

无源毫米波超分辨率算法及实时性研究

李良超, 杨建宇, 郑鑫, 姜正茂

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】针对无源毫米波成像中图像分辨率低的问题,提出了一种改进的最大后验(MAP)超分辨率算法。该算法结合了Wiener滤波复原算法和基于泊松分布的MAP算法的优点,使用Wiener滤波复原算法恢复图像通带内的低频分量,运用MAP算法作为主迭代过程实现频谱外推,同时保证低频分量不被破坏;并对该算法的计算复杂度和实时性进行了分析。通过仿真可知,该算法可有效地恢复图像截止频谱外的信息,提高图像空间分辨率,处理时间少,易于实现并行处理。

关键词 最大后验; 无源毫米波; 实时性; 超分辨

中图分类号 TN957.52

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.06.012

Research on Passive Millimeter Wave Image Super-Resolution Algorithm and Real-time Implementation

LI Liang-chao, YANG Jian-yu, ZHENG Xin, and JIANG Zheng-mao

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

Abstract To solve the problem of poor resolution in passive millimeter wave (PMMW) imaging, we present an improved maximum a posteriori (MAP) super-resolution algorithm. The algorithm combines the advantages of Wiener filter restoration algorithm and MAP algorithm based on Poisson distribution. The Wiener filter is employed to restore the pass-band spectrum, and the MAP algorithm is applied to complete spectral extrapolation as the main iterative process to ensure that low-frequency component is not destroyed as spectral extrapolating. Meanwhile, the computational complexity and real time of the algorithm are analyzed. Furthermore, simulation results show that the algorithm can effectively restore the frequency out side the cut off frequency, enhances the resolution and can be implemented by parallel processing.

Key words maximum a posteriori; passive millimeter wave; real-time; super-resolution

毫米波可以穿透云、雨、雾、战场硝烟等恶劣天气,又可以穿透部分衣物,因此主要应用在全天候全天候场面监控、机场安检等领域^[1-2]。

根据黑体辐射理论,任何温度高于绝对零度的物体,都会辐射不同强度的电磁波。无源毫米波成像系统探测物体辐射的毫米波能量,并利用场景和目标的辐射能量分布差异来实现成像。与红外和光学所处的电磁波频段不同,在毫米波段,物体辐射的差异更大而更有利于成像;已有研究结果表明:虽然物体的毫米波频段的热辐射能量比红外频段弱 10^8 ,但毫米波接收机噪声性能优于红外探测器 10^5 ,而物体辐射温差可以弥补其余 10^3 ,因此毫米波无源辐射能量已足以被毫米波辐射计接收和探测^[3]。

在无源毫米波焦平面阵列成像中,由于天线有限孔径尺寸的限制,其传递函数是一个低通滤波器,在由衍射极限分辨率所决定的某个截止频率以上的

值均为零,故获取的图像分辨率较低。传统的图像恢复方法仅有有限的空间分辨率提高能力,分辨率的进一步改善只能通过超分辨率算法^[4]来实现。超分辨率信号处理的目的是在衍射受限(天线低通效应)、有噪声污染的条件下,利用所得到的图像数据尽可能恢复有限天线尺寸所滤除的高频分量,突破衍射受限分辨率,实现目标场景的重构,提高空间分辨率。超分辨率信号处理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凸集投影(POCS)算法^[5]、期望最大化^[6](EM)方法的最大似然(ML)算法^[7]、最大后验(MAP)算法^[8],凸集投影最大似然(POSC-ML)算法^[9]等。另一方面,随着传感器技术的发展,焦平面阵列可以并行实时地获得大量像素数据,甚至可达百万像素^[10],因此,

收稿日期: 2008-05-04; 修回日期: 2008-07-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60632020)

作者简介: 李良超(1978-),男,博士生,主要从事无源毫米波成像方面的研究。

算法的复杂度和实时性分析也成为无源毫米波焦平面阵列成像面临的挑战。

为了进一步改善超分辨处理图像复原能力, 本文采用了一种改进的基于泊松分布的MAP算法实现频谱外推, 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; 同时, 对算法的计算复杂度和实时性也进行了分析。

1 超分辨率算法数学模型

超分辨处理技术是无源实时成像的关键技术之一, 直接影响毫米波辐射计图像的空间分辨率、图像对比度、辐射精度和几何精度等。

超分辨信号处理是建立在衍射受限成像数学模型基础上的。忽略天线波束非均匀性和通道不一致性的影响, 衍射受限成像系统是线性和时不变的, 其数学模型为:

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

式中 $f(x, y)$ 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; $h(x, y)$ 表示成像系统的衍射受限点扩展函数PSF, 由此可知, PSF是一个低通滤波器; \otimes 表示二维卷积运算。

相应的频域成像模型为:

$$G(u, v) = \text{OTF}(u, v)F(u, v) + N(u, v) \quad (2)$$

式中 u, v 为离散频率变量; $G(u, v)$ 、 $\text{OTF}(u, v)$ 、 $F(u, v)$ 、 $N(u, v)$ 分别为 $g(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 、 $n(x, y)$ 的空间二维傅里叶变换。

图像超分辨问题就是在给定 $g(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 情况下, 对 $f(x, y)$ 的求解, 即式(1)的逆问题。一般是估计一个 $f(x, y)$, 使得其在模型和观测值之间的距离 D 最小, 即:

$$\tilde{f} : \inf(\|g - f(x, y) \otimes h(x, y)\|), f(x, y) \in D \quad (3)$$

而逆问题通常是奇异的或病态的, 由式(2)可知:

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

由于在成像系统截止频率之外 $\text{OTF}(u, v) = 0$, 要恢复截止频率之外的高频分量几乎是不可能的。而由解析延拓理论和当物体是空域有限时, 它的频谱是解析的, 只要有足够多的先验信息, 就可以恢复截止频率之外的频谱分量, 从而实现图像的超分辨。

1.1 基于泊松分布的MAP算法

基于泊松分布^[11]的MAP算法即获得 $f(x, y)$ 的最大后验估计就是找到一个估计 \tilde{f} 使 $p(f|g)$ 最大化, 即:

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

根据贝叶斯方法, 条件概率密度函数之间的关系为:

$$p(f|g) = \frac{p(g|f)p(f)}{p(g)} \quad (6)$$

在无源成像中, $p(g)$ 与 f 是相互独立的, 根据式(6), 式(5)可以简化为:

$$\tilde{f} = \arg \max_f [p(g|f)p(f)] \quad (7)$$

考虑到 $p(g|f)$ 和 $p(f)$ 都为泊松分布模型, 从式(7)可以看出, MAP方法的关键是对 $p(g|f)$ 选择一个能反映成像场景辐射分布的统计模型, 不同的统计模型产生不同的估计方法。

若 $p(g|f)$ 为泊松分布, 最大化后验解, 即求自然对数 $L(g|f) = \ln p(g|f)$, 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:

$$\tilde{f}^{n+1} = \tilde{f}^n \exp \left(\left(\frac{g}{(h \otimes \tilde{f}^n)} - 1 \right) \otimes h \right) \quad (8)$$

其一阶近似为:

$$\tilde{f}^{n+1} = \tilde{f}^n \left(\frac{g}{(h \otimes \tilde{f}^n)} \otimes h \right) \quad (9)$$

式中 $\sum h(x, y) = 1$; $h(-x, -y) = h(x, y)$ 。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, 基于泊松分布的MAP超分辨算法是一种非线性迭代恢复方法, 具有容易实现、收敛等优点。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, 被广泛应用于无源毫米波超分辨处理中^[12]。

MAP算法具有半收敛属性, 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, 使获得的图像能够同时满足分辨率和解的稳定性要求。

1.2 Wiener滤波复原算法

由于噪声的存在, 基于泊松分布的MAP算法虽然能够外推部分高频分量(具有一定的频谱外推能力), 但同时也破坏了图像通带内的低频分量, 出现了一些振铃波纹, 其分辨率的提高有限。而Wiener滤波复原算法可以很好地恢复通带内的频谱分量

[13-14], 能够用比较少的计算代价获得较好的恢复效果, 是一种常用的图像恢复算法。

Wiener滤波复原算法是一种简单的频域恢复方法^[15]。Wiener滤波器的估计公式为:

$$F_w(u, v) = \frac{\text{OTF}^*(u, v)G(u, v)}{|\text{OTF}(u, v)|^2 + S_m(u, v)/S_{ff}(u, v)} \quad (10)$$

式中 $G(u, v)$ 、 $\text{OTF}(u, v)$ 、 $F_w(u, v)$ 分别为式(1)中 $g(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 的傅里叶变换; $\text{OTF}^*(u, v)$ 为 $\text{OTF}(u, v)$ 的共轭; $S_m(u, v)$ 和 $S_{ff}(u, v)$ 分别为噪声和原始图像的功率谱, 比值 S_m/S_{ff} 起到了规则化的作用。由式(7)可知, 在成像系统截止频率之下, Wiener滤波复原算法能够很好地恢复高信噪比的频率分量, 而衰减低信噪比的频率分量^[16-17]。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。获取图像的低频分量受噪声的污染相对小些, 信噪比高; 而其高频分量中包含了更多的噪声分量, 受噪声的污染相对大得多, 信噪比低。因此, Wiener滤波复原算法能够很好地恢复通带内的频谱分量, 滤除成像系统截止频率之外的频率分量。

1.3 改进的MAP算法(IMAP)

为了能够把Wiener滤波复原算法和基于泊松分布的MAP算法的优点结合在一起, 进一步增强图像的分辨率, 本文提出了一种改进的基于泊松分布的MAP算法, 即IMAP算法。该算法以MAP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。

频域校正方法为:

$$F^k = F_w * \text{OTF} + (1 - \text{OTF}) * F_{\text{MAP}}^k \quad (11)$$

式中 F^k 、 OTF 、 F_{MAP}^k 、分别表示 f^k 、 H 、 f_{MAP}^k 的离散傅里叶变换。

根据以上分析, 可归纳出改进的MAP频域校正算法的实现流程图, 如图1所示。首先计算Wiener滤波器恢复频谱 F_w , 并设置初始图像 $f_{\text{MAP}}^0 = \text{常量}$, 实现MAP迭代过程, 获得恢复图像 f_{MAP}^k ; 其次对 f_{MAP}^k 做FFT变换获得 F_{MAP}^k , 利用式(11)实现频域校正算法; 最后对 F^k 做逆FFT变换获得恢复图像 f^k , 并设 $f_{\text{MAP}}^k = f^k$ 。

1.4 计算复杂度及实时性分析

根据式(9), 要完成一次上述算法的迭代运算, 需完成两次2-D的快速傅里叶变换(FFT)、两次逆傅里叶变换(IFFT)、三次矩阵乘法运算和一次矩阵除

法运算; 若考虑到三次矩阵乘法、一次除法和其他一些必要的操作(如初始化、比例缩放和完成格式要求等)小于两次2-D FFT所需时间。故上述算法的一次迭代运算的计算量的上限为6次2-D FFT运算。如一幅 $N \times N$ 的图像, 其执行一次2-D FFT运算, 所需指令周期数为:

$$N_c = 2N[(\log_4 N) \times (10N/4 + 33) + 7 + N/4] \quad (12)$$

故其一次MAP迭代算法所需的指令周期数为:

$$N_{\text{MAP}} \leq 6N_c \quad (13)$$

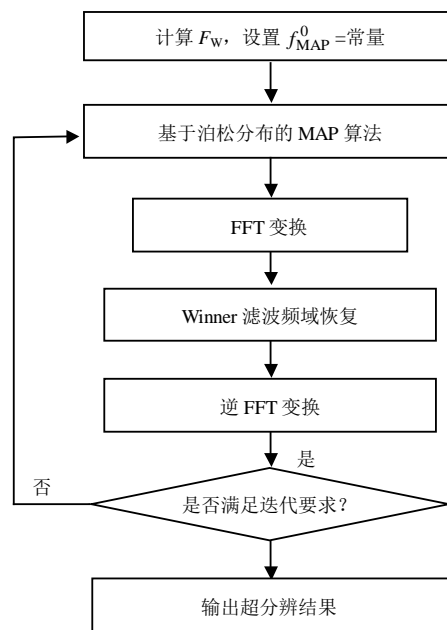


图1 IMAP算法流程图

根据上述分析, 在双片TS-201实验平台ADSP-TS201(600 MHz晶振)上, 针对不同尺寸的图像进行100次IMAP算法迭代仿真, 其算法实时性分析如表1所示。由表1可看出, 当 $N=256$ 时, 每完成一次IMAP所需时间为31.2 ms。

表1 算法实时性分析

图像大小	所需时钟周期数	单片DSP执行所需要时间/s	处理能力/帧·s ⁻¹
256×256	1 573 418 165	3.12	0.32
128×128	400 441 389	0.80	1.25
64×64	89 181 708	0.17	5.88

2 仿真与实验分析

为了验证改进的MAP算法的有效性, 本文给出了两个仿真实验结果。第一个实验如图2所示, 由类蝴蝶结构成大小为 256×256 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2a同一个圆孔径天线所产生的直径为16像素的点扩展函数(PSF)相卷积, 并增加零均值高斯白噪声。原始图像、原

始图像频谱、有噪降晰图像及其频谱分别如图2a~图2d所示。由图2b可知,原始图像有丰富的低频成分,经过透镜天线后其频谱如图2d所示,可见天线的衍射受限效应(即低通效应)。降晰过程使截止频率16像素以上的所有频率分量为零。

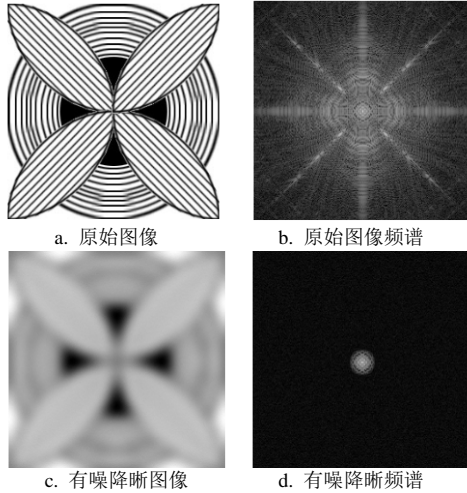


图2 类蝴蝶结图像及频谱退化仿真

运用MAP算法和改进的MAP频域校正算法分别进行50次迭代,恢复的图像及其频谱如图3所示。由图3可以看出,MAP算法和改进的IMAP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,改进的IMAP算法的超分辨能力好于MAP算法,且引入的振铃波纹也小于MAP算法。

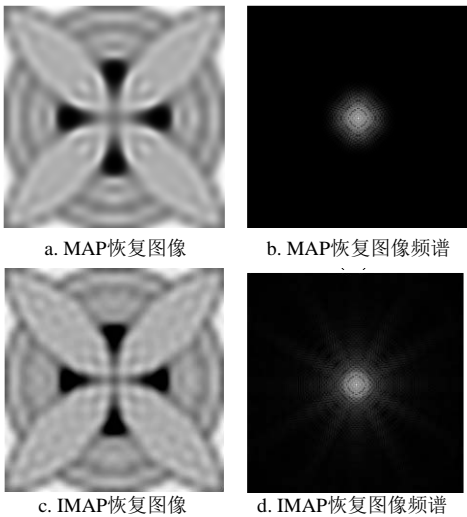


图3 超分辨算法恢复图像及频谱

第二个实验采用了与实验1相同的实验方案,如图4所示。图4b是本文研制的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32×32,相应的光学图像如图4a所示。由图4可以看出,在相同迭代次数的情况下,使用改进的IMAP

算法所恢复的无源毫米波图像分辨率优于MAP算法。

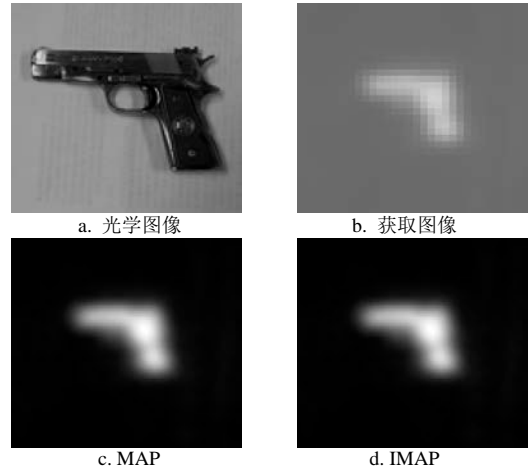


图4 实测数据及两种算法超分辨结果

为了验证算法的实时性,本文通过ADSP-TS201链路口与信号采集单元通信,将IMAP算法在ADSP-TS201实验平台上实现,处理流程如图5所示。

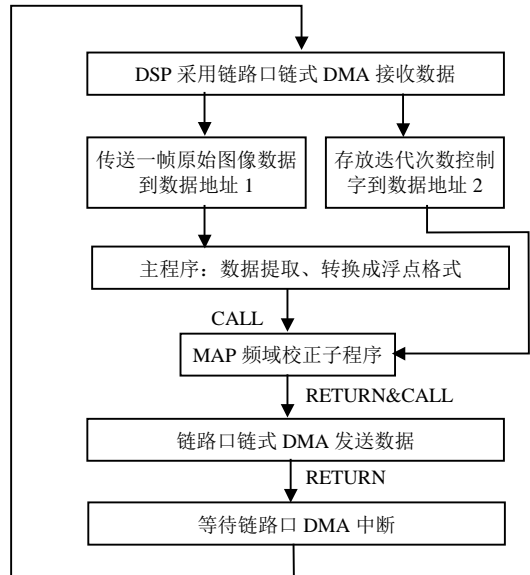


图5 算法DSP处理流程图

实验结果表明,其完成一次IMAP算法所需时间为31.2 ms,迭代50次需时1.56 s,这满足机场安检等领域的应用实时性要求。

3 结论

针对无源毫米波实时成像应用,本文提出了一种改进的最大后验(IMAP)算法,该算法首先使用Wiener滤波复原算法恢复通带内的频率分量,然后交替运用MAP算法和一个频域校正算法。该算法综合了MAP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,改进的MAP算法的超分辨能

力明显优于MAP算法。在获得相同分辨率的条件下,新算法的收敛速率更快,并能减少迭代恢复过程中产生的振铃波纹,算法实时性也能更好的满足系统实时性要求,更适合无源毫米波实时成像领域的应用。

参 考 文 献

- [1] YUJIRI L, SHOUCRI M, MOFFA P. Passive millimeter wave imaging[J]. IEEE Microwave Magazine, 2003, 4: 39-50.
- [2] LI Liang-chao, YANG Jian-yu, ZHENG Xin, et al. Design of a PMMW imaging system[C]//Proc IEEE ICCAS'07. Kokura, Fukuoka, Japan: IEEE, 2007, 2: 1313-1316.
- [3] SEZAN M I, TEKALP A M. Survey of recent developments in digital image restoration[J]. Optical Engineering, 1990, 29: 393-404.
- [4] LI L C, YANG J Y, XIONG J T, et al. W band dicke-radiometer for imaging[J]. Int J Infrared Milli Waves, 2008, 29: 879-888.
- [5] XIAO Ze-long, XU Jian-zhong, PENG Shu-sheng, et al. Super resolution image restoration of a PMMW sensor based on POCS algorithm[C]//IEEE Proceedings of ISSCAA. Harbin, China: IEEE, 2006.
- [6] LUCY L B. An iteration technique for the rectification of observed distributions[J]. Astronomical Journal, 1974, 79(6): 45-754.
- [7] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62(1): 55-59.
- [8] HUNT B R, SEMENTILLI P. Description of a poisson imagery super-resolution algorithm[J]. Astronomical Data Analysis Software and Systems, 1992, 25: 196-199.
- [9] SUNDARESHAN M K, BHATTACHARJEE S. Superresolution of passive millimeter wave images using a combined maximum-likelihood optimization and projection onto convex-sets approach[C]//Proc of SPIE. Orlando, FL, USA: SPIE, 2001.
- [10] SUNDARESHAN M K. Computationally efficient image restoration and superresolution algorithms for real time implementation[C]//Proc of SPIE. Orlando, FL, USA: SPIE, 2002.
- [11] 廖 臣, 祝大军, 刘盛纲. 五点差分格式求解泊松方程并行算法的研究[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(1): 81-83.
LIAO Chen, ZHU Da-jun, LIU Sheng-gang. Parallel algorithm research on solving Poisson equations based on five point difference format[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(1): 81-83.
- [12] LETTINGTON A H, YALLOP M R, DUNN D. Review of super-resolution techniques for passive millimeter wave imaging[C]//Proceedings of SPIE. Orlando, FL, USA: SPIE, 2002.
- [13] TANG Bin, WANG Xue-gang, CHEN Ke-song. Improved multistage wiener filters in nonhomogeneous clutter environments[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2008, 6(1): 75-78.
- [14] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
ZOU Mou-yan. Deconvolution and signal recovery[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001.
- [15] 苏秉华, 金伟其, 牛丽红, 等. 超分辨率图像复原及其进展[J]. 光学技术, 2001, 27(1): 6-9.
SU Bing-hua, JIN Wei-qi, NIU Li-hong, et al. Super-resolution image restoration and progress[J]. Optical Technique, 2001, 27(1): 6-9.
- [16] BRAULT J W, WHITE O R. The analysis and restoration of astronomical data via the fast Fourier transform[J]. Astronomy and Astrophysics, 1971, 13: 169-189.
- [17] LANTERI H, SOUMMER R, AIME C. Comparison between ISRA and RLA algorithms: use of a wiener filter based stopping criterion[J]. Astronomy & Astrophysics Supplement Series, 1999, 140: 235-246.

编辑 税 红