment 2

复的图像及其频谱如图 7(e) 和图 7(f) 所示. 由图 7 可以看出, MLFDC 算法对低信噪比、复杂场景图像还是有效, 但超分辨 (频谱外推) 效果比对简单场景要差些, 而且产生了明显的寄生波纹.

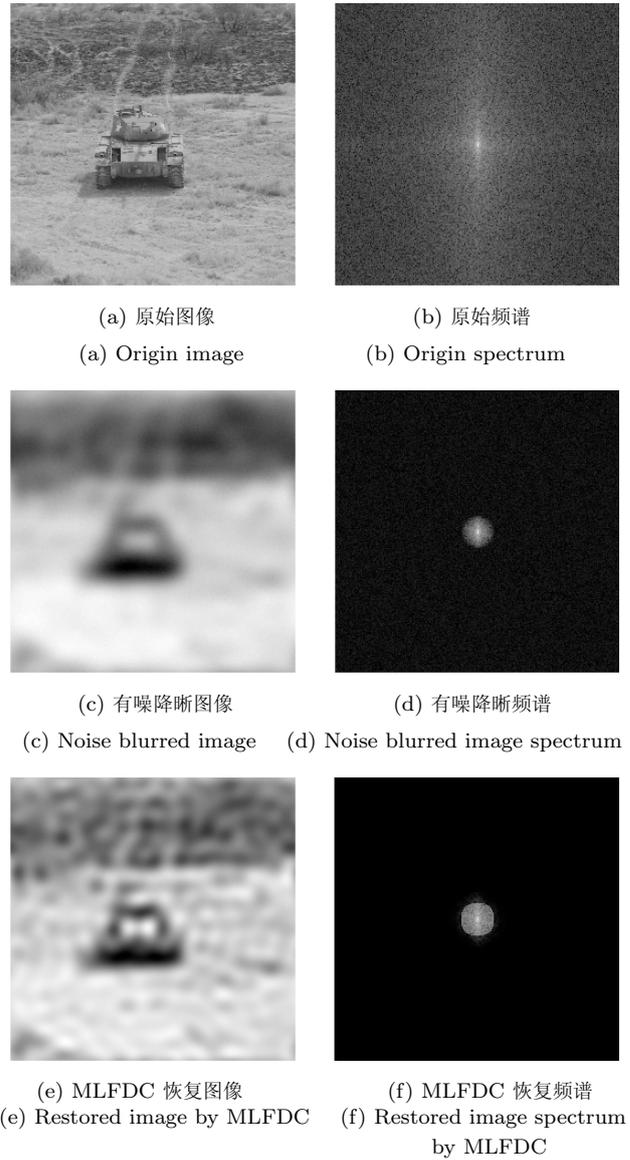


图 7 实验 3  
Fig. 7 Experiment 3

### 5 结论

本文提出了一种针对无源毫米波成像应用的最大似然频域校正算法. 该算法首先使用 Wiener 滤波复原算法恢复通带内的频谱分量, 然后交替运用 RL 算法和一个频域校正算法. 该算法综合了 RL 算法和 Wiener 滤波复原算法的优点, 在外推图像高频分量的同时, 保证图像的低频分量不被破坏. 实验结果表明在合成图像和简单场景无源毫米波成像的情

况下, MLFDC 算法的超分辨能力明显优于 RL 算法. 而且新算法能减少迭代恢复过程中产生的寄生波纹, 适合无源毫米波成像应用. MLFDC 算法也可用于低信噪比的复杂场景降晰图像的超分辨处理, 只是超分辨效果没有简单场景好, 而且寄生波纹比较明显.

## References

- Sezan M I, Tekalp A M. Survey of recent developments in digital image restoration. *Optical Engineering*, 1990, **29**(5): 393–404
- Lettington A H, Yallop M R, Dunn D. Review of super-resolution techniques for passive millimeter-wave imaging. In: *Proceedings of SPIE Infrared and Passive Millimeter-wave Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing*. Bellingham, USA: SPIE, 2002. 230–249
- Zheng X, Yang J Y. Adaptive projected Landweber super-resolution algorithm for passive millimeter wave imaging. In: *Proceedings of SPIE Multispectral Image Processing*. Wuhan, China: SPIE, 2007. 1–7
- Xiao Z L, Xu J Z, Peng S S, Mou S X. Super-resolution image restoration of a PMMW sensor based on POCS algorithm. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*. New York, USA: IEEE, 2006. 680–683
- Dempster A P, Laird N M, Rubin D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 1977, **39**(1): 1–38
- Lucy L B. An iteration technique for the rectification of observed distributions. *Astronomical Journal*, 1974, **79**(6): 745–754
- Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, **62**(1): 55–59
- Hunt B R, Sementilli P. Description of a Poisson imagery super-resolution algorithm. *Astronomical Data Analysis Software and Systems I*, 1992, **25**: 196–199
- Sundareshan M K, Bhattacharjee S. Enhanced iterative processing algorithms for restoration and superresolution of tactical sensor imagery. *Optical Engineering*, 2004, **43**(1): 199–208
- Sundareshan M K. Computationally efficient image restoration and super-resolution algorithms for real-time implementation. In: *Proceedings of SPIE Infrared and Passive Millimeterwave Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing*. Bellingham, USA: SPIE, 2002. 306–317
- Zheng Xin, Yang Jian-Yu, Li Liang-Chao, Jiang Zheng-Mao. Maximum likelihood multigrid super-resolution algorithm for passive millimeter wave imaging. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, **30**(3): 393–396  
(郑鑫, 杨建宇, 李良超, 姜正茂. 无源毫米波成像最大似然多重网格超分辨处理. *系统工程与电子技术*, 2008, **30**(3): 393–396)
- Anconelli B, Bertero M, Boccacci P, Carbillet M, Lanteri H. Restoration of interferometric images III. Efficient Richardson-Lucy methods for LINC-NIRVANA data reduction. *Astronomy and Astrophysics*, 2005, **430**(2): 731–738
- Mignotte M. A segmentation-based regularization term for image deconvolution. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(7): 1973–1984
- Su Bing-Hua, Jin Wei-Qi, Niu Li-Hong, Liu Guang-Rong. Super-resolution image restoration and progress. *Optical Technique*, 2001, **27**(1): 6–9  
(苏秉华, 金伟其, 牛丽红, 刘广荣. 超分辨率图像复原及其进展. *光学技术*, 2001, **27**(1): 6–9)
- Evangelista V, Barsanti L, Passarelli V, Gualtieri P. *From Cells to Proteins: Imaging Nature Across Dimensions*. Berlin: Springer, 2005. 349–370
- Lanteri H, Soummer R, Aime C. Comparison between ISRA and RLA algorithms: use of a Wiener filter based stopping criterion. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 1999, **140**(12): 235–246
- Neelamani R, Choi H, Baraniuk R. ForWaRD: Fourier-wavelet regularized deconvolution for ill-conditioned systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, **52**(2): 418–433
- Bahnam M R, Katsaggelos A K. Digital image restoration. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1997, **14**(2): 24–41



**郑鑫** 电子科技大学电子工程学院博士研究生. 主要研究方向为无源毫米波成像恢复、超分辨、盲解卷积. 本文通信作者. E-mail: yadoyaoyao@163.com  
(**ZHENG Xin** Ph.D. candidate at the School of Electronic and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China. His research interest covers image restoration, super-resolution, and blind deconvolution for passive millimeter wave imaging. Corresponding author of this paper.)



**杨建宇** 电子科技大学电子工程学院教授. 主要研究方向为无源毫米波成像恢复、超分辨处理和合成孔径雷达/逆合成孔径雷达系统设计与信号处理.  
E-mail: jyyang@uestc.edu.cn  
(**YANG Jian-Yu** Professor at the School of Electronic and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China. His research interest covers image restoration, super-resolution for passive millimeter wave imaging, SAR/ISAR system design, and signal processing.)



**李良超** 电子科技大学电子工程学院博士研究生、讲师. 主要研究方向为无源毫米波成像系统设计, 超分辨数学模型.  
E-mail: lcli@uestc.edu.cn  
(**LI Liang-chao** Ph.D. candidate, lecturer at the School of Electronic and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China. His research interest covers system design and super-resolution mathematical model for passive millimeter wave imaging system.)