

CLEAN 算法在机载毫米波综合孔径成像中的应用

何云涛 江月松 钟宇

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘要: 该文将非即时 $u-v$ 覆盖的综合孔径射电天文观测中的 CLEAN 算法应用到即时 $u-v$ 覆盖的机载二维被动毫米波综合孔径成像中, 避免因空间频率覆盖的不完整而产生对图像质量的影响, 以达到消除高旁瓣对图像产生的负面影响。该文主要分析了 CLEAN 算法中具体处理时的“清洁”脉冲类型、脉冲半峰值宽度和迭代比例因子 γ 对处理后的图像的影响。研究表明: 当清洁脉冲半宽度峰值等于系统脉冲响应图的半峰值宽度时、迭代比例因子 γ 为 $1/256$ 时以及清洁脉冲类型为高斯脉冲时有利于改善图像的质量, 该结论对实际的机载被动毫米波综合孔径成像的工程研究具有重要的参考价值。

关键词: CLEAN 算法; 综合孔径; 毫米波成像; 消卷积

中图分类号: TN015, TH765.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1757-04

An Application of the CLEAN Algorithm in Airborne mm-wave Synthetic Aperture Imaging

He Yun-tao Jiang Yue-song Zhong Yu

(School of Electronic Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The CLEAN algorithm is introduced from non-instant $u-v$ coverage aperture synthesis in radio astronomy to instant situation in 2-D airborne mm-wave imaging, to remove the bad influences of the undersampled $u-v$ plane coverage to image quality so as to eliminate the negative impacts on the image caused by high side lobes. In this paper, the effects of the kind of “clean” impulse, the relevant FWHM and the scale coefficient γ to the quality of the modified image is mainly studied, and a conclusion is that: a Gauss “clean” impulse, a relevant FWHM equal to the FWHM of system response and the scale coefficient γ about $1/256$ is favorable to improve the modified image. This conclusion is valuable to the real airborne mm-wave aperture synthesis imaging project.

Key words: CLEAN algorithm; Synthetic aperture; mm-wave imaging; Deconvolution

1 引言

机载综合孔径可以使合成口径达到飞机机身大小的口径, 提供了相当高的角度分辨率毫米波成像^[1]。由于工作方式被动式, 因此它在隐蔽性和安全性上也大大优于主动式的雷达。随着毫米波技术的迅速发展, 近 20 年来毫米波被动成像开始应用在天文观测、遥感、安全检测和飞行导航等诸多领域^[2]。机载毫米波综合孔径成像系统的基本原理是通过天线阵列中各单元天线被动地接收来自目标场景的毫米波辐射信息, 并进而将这些信息按照即时 $u-v$ 覆盖综合孔径成像方法恢复出被探测场景的亮温分布图。但由于综合孔径阵列不可避免地存在对 $u-v$ 平面的采样覆盖不完全, 以及从天线接收辐射信号经放大到最终的相关处理中也会引入噪声等因素, 会使图像质量备受影响, 特别是空间采样频率 $u-v$ 平面的覆盖不完全性使得图像受到由高的旁瓣等因素造成的负面影响, 其结果是所恢复目标的场景图像可能会出现赝影,

从而导致一些非常严重的后果^[3]。

CLEAN 算法最初是由 Högbom 于 1974 年提出^[4], 用于改进综合孔径射电天文观测成图的质量, 可以消除因空间频率覆盖的不完整而产生的影响。随后 Schwarz 于 1978 年对 CLEAN 算法作了深入的数学理论分析和探讨^[5]。研究表明, CLEAN 算法不仅是一个消卷积过程, 还是一个滤波过程(对应于 Fourier 频率域中), 具有很高的信噪比。1990 年, Gorham 等首次将 CLEAN 算法用于斑点干涉术, 得到了天文双星目标的高信噪比自相关图^[6]。近年来该算法继续得到广泛的应用, 例如在使用比特编码波形作为雷达脉冲压缩信号的多目标探测中, CLEAN 算法被用来减轻旁瓣的影响以改善比特编码信号对目标的探测性能^[7]; 此外, CLEAN 算法还被应用在使用地震波探测诸如地雷的地下目标位置的成像算法中^[8]。2000 年, 德国航天中心的研究人员发表了一篇将 CLEAN 算法用于星载微波综合孔径 MIRAS 系统的文章^[1], 初步说明了 CLEAN 方法的实用可行性。这里, 我们将其用于即时 $u-v$ 覆盖机载毫米波综合孔径成像系统中, 用以消除由于对 $u-v$ 平面的采样覆盖不完全性对图像造成的负面影响,

详细地分析了CLEAN算法中的“清洁”的脉冲类型、其半峰宽度和迭代比例因子 γ 对处理后的图像的影响。

2 CLEAN 算法基本原理

CLEAN 算法的基本思想是：一幅观测结果图(即需要处理的“脏”图 D)是亮度分布 T_0 与观测设备的响应(即“脏”光束 B)的卷积。若“脏”光束具有人们不想需要的第二响应,如因空间频率成份缺少而引起的旁瓣、羽状结构等,运用 CLEAN 算法可以消除这些第二响应的影响。其基本过程是:

(1)用“脏”光束 B 对“脏”图 D 进行消卷积,消卷积后“脏”图 D 被分解为一组峰值各异的 δ 函数分布图 T ,若用 T 与“脏”光束 B 进行卷积可重新得到原来的“脏”图;

(2)将 δ 函数分布图与理想的“清洁”光束 S ,即不存在第二响应的光束,进行卷积就得到了“清洁”图 C ;最后定义“真实清洁”图为 C_0 ,它由“真实”的亮度分布 T_0 与“清洁”光束 S 卷积得到。

具体概括为^[5]:

$$\text{“脏”图 } D = T_0 * B, \quad \delta \text{ 脉冲分布图 } T = B^{*(-1)} D$$

$$\text{“清洁”图 } C = T * S, \quad \text{“真实清洁”图 } C_0 = T_0 * S \quad (1)$$

亮度分布 T_0 正是我们想得到的,通过成像系统后我们期望能得到它的像——“真实清洁”图 C_0 。但实际上无法得到 C_0 ,而通常把“清洁”图 C 作为对 C_0 的一个估计,即为 T_0 的复原结果。CLEAN 算法关键的一步是通过消卷积得到 δ 脉冲分布图 T 。

3 CLEAN 算法在即时 u-v 覆盖毫米波综合孔径成像中的应用

机载毫米波综合孔径成像不同于天文观测中的成像,它通过天线阵列实时地将亮温分布 $T(\xi, \eta)$ 的视场在某一频段的辐射信号接收后,经过相关器进行两两相关得到了对视场亮温度的空间频域采样,即可视度函数 $V(u, v)$,然后再经过逆傅里叶变换(IFT)就得到了视场的亮温度分布。对 $T(\xi, \eta)$ 的反演成像为 $\hat{T}(\xi, \eta)$,设亮温度的脉冲分布图 $\delta(\xi, \eta)$,系统的点源成像为 $B(\xi, \eta)$ (即脏脉冲),则:

$$\hat{T}(\xi, \eta) = \delta(\xi, \eta) * B(\xi, \eta) \quad (2)$$

在理想的毫米波综合孔径成像系统中,由于天线最大基线 (u_{\max}, v_{\max}) 有限,则位于 (ξ_0, η_0) 的点源的像解析式为^[9,10]:

$$B(\xi, \eta) = \text{Sinc}(2\pi u_{\max}(\xi - \xi_0)) \times \text{Sinc}(2\pi v_{\max}(\eta - \eta_0)) \quad (3)$$

但由于在对 $V(u, v)$ 的采样中存在着空间频率成份的缺失, $B(\xi, \eta)$ 无法用一般的解析式表达出来,而只能根据具体的系统以数值的方式表示,故反演所得到的 $\hat{T}(\xi, \eta)$ 的质量将更差。此外,由于从天线接收辐射信号经放大到最终的相关处理中也会引入噪声,因此点源的成像结果将比式(3)更差。现设与 $B(\xi, \eta)$ 峰值和脉宽相同的高斯脉冲 $B_0(\xi, \eta)$,则运用 CLEAN 算法之后变为:

$$\hat{T}'(\xi, \eta) = \delta(\xi, \eta) * B_0(\xi, \eta) \quad (4)$$

本文在仿真试验中,运用系统分别对一幅图和一个点源成像,得到脏图 $\hat{T}(\xi, \eta)$ 和脏脉冲 $B(\xi, \eta)$;对 $\hat{T}(\xi, \eta)$ 运用 $B(\xi, \eta)$ 进行消卷积得到亮温度的脉冲分布图 $\delta(\xi, \eta)$,为了得到较好的图像质量,运用与 $B(\xi, \eta)$ 峰值和脉宽相同的高斯脉冲 $B_0(\xi, \eta)$ 和 $\delta(\xi, \eta)$ 进行卷积,即得到处理后的亮温分布 $\hat{T}'(\xi, \eta)$ 。具体步骤设计如下:

(1)对一幅设计的视场成像,得到一幅需要处理的“脏”图 $\hat{T}(\xi, \eta) = \delta(\xi, \eta) * B(\xi, \eta)$;

(2)将 $\hat{T}(\xi, \eta)$ 的值进行归一化,并选择一个循环步长比例因子 γ ,则 $\hat{T}(\xi, \eta) = \hat{T}(\xi, \eta) / \gamma$;

(3)在“脏”图 $\hat{T}(\xi, \eta)$ 的值中找到最大值位置,记作 (i, j) ;

(4)生成峰值在 (i, j) 点的“脏”脉冲 $B_{ij}(\xi, \eta)$,并将其值进行归一化;

(5)计算 $\hat{T}(\xi, \eta) = \hat{T}(\xi, \eta) - B_{ij}(\xi, \eta)$;

(6)记录 $\delta(\xi, \eta)$ 函数分布 T 中 $\delta(\xi_i, \eta_j) = \delta(\xi_i, \eta_j) + 1$;

(7)重复步骤(3)~步骤(6)直到剩下的部分的最大值比预先定义的噪声电平小,或者达到某个特定的迭代数字,这是一个消卷积的过程,最终得到 $\delta(\xi, \eta)$ 分布;

(8) $\hat{T}'(\xi, \eta) = \delta(\xi, \eta) * B_0(\xi, \eta)$,即得到一个经过 CLEAN 处理的图像。

上面的计算过程中比较费时的是步骤(3)~步骤(6),因为如果 γ 的选择比较小,而且图像也比较复杂的话,则循环次数将增大,导致计算时间太长以至在实际中无法应用。在具体的应用中, γ 的选择是和所需要的图像的灰度级相关的,经过上述 CLEAN 处理的图像的灰度级为 $[1/\gamma]^*$ 。一种解决方法是在步骤(3)中的 $\hat{T}(\xi, \eta)$ 中的最大值远大于 1 时,可以在步骤(5)中将 B_i 变成 $N \times B_i$ (N 小于最大值),这样可以极大地减少计算时间;另一种可以解决这个问题的方法是在每次循环中并入更多的点,并且在一次循环中处理这些点,这不仅降低了循环的次数,而且这些区域变得更加平滑和更加一致。

4 计算机仿真与成像结果分析

本文结合某预研课题,首先对机载情况下“T”型天线阵列,运用模拟退火算法对 25 根天线进行优化排列^[11,12],得到的各子天线位置坐标如表 1 所示。其次运用综合孔径成像原理对此优化的阵列进行仿真成像。这里假设被探测的目标是视场为 30×30 像素的具有冷背景的数字“A”的场景,天线响应的中心频率为 $f_0 = 37\text{GHz}$,各子天线具有相同的方向图和理想的滤波特性,场景中不同位置的辐射信号是完全不相关的,且系统对各方向的辐射信号皆是无损耗的接收。成像仿真算法中所有情况均为理想情况,条纹洗涤项 $\tilde{r}_{12}(\tau) = 1$,得到的“脏”图如图 1 所示。其中图 1(a)是对场景的成像结果,图 1(b)是对位于视场坐标原点的一个强辐射源成像得到的视场归一化亮温分布图。从图 1(b)中可以看

*[]表示对该数取其整数部分

到, 图中出现峰值很高的旁瓣, 这也正是因为对u-v平面的不完整采样造成, 对应在图1(a)中出现了许多本不该存在的目标图像“*A*”。然后运用前面所述的CLEAN原理, 对“脏”图进行CLEAN处理。

表1 “T”型阵列上25根天线坐标位置

坐标轴	坐标位置(cm)											
<i>x</i>	-25	-19	-16	-12	-9	-8	-3	-1	2			
		3	10	9	14	20	17	-5	0			
			1	-5	2	-1	-2	2	1	1		
<i>y</i>	0	4	8	5	9	6	-1	7	7	4	5	8
			2	7	6	-15	0	-3	-8	-7		
				-7	-18	-20	-17	10				

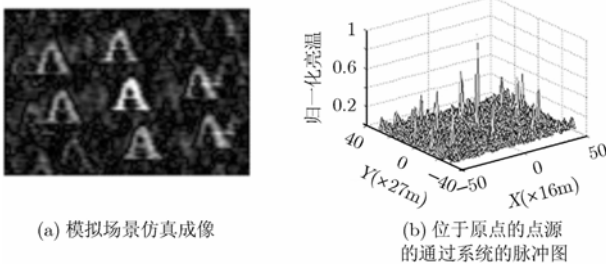


图1 对模拟场景和点源成像

4.1 半峰值宽度(FWHM)的大小对 CLEAN 处理后图像的影响

在计算中, 可以得到脏脉冲, 即系统响应脉冲图中半峰值宽度分别为 $\Delta x = 0.6776$, $\Delta y = 1.2251$ 。为了分析“清洁”波束 S 的半峰值宽度的大小(分别记为 $\alpha\Delta x$, $\alpha\Delta y$)对最终 CLEAN 处理后图像的影响, 这里分别取 $\alpha = 0.5, 1, 1.5, 2$ 。从图2中可以看到当 $\alpha = 0.5$ (如图2(a)) 时图像有许多信息丢失, 字母“*A*”也基本无法识别。在 α 由 0.5 增加到 2 的过程中, 图像则经历了由模糊-清晰-模糊的一个过程(如图2(a)-2(d)所示)。这主要是因为随着脉宽的增大, 在 α 还比较小时, 步骤(8)中通过卷积使得图像的局部信息都被填充上了, 图像变得清楚, 但 α 过大却又造成重叠使图像模糊。采样和系统响应的脉宽相同的高斯脉冲($\alpha = 1.0$) 才能最好的重现原图。

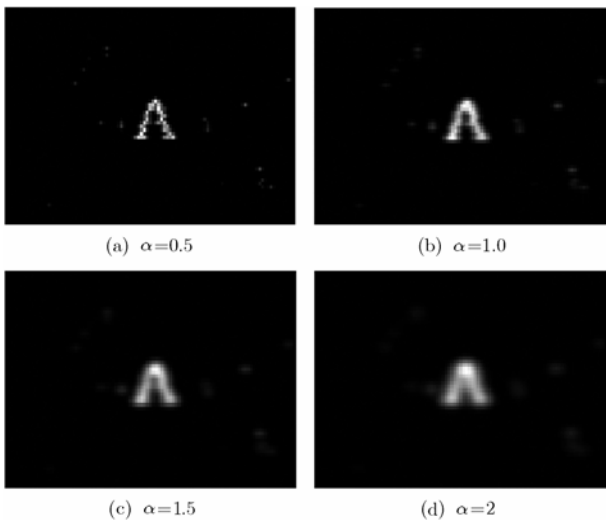


图2 不同alpha值对成像结果影响

4.2 迭代比例 γ 对 CLEAN 处理后图像的影响

在利用 CLEAN 算法对一幅“脏”图进行处理时, 迭代比例 γ 会对图像的质量产生一定的影响。 γ 值反映了图像的灰度级, 根据第3节的内容, 选择越小的 γ 值, 则得到处理后的图像亮温度分辨率越高, 也即图像越清晰。但 γ 值越小, 计算的工作量就会相应增大, 这样又会因计算时间太长而失去实际应用价值; 此外, 系统的温度分辨率是无法通过 CLEAN 算法提高的, 它是由系统的性能决定的; 而且在应用中, 图像的灰度级一般是 256 ($\gamma = 1/256$) 就已经足够了。对此进行的仿真计算结果如图3所示:

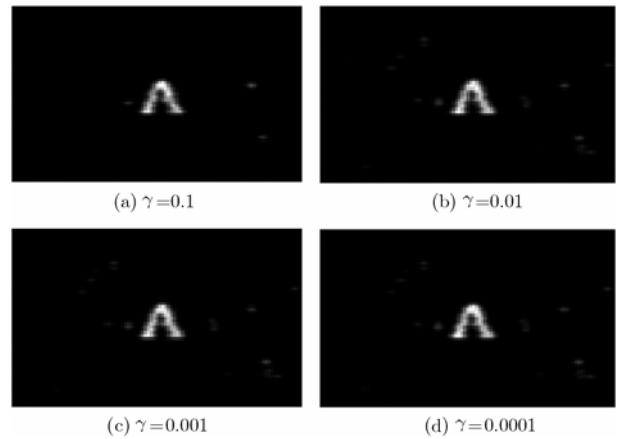


图3 利用不同迭代比例 γ 计算后的图像

应用图像的逼真度来对此评价, 运用峰值信噪比 PSNR 来度量:

$$PSNR = 10 \lg \frac{A^2}{\frac{1}{MN} \sum_0^M \sum_0^N [f(i, j) - f'(i, j)]^2} \quad (5)$$

式(5)中 A 为图像中灰度最大值, $M \times N$ 分布为图像的像素 $f(x, y)$ 是理想的地面的灰度值分布, $f(x', y')$ 是 CLEAN 处理后得到灰度值分布。计算图3中的4种情况, 得到从 $\gamma = 0.01$ 开始在 PSNR 值基本不再改善, 即图像质量没有变化, 这与前面的分析也是一致的。

4.3 “清洁”脉冲类型对 CLEAN 处理后图像的影响

上述 CLEAN 算法对图像处理中所使用的“清洁”脉冲都是高斯脉冲(如图4(b)所示), 但从第3节分析, 理想的综合孔径成像系统的“清洁”脉冲应该为 Sinc 函数脉冲, 而非高斯脉冲。本节就这个问题分别运用这两种“清洁”脉冲对待处理的“脏”图进行 CLEAN 处理, 得到结果如图5所示。从图中可以看到, 实际的成像效果并非是运用 Sinc 函数脉冲的效果更佳, 反而在其图像的附近出现了许多噪声。这主要是因为由于最大基线的有限, 得到系统的冲激响应为 Sinc 函数脉冲。而 Sinc 脉冲存在许多旁瓣, 这些会使图像中存在一些负面的影响, 在卷积后会形成图像的噪声。因此, 在实际 CLEAN 的应用中, 使用高斯脉冲作为“清洁”脉冲更利于改善图像质量。

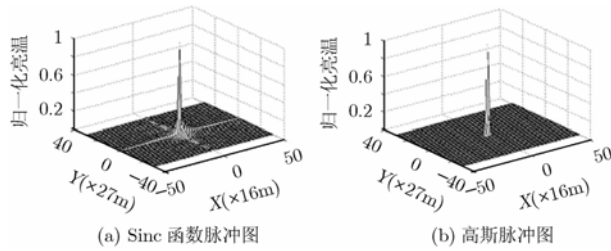


图 4 不同类型脉冲图

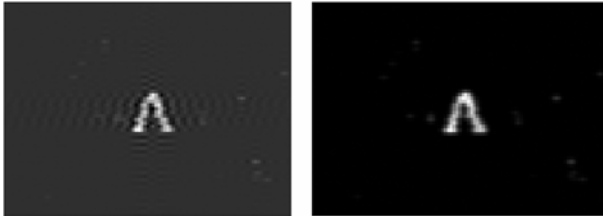


图 5 利用不同类型脉冲成像图

5 结束语

本文将非即时 $u-v$ 覆盖的综合孔径射电天文观测中的 CLEAN 算法应用到即时 $u-v$ 覆盖的机载二维被动毫米波综合孔径成像的后处理中, 在分析了 CLEAN 算法基本原理的基础上, 应用模拟退火法对实际机载“T”形天线阵列进行了优化排列, 并以此优化阵列为例进行了综合孔径成像仿真, 继而运用 CLEAN 算法对原始成像“脏”图进行了处理, 得到了相对清晰的图像。文中特别分析了 CLEAN 算法中“清洁”脉冲的半峰值宽度(FWHM), 迭代比例 γ 和“清洁”脉冲的类型对 CLEAN 算法处理后的图像的质量的影响, 得到了“当清洁脉冲半宽度峰值等于系统脉冲相应图的半峰值宽度时、迭代比例因子 γ 为 $1/256$ 时以及清洁脉冲类型为高斯脉冲时有利于改善图像的质量”的结论, 该结论对实际的机载被动毫米波综合孔径成像的工程研究具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] Peichl M, Greiner M, and Suess H. DLR activities on aperture synthesis radiometry. IEEE IGARSS, Hawaii, US, July 2000, 7: 2981–2983.
- [2] Harvey A R and Appleby R. Prospects for mm-wave aperture synthesis from space-borne and aerial platforms. *Proc. SPIE*, 2000, 4091: 27–38.
- [3] Tsao J and Steinberg B D. Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging: The CLEAN technique. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1988, 36(4): 543–556.
- [4] Hogbom J A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines. *Astron. Astrophys*, 1974, 15 (2): 417–426.
- [5] Schwarz U J. Mathematical - statistical description of the iterative beam removing technique (method CLEAN). *Astron. Astrophys*, 1978, 65(2): 345–356.
- [6] Chick K M and Warman K. Using the CLEAN algorithm to restore undersampled synthetic aperture sonar images. MTS/IEEE Conference and Exhibition, 2001, 1(5-8): 170–178.
- [7] Hai D. Effective CLEAN algorithms for performance-enhanced detection of binary coding radar signals. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(1): 72–78.
- [8] Alam M and McClellan J H. Near field imaging of subsurface targets using wide-band multi-static RELAX/CLEAN algorithm. IEEE ICASSP, Philadelphia, US, 2005, IV: 1097–1100.
- [9] Ruf C S, Swift C T, and Tanner A B, *et al.* Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth. *IEEE Trans. on GRS*, 1988, 26(5): 597–611.
- [10] Peichl M, Suess H, and Suess M. Microwave imaging of the brightness temperature distribution of extended areas in the near and far field using two-dimensional aperture synthesis with high spatial resolution. *Radio Science*, 1998, 33(3): 781–801.
- [11] 陈海亭, 江月松, 钟宇. 二维圆周光综合孔径阵的优化排列及其成像特性研究. *光学学报*, 2005, 25(12): 1616–1623.
Chen Hai-ting, Jiang Yue-song, and Zhong Yu. Study of optimization and imaging characteristics of two-dimensional circle array for optical synthetic aperture system. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(12): 1616–1623.
- [12] Cornwell T J. A novel principle for optimization of the instantaneous Fourier plane coverage of correlation arrays. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1988, 36(8): 1165–1167.

何云涛: 男, 1982年生, 硕士生, 目前研究方向为毫米波及太赫兹综合孔径成像。

江月松: 男, 1959年生, 教授, 博士生导师, 主要从事成像信息科学与技术、激光空间信息技术、红外光电信息获取与处理技术等方向的研究。

钟宇: 女, 1980年生, 硕士生, 目前研究方向为光学综合孔径成像。