

一种恢复综合孔径微波辐射计展源图像的 CLEAN 算法^{*})

胡 飞 李 燕

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘 要 CLEAN 算法在处理对象是点源时,即使系统噪声很大,恢复点源图像的效果仍然比较理想,且思想简单、易于实现,因此在综合孔径微波辐射计点源图像的恢复中得到了广泛的应用和发展。但当处理对象是展源时,该算法恢复的辐射计图像存在着条纹现象。借鉴最大熵图像复原算法的约束思想,提出了一种改进的 CLEAN 算法。仿真结果表明,图像质量得到了进一步改善。

关键词 综合孔径辐射计, CLEAN 算法, 展源

Extension of the CLEAN Algorithm to the Imaging of Extended Sources by Means of Aperture Synthesis Radiometers

HU Fei LI Yan

(Dept. of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract When reconstructing point-source imaging of aperture synthesis radiometers, CLEAN algorithm promises the better results. And it is also easy to understand and program. But it has the strip when it is applied to extended sources processing. Inspired by the ability of Maximum Entropy Method to proceed the extended sources, an improved CLEAN algorithm was proposed. Finally the results of the simulation show that the improved image quality is improved.

Keywords Synthetic aperture radiometer, Clean algorithm, Extend sources

1 引言

综合孔径微波辐射计由于体积小、重量轻、灵敏度高等特点,被广泛应用于被动遥感和目标探测领域。由于综合孔径系统天线单元数有限,构成的基线数量也就有限,因此只能通过有限个离散采样点的观测值来反演得到亮温图像。这样图像不但引入了许多虚假成分,而且这些虚假成分淹没了许多有用信息,因此需要利用图像恢复方法来重建图像。在亮温图像重建的算法中,有 CLEAN 算法、最大熵算法、伪逆算法、双谱方法等^[1]。最大熵算法是对图像复原问题加以最大熵约束的恢复方法,可在抑制噪声和恢复细节间取得较好的平衡。CLEAN 算法由于处理点源图像的效果比较理想,且思想简单、易于编程,在综合孔径辐射计的图像恢复中得到了广泛的应用和发展。

CLEAN 算法最初是由 Hogbom 在 20 世纪 70 年代提出的,用于改进射电天文综合孔径合成图的质量^[2]。Schwarz 对 CLEAN 算法作了深入的数学理论分析和探讨,对它的研究表明, CLEAN 算法不仅仅是一种消卷积方法,而且是一个滤波过程(对应于傅里叶频率域),具有很高的信噪比^[3]。Clark 提出的 CLEAN 算法在副周期的迭代中只采用了脏束的一部分(包括主瓣和第一旁瓣)^[4]。Segloltz 等为了提高分辨率,则把迭代用的脏束由真实脏束变成了理想脏束^[5]。

当处理对象是点源时, CLEAN 算法恢复图像的效果比较理想。但在处理展源图像时存在着条纹等现象。A. Camps 等考虑了大气背景辐射的影响,提出了基于先验信息的改进算法^[6]。本文尝试通过借鉴最大熵图像复原的算法思想,修

改进代用的脏束,使图像质量进一步提高。仿真结果表明,图像质量得到了进一步改善。

2 综合孔径微波辐射成像基本原理

综合孔径辐射设计的原理是通过小孔径天线的干涉组合合成大口径天线来提高空间分辨率。综合孔径微波辐射成像系统通过有限个采样点的观测值来反演得到测量亮温图像。综合孔径阵列测量亮温 $\hat{T}(l, m)$ 与真实目标亮温 $T_B(l, m)$ 之间的关系为:

$$\hat{T}(l, m) = T_B(l, m) * F\{C(u, v)\} \quad (1)$$

其中, $C(u, v) = \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q \delta(u-p\Delta u, v-p\Delta v)$, 定义为转移函数, 它的傅氏变换为阵列因子 $AF(l, m)$, $AF(l, m) = F\{C(u, v)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(u, v) \cdot \exp[-j2\pi(ul + vm)] du dv$ 。

因此要得到真实的目标亮温, 需要一个解卷积的过程。

3 CLEAN 算法基本原理

成像系统的原理如图 1 所示。

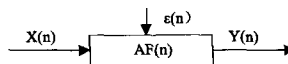


图 1 成像系统的原理

则 $Y(n) = X(n) * AF(n) + \epsilon(n)$, 其中 $X(n)$ 为真实目标亮温, $Y(n)$ 为测量亮温, $\epsilon(n)$ 为系统噪声。

系统的阵列因子 $AF(n)$, 它的形状特点是在中心有一个

^{*} 航天技术创新基金项目(20060111), 航天支撑技术基金项目(xxx 毫米波 xx 研究), 华中科技大学校科学研究基金资助(2006M023B), 国家自然科学基金面上项目(60772090)。胡 飞 博士, 副教授, 研究方向为微波技术与信号处理; 李 燕 硕士生, 研究方向为微波辐射探测。

大的主波瓣,两边有一列对称的小的旁瓣。一幅清晰的图像经过系统之后,每一个像素点上都会产生同 $AF(n)$ 形状一样的扩散,再加上系统噪声的影响,图像便退化为一幅脏图(脏图的最亮点一定是原图的最亮点)。CLEAN 算法的目的便在于去掉这些旁瓣的影响,并减小主波瓣扩散的影响,恢复出原始亮温 $X(n)$ 。

CLEAN 算法的原理是,假定待处理的图像由点源构成,依次找出当前图像的最亮点,记录下它的幅度与位置,用相应 delta 函数来代替,然后减去该点处的阵列因子(对阵列因子要乘以一个参数 γ),再继续脏图上寻找下一个最亮的点,如此重复下去,直到达到某个终止条件。

4 改进的 CLEAN 算法

由于假定待处理的图像由点源构成,当处理对象是展源时,标准 CLEAN 算法恢复的图像将存在着条纹现象^[7]。最大熵恢复是对图像复原问题加以最大熵约束的恢复方法,可在抑制噪声和恢复细节间取得较好的平衡。本文借鉴最大熵图像复原的算法思想^[8],引入平滑度函数对图像复原加以约束,通过修改迭代用的阵列因子,使得收敛后的恢复图像更加趋于平滑,从而可以更好地恢复展源。

CLEAN 算法需要满足一个条件,即观测到的可见度函数与期望可见度函数之差最小,即:

$$\min Q = \sum_{p=lq=1}^K \sum_{q=1}^N | \hat{V}_{pq} - V_{pq} |^2 \quad (2)$$

其中: $\hat{V}_{pq} = \sum_{k=ln=1}^K \sum_{l=1}^N \hat{T}_{kn} e^{j2\pi(u_p x_k + v_q y_n)}$; w_{pq} 为坐标在 (p, q) 采样点的可见度函数值的权重系数; V_{pq} 为观测到的坐期望标在 (p, q) 采样点的可见度函数值; \hat{V}_{pq} 为图像平面的期望亮度分布的傅里叶变换; \hat{T}_{kn} 为亮度分布在坐标 (p, q) 处的像素值; x, y 为图像平面的坐标轴; u, v 为 UV 平面的坐标轴。

将 Q 展开到图像平面,可得到表达式为:

$$Q = \sum_{k=ln=1}^K \sum_{l=1}^N \sum_{s=1}^T \hat{T}_{kn} \hat{T}_{sn} AF_{knst} - 2 \sum_{k=ln=1}^K \sum_{l=1}^N \hat{T}_{kn} T_{kn} + \sum_{p=lq=1}^K \sum_{q=1}^N | V_{pq} |^2 \quad (3)$$

其中, $AF_{knst} = \sum_{p=lq=1}^K \sum_{q=1}^N e^{-j2\pi(u_p(x_k - x_s) + v_q(y_n - y_l))}$

$$T_{kn} = \sum_{p=lq=1}^K \sum_{q=1}^N V_{pq} e^{-j2\pi(u_p x_k + v_q y_n)}$$

要想使 Q 最小,则对 \hat{T}_{kn} 求导,令其导数为零。求得:

$$\sum_{s=1}^T \hat{T}_{sn} AF_{knst} = T_{kn} \quad (4)$$

基于最大熵算法对图像加以约束的原理,此时引入平滑度函数:

$$S(T) = - \sum_{k=ln=1}^K \sum_{l=1}^N \hat{T}_{kn}^2 \quad (5)$$

则目标函数变为 $Q(T)$ 和 $S(T)$ 的线性组合 $J(T)$:

$$J(T) = Q(T) - \alpha S(T) \quad (6)$$

这样,不但考虑了观测到的可见度函数与期望可见度函数之间的残差,而且考虑到期望图像的平滑度。此处, α 是一个可调参数,用来控制平滑度 $S(T)$ 与残差 $Q(T)$ 之间的平衡。

对(6)式求 \hat{T}_{kn} 的导数,最小化 $J(T)$ 的图像应该满足如下方程:

$$\sum_{s=1}^T \hat{T}_{sn} AF_{knst} = T_{kn} + \alpha \hat{T}_{kn} \quad (7)$$

为了利用 CLEAN 算法,需要把式(7)化成式(4)的形式,

AF_{knst} 变为:

$$\overline{AF}_{knst} = AF_{knst} - \alpha \delta_{knst} \quad (8)$$

由于修改后的算法其阵列因子中包含了平滑约束,因此可以为处理展源带来更好的结果。

5 算法实现描述

改进的 CLEAN 算法的基本操作过程是:

(1) 得到亮温图像。

(2) 找到亮温最高点。用式(8)乘以一个参数 γ , 然后用(1)中得到的图像减去式(8), 记录这些被除去的点的位置和幅度, 用相应 delta 函数来代替。

(3) 返回步骤(2), 重复此循环相减的过程, 直到图像中的纵多突出的亮温点被除去。判断何时停止操作(2)的一般的方法是根据图像的均方差进行判断, 如果图像的均方差(差值的点)不再下降, 可以认为没有必要继续进行操作(2)。

(4) 对(2)中的一系列 delta 函数和 clean-beam response 进行卷积, 即用相应幅度的 clean-beam 函数代替 delta 函数。Clean-beam 一般取无旁瓣的高斯分布形状, 其半功率波束宽度与阵列因子 AF 相同。

(5) 将(3)中的结果与(4)中计算得到的结果相加就得到了解卷积的图像。

6 仿真实验

选定一幅灰度图像作为模拟地物场景, 通过计算机仿真综合孔径微波辐射计的采集过程(在这个过程中可对信道加入各种非理想因素), 得到可见度函数的模拟输出值, 再用这些可见度函数采样值反演测量亮温, 见图 3。图像周围的条纹是由傅里叶变换反演法的精度所造成的。为了简化仿真过程, 可将原始图像各像素的灰度值设定为 0 到 255, 直接对应模拟地物的亮温值。利用 CLEAN 算法和改进的算法恢复的图像见图 4 和图 5。由图 3 可以看出, CLEAN 算法恢复的图像周围有明显的条纹现象, 改进的算法重建的图像质量有了进一步改善。



图 2 模拟地物场景



图 3 测量亮温

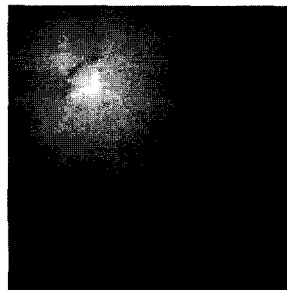


图 4 CLEAN 算法恢复图像

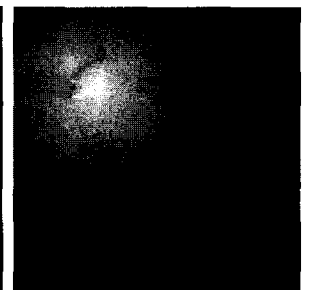


图 5 改进算法恢复图像

结束语 论文针对恢复综合孔径微波辐射计展源图像时,标准 CLEAN 算法恢复的图像存在着条纹问题,提出了借鉴最大熵图像复原的算法思想,改进 CLEAN 算法。仿真结果表明,图像周围的条纹有了一定程度的改善。

参考文献

[1] 章勇,李兴国,王华力.毫米波合成孔径成像辐射计,1997
 [2] Högborn J A. Aperture synthesis with non-regular distribution of interferometer baselines. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1974, 15:417-426
 [3] Schwarz U J. Mathematical- statistical description of the itera-

tive beam re-moving technique (method CLEAN) [J]. *Astron. Astrophys.*, 1978, 65(2):345-356
 [4] Clark B. An Efficient Implementation of the Algorithm "CLEAN". *Astronomy & Astrophysics*, 1980, 89 (3):377-378
 [5] Segalovitz A, Frieden B. A CLEAN-type Deconvolution Algorithm. *Astronomy & Astrophysics*, 1978, 70 (3):335-343
 [6] Camps A, Bara J, Torres F, et al. Extension of the Clean Technique to the Microwave Imaging of Continuous Thermal Sources by Means of Aperture Synthesis Radiometers
 [7] Cornwell T. A Method of Stabilizing the CLEAN Algorithm. *Astronomy & Astrophysics*, 1983, 121(2):281-285
 [8] 陈春涛,黄步根,高万荣,等.最大熵图像复原及其新进展,2004

(上接第 207 页)

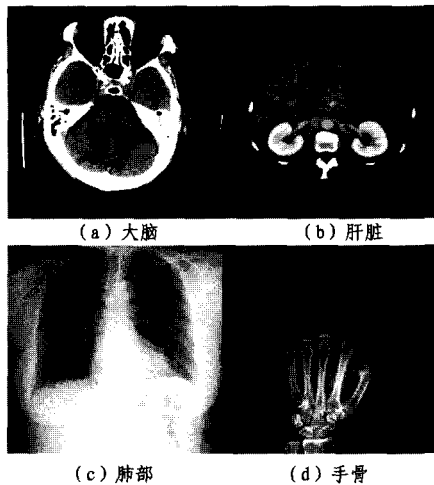


图 2 用于试验的 4 幅 8 比特位深 512×512 的医学图像

从表 2 中可以看出,ORMIR 表示一幅 8 比特位深 512×512 的数字图像需要的矩形块数量比线性四元树表示同样的图像需要使用的节点数少得多,对测试图像而言,线性四元树节点数量是 ORMIR 矩形块数量的 1.44 到 2.69 倍,表明 ORMIR 的编码效率高于线性四元树的编码效率。

表 3 给出了直接法、Delta 方法、基于 Biaxial 变换的算法以及基于 ORMIR 的几何矩生成算法的执行时间对比,实际加速因子是相应算法的执行时间相对直接法执行时间提高的倍数,由直接法的执行时间除以相应算法的执行时间获得。虽然在基于 Biaxial 变换的算法中,几何矩生成直接相关的运算次数相对直接法减少了 $3/4$ ^[17],然而由于变换本身需要大量加法,从测试数据上看,基于 Biaxial 变换的算法的实际加速因子比 2 略大。基于 ORMIR 的算法的实际加速因子最小也为 5.18,是所有算法中最快的。更重要的是,在测试图像上,基于 ORMIR 的算法最多耗时 16.38 毫秒,即基于 ORMIR 的几何矩生成算法能够以超过 50 帧/秒的速度计算 8 比特位深 512×512 的数字图像直到 3+3 阶的几何矩,是所有方法中唯一满足实时应用要求的纯软件实现的算法。

结束语 通过弱化二值图像块表示中同一矩形所覆盖的所有像素必须具有相同颜色的约束,提出了一种支持快速运算的无损多值图像表示方法,即可重叠矩形多值图像表示 (Overlapping Rectangle Multi-valued Image Representation, ORMIR)。ORMIR 采用递归方式将一幅多值图像分割为具有不同基础颜色的可重叠矩形,并使用孩子兄弟树来组织这些矩形。ORMIR 能够使用较少的矩形无损地表示一幅多值图像,取得了较高的编码效率,并使基于 ORMIR 的多值图像运算能够快速实现。基于 ORMIR,提出了一个多值图像几何矩生成算法,试验结果表明,基于 ORMIR 的几何矩生成算

法能够以每秒 50 帧以上的速度计算 8 比特位深的 512×512 的灰度图像直到 3+3 阶的几何矩,满足实时应用的需要。

参考文献

[1] Golomb S W. Run-length Encodings. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1966, IT-12:399-401
 [2] Radson D, Boyd H A. Graphical Representation of Run Length Distributions. *Quality Engineering*, 2005, 17(2):301-308
 [3] Kaneko T, Okudaira M. Encoding of Arbitrary Curves Based on the Chain Code Representation. *IEEE Transactions on Communications*, 1985, COM-33(7):697-707
 [4] Wagenknecht G. A Contour Tracing and Coding Algorithm for Generating 2D Contour Codes from 3D Classified Objects. *Pattern Recognition*, 2007, 40(4):1294-1306
 [5] Hunter G M. Operations on Images Using Quad Trees. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1979, 1(2):145-153
 [6] Samet H. Region Representation: Quadrees from Binary Arrays. *Computer Graphics and Image Processing*, 1980, 13(1):88-93
 [7] Gargantini I. An Effective Way to Represent Quadrees. *Communications of the ACM*, 1982, 25(12):905-910
 [8] Aoki M. Rectangular Region Coding for Binary Image Data Compression. *Pattern Recognition*, 1979, 11(5/6):297-312
 [9] Mohamed S A, Fahmy M M. Binary Image Compression Using Efficient Partitioning into Rectangular Regions. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, 43(5):1888-1893
 [10] Zahir S, Naqvi M. A New Rectangular Partitioning Based Lossless Binary Image Compression Scheme // *Proceedings of Conference on Electrical and Computer Engineering*. Saskatoon, Canada, 2005:281-265
 [11] Spiliotis I M, Mertzios B G. Real-time Computation of Two-Dimensional Moments on Binary Images Using Image Block Representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(11):1609-1615
 [12] Hu M-K. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(2):179-182
 [13] Hatamian M. A Real-Time Two-Dimensional Moment Generating Algorithm and Its Single Chip Implementation. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1986, ASSP-34(3):546-553
 [14] Li Bincheng. A New Computation of Geometric Moments. *Pattern Recognition*, 1993, 26(1):109-113
 [15] Yang L, Albrechtsen F. Fast and Exact Computation of Cartesian Geometric Moments Using Discrete Green's Theorem. *Pattern Recognition*, 1996, 29(7):1061-1073
 [16] Shen T W, Lun D P K, Siu W C. Fast Algorithm for 2-D Image Moments via the Radon Transform // *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1996, 3:1327-1330
 [17] Belkasim S, Kamel M. Fast Computation of 2-D Image Moments using Biaxial Transform. *Pattern Recognition*, 2001, 34(9):1867-1877
 [18] 王冰,职秦川,张仲选,等.灰度图像质心快速算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(10):1360-1365
 [19] Wu C H, Horng S J, Lee P Z. A New Computation of Shape Moments via Quadtree Decomposition. *Pattern Recognition*, 2001, 34(7):1319-1330