

(10)

293-298

毫米波焦平面阵列图像的 一种超分辨率算法*

章勇 李兴国

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所,江苏,南京,210094)

TN015
TN919.8

摘要 给出一种直接修改点扩展函数矩阵的特征值,能大大提高毫米波图像分辨率的高速图像恢复新算法,仿真和实际的图像处理结果都证明了这一算法效果良好.

关键词 毫米波图像,焦平面阵列,超分辨率算法,退化模型.

引言

毫米波焦平面阵列成像以其不需要机械扫描即可得到较高分辨率图像、积分时间不受天线扫描速度限制、可实时成像等突出优点而倍受人们关注,90年代以来,这一技术得到很大发展.然而,由于光学系统的衍射限制、毫米波波长大于红外光和可见光,造成毫米波图像的空间分辨率不高而限制了这一成像技术在许多领域的应用,因此提高毫米波图像的空间分辨率成为一个急需解决的问题.

1 退化图像的逆滤波恢复

1.1 图像的退化模型

在形成毫米波焦平面图像的过程中,由于各种因素,会引起图像的退化变质,典型的线性、移不变非运动退化图像模型有两类:

一类是空间模糊退化模型,是由于毫米波经焦平面阵列光学系统的有限窗孔而发生衍射作用所引起的,如图1(a)所示,另一类是由随机噪声引起的退化模型,如图1(b)所示.

用矩阵数学方法表示的离散退化模型为^[3]

$$f = hg + n, \quad (1)$$

式(1)中 f 、 g 分别为退化图像和目标理想图像, h 表示系统的脉冲响应函数,即系统的点扩展函数离散所形成的矩阵, n 为附加噪声.若点扩展函数为 δ 函数,则光学系统为理想成像系统,图像不产生模糊和失真.但实际存在的衍射、像差和毫米波散射等因素使点物像受到扩展,光学系统对传输图像有低通空间滤波作用.目标的毫米波辐射具有非相干性,衍射图像是电磁波强度(功率)的迭加.

1.2 逆滤波恢复图像

* 国防重点预研基金(编号: 1A. 2. 2)资助项目
稿件收到日期 1997-12-01,修改稿收到日期 1998-03-20



图1 两种图像退化模型
(a)衍射作用引起的退化模型 (b)随机噪声引起的退化模型
Fig. 1 Two models of blurred image

(a) the one caused by the diffraction effect, (b) the other caused by random noise

被污染、模糊的图像通常利用信号处理的方法来恢复目标图像,恢复图像的方法很多,逆滤波法是最基本的一种方法.

在式(1)中,如果点扩展函数矩阵的逆存在,可得出^[3]

$$g = h^{-1}f - h^{-1}n, \quad (2)$$

这是退化的图像通过一个和点扩展函数频率特性相反的滤波器来恢复图像的,故名逆滤波法.若 n 为零,式(2)可提供精确解.但实际图像总是存在噪声的,由于 h 有低通滤波作用,这样,即使是微弱的噪声,也可使 $h^{-1}n$ 有很大的空间高频成份,从而在恢复的图像中出现幅度很大的高频分量,甚至图像为噪声所淹没.所以,逆滤波法在大多数情况下都不能得到满意的恢复图像,需要修改矩阵 h 使恢复的图像对高频噪声不敏感.

2 超分辨率算法及其实验

2.1 点扩展函数矩阵的修正

对于一维系统,令 λ 为 h 的一个特征值, α 表示 h 的特征向量,则有^[4]

$$h\alpha = \lambda\alpha, \quad (3)$$

由 h 的对称性,存在一个正交矩阵 P ,使

$$P^{-1}hP = h_0,$$

即

$$h^{-1} = Ph_0^{-1}P^{-1};$$

其中 h_0 为一对角矩阵,其对角线元素是 h 的特征值 λ , h_0^{-1} 也是对角矩阵,其对角线元素是 h 的特征值的倒数 $1/\lambda$, P 的列为 h 的全部特征向量.

为减少当 λ 接近零时由噪声所引起的敏感性, h_0^{-1} 的对角线元素由 $1/\lambda'_i$ 代替, λ'_i 为

$$\lambda'_i = \lambda + \frac{\gamma^2}{\lambda}, \quad (4)$$

式(4)中, γ 是对噪声的一个估计参数,

$$1/|\lambda'_i| \leq 1/|\lambda| + \gamma, \quad (5)$$

由相似矩阵的性质,可得经修正的点扩展函数为

$$h' = P(h_0 + \gamma^2 h_0^{-1})P^{-1} = Ph_0P^{-1} + \gamma^2 Ph_0^{-1}P^{-1} = h + \gamma^2 h^{-1}, \quad (6)$$

将式(6)代入式(2)可得

$$g(h')^{-1}f - (h')^{-1}n, \quad (7)$$

连同式(5)可见, $(h')^{-1}n$ 项不能被放大到很大, 修改后的点扩展函数对所恢复的图像的噪声有很大压制作用, γ^2 愈大, 对噪声的平滑愈严重. 式(8)中 g 为目标的理想图像, 实际上, h^{-1} 具有高通性质, 如 γ 选取适当, 恢复的图像

$$g' = (h')^{-1}f \quad (8)$$

能较好地逼近理想图像.

2.2 点扩展函数的二次修正

上述修正点扩展函数矩阵和光学系统不一致, 即 $(h')^{-1} \neq h^{-1}$, 图 2(a)、2(b) 分别是修正前后的点扩展函数(点扩展函数可看作是一个点目标 δ 函数所成的图像, 这里计算机产生修正前的点扩展函数是典型的非相干光学系统的脉冲响应 $\text{Sinc}^2 x$ 函数)强度分布, 经恢复处理后的图像比处理前的图像分辨率有明显提高, 但图像的旁瓣较大, 容易在恢复的图像中造成虚假的波纹, 致使信噪比下降, 为进一步削弱这种作用, 需对点扩展函数进行二次修正.

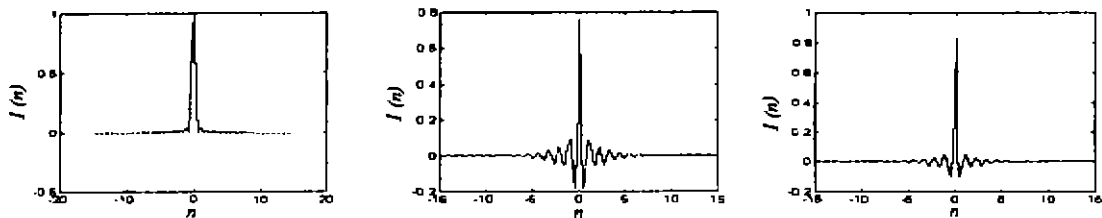


图 2 修正前后的点扩展函数

(a) 原点扩展函数 (b) $\gamma=0.4$ 修正点扩展函数 (c) $\gamma_1=0.4, \gamma_2=0.1$ 时二次修正点扩展函数

Fig. 2 The original point spread function and the point spread functions restored

(a) The original point spread function, (b) The point spread function restored with $\gamma=0.4$,

(c) The point spread function restored with $\gamma_1=0.4$ and $\gamma_2=0.1$

令

$$d = (h')^{-1}h, \quad (9)$$

则有

$$g_{r_1} = (h')^{-1}f, \quad (10)$$

$$g_{r_1 r_2} = (d')^{-1}g_{r_1} = (d')^{-1}(h')^{-1}f; \quad (11)$$

其中, h' 是按照式(5)用 γ_1 得到的 h 的修正点扩展函数, d' 是按照式(5)用 γ_2 得到的 d 的修正点扩展函数, 且 $\gamma_1^2 > \gamma_2^2$, 则二次修正的点扩展函数为

$$y = [(d')^{-1}(h')^{-1}]^{-1} = h'd', \quad (12)$$

恢复的目标图像 $g_{r_1 r_2}$ 是 γ_1, γ_2 的函数, γ_1, γ_2 的选择取决于原始图像的信噪比, 如原始图像的噪声小一些, 则用较小的 γ 值也能得到较好的恢复图像.

图 2(c) 为 $\gamma_1=0.4, \gamma_2=0.1$ 时二次修正点扩展函数, 旁瓣已被大幅度压缩, 提高了图像

的信噪比.

图 3(a)、(b)分别为用简单逆滤波法和二次点扩展函数修正法所恢复的点状图像的频域图,可以看到,简单逆滤波法使高频噪声放大,而二次点扩展函数修正法滤波除了绝大部分噪声,同时也恢复了由于衍射作用失去的图像较高频段的内容.

图 4(a)为相邻两点目标模糊退化的原图像波形,图 4(b)为经二次修正法处理后的结果,可以发现,图像的两点目标可分辨性得到明显增强.

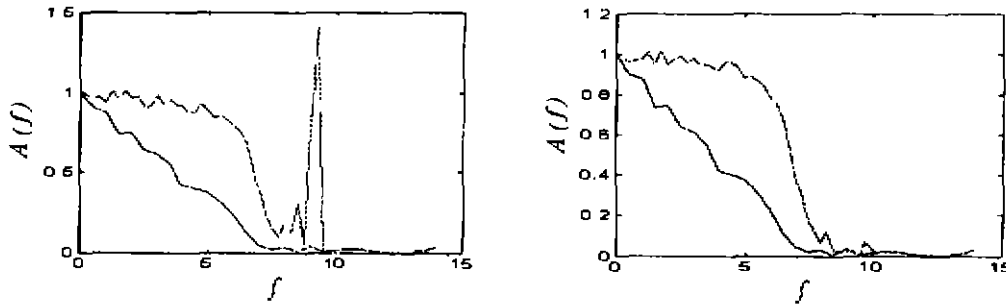


图 3 点目标图像的空间频域 (a) 原图像和简单逆滤波恢复的图像在频域的对比
(b) 原图像和二次修正法恢复的图像($\gamma_1=0.4, \gamma_2=0.1$)在频域的对比

Fig. 3 Fourier space of the point target image

- (a) the lower curve for original image, the upper curve for restored image by inverse filtering
(b) the lower curve for original image, the upper curve for restored image by modifying the point spread function ($\gamma_1=0.4, \gamma_2=0.1$)

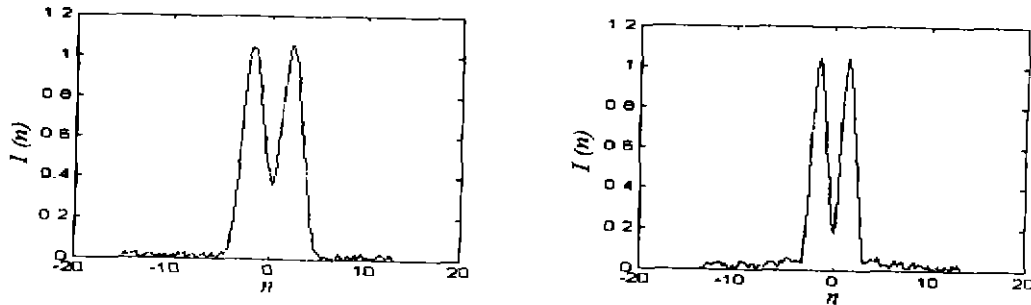


图 4 二次修正处理前后的两点目标图像

- (a) 退化的两点图像 (b) 点扩展函数二次修正法恢复的两点图像($\gamma_1=0.4, \gamma_2=0.1$)

Fig. 4 Comparison of original two points image and image restored with γ_1, γ_2

- (a) the two-point image blurred (b) the two-point image restored with $\gamma_1=0.4$ and $\gamma_2=0.1$

2.3 二维图像的处理

超分辨率算法用于二维图像处理时,可对水平和垂直分量分别单独处理,即二维扩展函数可记为

$$h = h_h * h_v, \quad (13)$$

式(13)中 h_h, h_v 分别是水平、垂直点扩展矩阵函数,符号 * 代表矩阵直积.则可先对水平(或垂直)点扩展函数作修正处理运算,再对垂直(或水平)点扩展函数作同样处理.

$$g = h'_x f(h'_y)^T, \quad (14)$$

式(14)中 h'_x 、 h'_y 分别为二次修正后的行、列点扩展函数, T 表示矩阵转置。

图 5(a)是一幅 94GHz 100×64 个像素的毫米波焦平面阵列坦克原始图像,图 5(b)为利用超分辨算法处理所得到的结果(取 $\gamma_1=0.4$, $\gamma_2=0.1$)。图 5(b)与图 5(a)比较可见,图像的分辨率得到较大的改善。



图 5 超分辨率处理前后的图像

(a) 原毫米波焦平面图像 (b) 超分辨率处理后的图像

Fig. 5 Comparison of original image and superresolved image

(a) original mm-wave focal plane array image (b) superresolved mm-wave image

3 结语

本文毫米波焦平面阵列图像的超分辨率算法属于一种线性滤波算法,克服了逆滤波法会放大噪声这一重要缺点。虽然此算法有三步,但可以将毫米波图像处理过程简化为两个矩阵的乘积,因此计算量小,计算速度远高于相同功能的迭代算法和通常的伪逆算法,而且也没有象最大熵恢复等方法那样需要许多先验知识和约束条件。此算法大大提高了毫米波图像的空间分辨率,使毫米波焦平面阵列成像技术可推广到更广泛的实际应用领域。

REFERENCES

- 1 Picone P J. Passive millimeter wave imaging A review. AD-279275
- 2 Goldsmith P F. *IEEE Trans. MTT*, 1993, 41(10): 1664~1675
- 3 LIU Zheng-Kai, ZHAI Jian-Xiong. *Digital image restoration and reconstruction*, Hefei: University of Science and Technology of China Press (刘政凯, 翟建雄. 数字图像恢复与重建, 合肥: 中国科学技术大学出版社), 1989, 1~54
- 4 WU Jiang-Hua, CHEN Chang-Dong. *Matrix theory*, Shanghai: Tongji University Press (吴雄华, 陈承东. 矩阵论, 上海: 同济大学出版社), 1994, 32~44
- 5 Fahimi H. *SPIE*, 1995, 1567: 117~125
- 6 Gleed D G. Lettington A H. *SPIE*, 1994, 2182: 255~259
- 7 Gleed D G. *SPIE*, 1991, 1567: 65~72
- 8 Gerchberg R W. *Optica ACTA*, 1974, 21(9): 709~720
- 9 SUN Zhong-Kang, SHAN Zhen-Kang. *Digital image processing and its applications*, Beijing: National Defence Industry Press (孙仲康, 沈振康. 数字图像处理及其应用, 北京: 国防工业出版社), 1985: 121~150

A SUPERRESOLUTION ALGORITHM OF MILLIMETER WAVE FOCAL PLANE ARRAY IMAGE*

ZHANG Yong LI Xing-Guo

(Research Institute of Millimeter Wave & Light-Wave Near-sensing Technology,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract A new algorithm was presented, which can improve millimeter wave image resolution by directly altering the eigenvalues of the point spread function matrix. The results of computer simulation and actual image processing show good effect of the algorithm.

Key words millimeter wave image, focal plane array, superresolution algorithm, blurred model.

* The project supported by the National Defence Preliminary Research Foundation of China
Received 1997-12-01, revised 1998-03-20