

基于加窗反投影的干涉式微波辐射计成像算法

张成^{①②} 吴季^①

^①(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文针对旋转扫描干涉式成像系统非均匀采样网格结构, 提出了一种加窗反投影算法, 通过采样数据进行一维加窗傅里叶变换处理, 再反投影到原图像空间来进行图像重建, 将二维傅里叶变换转化为一维傅里叶变换和投影变换, 避免了空间频域的插值处理。此方法可以对每一个方位的采样数据进行独立处理, 实现边采样边处理的成像方式, 因此具有很高的成像精度和效率。在此基础上对天线阵采样策略进行分析, 得出了角度采样与天线阵基线数之间的平衡关系, 为实际应用提供了依据。数值模拟表明了窗函数对噪声抑制和分辨率的影响, 通过与其它方法进行比较, 进一步验证了此算法的优越性。

关键词: 综合孔径; 干涉被动微波成像; 投影变换; 加窗反投影

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1064-04

The Windowed Back Projection Imaging Method for Interferometric Radiometer

Zhang Cheng^{①②} Wu Ji^①

^①(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: This paper investigates the imaging theory of the Rotate Scanning Synthetic Aperture Interferometric Radiometer (RS-SAIR) which has a non-Cartesian sampling scheme, and proposes a new imaging algorithm based on windowing back projection. The critical feature of this algorithm is that it takes back projection as the main imaging tool instead of 2-D Cartesian grid Fourier transform, and it involves only 1-D tapered FFT and back projection, which avoids the interpolations from polar sampling grids to Cartesian grids, and could perform imaging and sampling simultaneously, then it leads to a more accurate and fast imaging performance. Being a critical step the windowing effect is analyzed, and different window function is test to show the spatial resolution and noise control of the reconstructed image. Further more, the sampling is analyzed and a rational strategy is achieved. Finally, the imaging of a 2-D scene with a RS-SAIR system is simulated. The comparison of the parameters in the mean square errors and cross correlation coefficient with various methods indicates that the proposed new algorithm is superior to other Cartesian FFT based methods.

Key words: Synthetic aperture; Interferometric passive microwave imaging; Projection transform; Windowed back projection

1 引言

干涉式微波辐射计成像技术于上世纪 80 年代末开始从射电天文领域引入到被动遥感领域^[1], 从美国航空宇航局(NASA)研制的第一代一维成像系统 ESTAR^[2], 到近来欧空局(ESA)研制的用于 SMOS 计划的 MIRAS 二维成像系统^[3], 被动微波辐射干涉成像技术已经逐渐成熟, 并开始走向实际应用阶段。我国也在 863 计划的支持下研制成功了 C 波段和 X 波段一维成像系统^[4-6], 并开始进行二维成像系统的研制。天线阵的分布结构对成像系统的影响至关重要, 目前出现的

排列方案有: “U, +, T, X, Y, Δ ” 等^[4]。然而这些天线阵都不可避免地存在大量冗余, 这给硬件系统的加工制造和定标带来了很大难度。为进一步降低系统的复杂度, 研究人员提出了旋转扫描方式的分时采样成像系统^[5], 我国的太阳极轨射电望远镜计划(SPORT)就准备采用此方式的成像系统^[6, 7]。

旋转扫描成像面临的最大问题是缺少快速有效的成像算法。由于其采样点是位于极坐标平面上的一系列同心圆上, 因此无法采用传统的 FFT 运算来直接进行快速成像。而 ESTAR 系统采用的 Moor-Penluose 广义逆方法^[2]对于二维成像来说计算量过大, 而且硬件定标过于复杂; 射电天文领域中广泛应用的 CLEAN 算法主要是针对独立点源(例如

星体)成像^[8], 不适合用于扩展目标的成像。因此一种自然的方法是将采样数据插值到矩形网格点上, 然后再利用 IFFT 来进行反演成像。然而由于空间频域数据的特殊性, 传统的二维插值算法引入的误差较大, 尤其是距离采样中心较远的采样点非常稀疏, 插值引入的误差更加明显, 因此会造成图像出现剧烈的振铃现象, 文献[9]中注意到了这种现象, 同时在本文中也可以看到同样的结果。因此研究有效的适合于在频域应用的插值算法以及特殊网格结构的傅里叶变换是直接傅里叶变换法的有效途径, 目前已经取得了一些进展^[9, 10]。

本文针对旋转扫描的圆周极网格采样结构, 从另一种角度来考虑反演成像, 借鉴 CT 成像理论的研究成果, 提出了一种基于滤波反投影的成像算法, 此方法为圆周扫描干涉成像系统的实际应用开辟了一条新的途径。

2 干涉成像基本原理

干涉式成像辐射计天线的基本结构由二元干涉仪组成, 通过两个天线单元进行相乘干涉来测量入射电磁波的角度和幅度信息。对于远场入射的电磁波, 其波程差信息仅依赖于干涉仪的基线和电磁波入射角度, 并且可以通过干涉测量的相位信息反映出来。干涉仪的相关输出结果被称之为可见度函数的一个采样^[11]:

$$V_{kl}(u_{kl}, v_{kl}) = \frac{1}{\sqrt{\Omega_k \Omega_l}} \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq 1} \frac{T_B(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} \cdot F_{nk}(\xi, \eta) F_{nl}^*(\xi, \eta) \cdot r_{kl} \left(-\frac{u_{kl}\xi + v_{kl}\eta}{f_0} \right) e^{-j2\pi(u_{kl}\xi + v_{kl}\eta)} d\xi d\eta \quad (1)$$

式中 $\Omega_{k,l}$ 为天线波瓣立体角, $(u_{kl}, v_{kl}) = (x_k - x_l, y_k - y_l) / \lambda$ 为两天线单元的有效距离, $(\xi, \eta) = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi)$ 为观测角度的方向余弦, $T_B(\xi, \eta)$ 为场景辐射亮温, F_n 为天线归一化场强方向图, r_{kl} 为相关接收机的去相关函数。当系统带宽非常窄时, $r_{kl} \approx 1$ 。因此, 在理想情况下, 可见度采样函数与亮温分布可由傅里叶变换联系起来:

$$V(u, v) \leftrightarrow \tilde{T}(\xi, \eta) \equiv \frac{T_B(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} |F_n(\xi, \eta)|^2 \quad (2)$$

可见干涉仪实现的是对空间频域的采样, 因此对干涉测量结果进行逆傅里叶变换便可得到场景的亮温分布。

3 滤波反投影成像算法

成像算法的本质是对式(1)进行求逆运算从而得到亮温图像。本文借鉴 CT 理论中的研究成果, 从投影变换的角度出发来分析圆周极网格采样数据。对于二维平面中的任意函数 $f(x, y)$, 其投影变换(也称为 Radon 变换)定义为^[12]

$$p(s, \theta) = \Re f(x, y) \equiv \int_{L(r, \theta)} f(x, y) dl \quad (3)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - r) dx dy$$

式中 δ 为迪拉克(Dirac)函数。投影变换的几何意义为: 函数 $f(x, y)$ 沿直线 $x \cos \theta + y \sin \theta = s$ 进行线积分, 积分结果即为函数 $f(x, y)$ 在该射线上的投影值 $p(s, \theta)$ 。可见 (s, θ) 为积分直线

的法方程参数。 $p(s, \theta)$ 表示图像函数在距圆点距离为 s 法线倾角为 θ 的直线上的积分值。因此投影函数是由一系列线积分组成。不失一般性, 同时也对应于干涉辐射成像的实际情况, 可以将函数 f 的定义域限制在单位圆内: $x^2 + y^2 \leq 1$ 。图 1 中画出了函数 $f(x, y)$ 在 θ 角的平行投影函数 $p(s, \theta)$ 。

图像函数的投影变换与其傅里叶变换有着紧密的联系, 图像的投影数据与其频谱可以直接互相转换, 这种转换关系可以由中心切片定理来描述:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_\theta(s) \cdot e^{-j2\pi s w} ds = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot e^{-j2\pi w(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \quad (4)$$

式中左边为投影函数 p 关于变量 s 的一维傅里叶变换, 右边为图像函数 f 的二维极坐标傅里叶变换的极坐标形式, 即在空间频域点 $(u = w \cos \theta, v = w \sin \theta)$ 上的傅里叶变换。因此中心切片定理可以简化表示为

$$P_\theta(w) = F(w, \theta) = F(w \cos \theta, w \sin \theta) \quad (5)$$

上式就是中心切片定理的核心内容, 也是本文成像算法的关键。因为图像函数的二维极坐标傅里叶变换对应于投影数据的一维傅里叶变换, 而当干涉成像仪的天线系统采用直线阵结构进行旋转扫描采样时, 其所得到的空间频域采样点分布正好是圆周极网格结构, 每个角度的天线阵采样点都均匀分布在一条直线上, 正好可以对应于此角度下的图像函数的平行投影, 如图 1 所示。因此成像反演时可以考虑直接将空间频域采样转换成图像函数的投影数据, 然后再利用投影变换的求逆方法进行图像重建, 这样就避免了在空间频域进行插值, 从而提高了重建图像的精度。

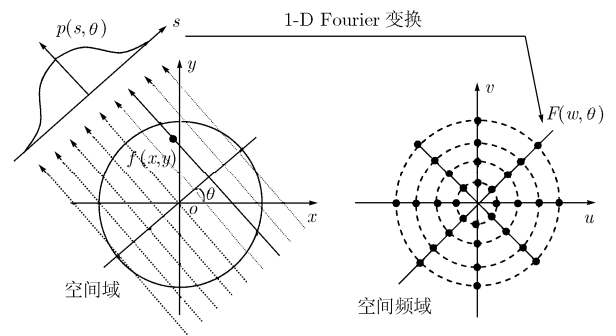


图 1 平行投影以及中心切片定理示意图

下一步需要求解投影变换的逆变换, 即对式(3)进行求逆。很早 Radon 便导出了逆投影变换公式^[12]:

$$f(x, y) = f(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{r \cos(\varphi - \theta) - s} \cdot \frac{\partial p(s, \theta)}{\partial s} ds d\theta \quad (6)$$

然而上式并不适合实际应用, 主要是由于含有微分算子, 不但便于实际操作, 而且具有很强的噪音放大作用。因此实践中都不采用逆投影变换公式。根据极坐标下的逆傅里叶变换公式以及采样数据的共轭对称性有:

$$f(x, y) = \int_0^\pi d\theta \int_{-\infty}^{\infty} |w| \cdot F(w, \theta) \cdot e^{2\pi jw(x \cos \theta + y \sin \theta)} dw \quad (7)$$

根据中心切片定理, 将式(5)带入上式后, 并令 $s = x \cos \theta + y \sin \theta$, 可得:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_0^\pi \left[\int_{-\infty}^{\infty} |w| \cdot P_\theta(w) \cdot e^{2\pi jws} dw \right] d\theta \\ &= \int_0^\pi Q_\theta(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$Q_\theta(s) = \int_{-\infty}^{\infty} |w| \cdot P_\theta(w) \cdot e^{2\pi jws} dw \quad (9)$$

式(9)相当于将空间频域函数 P 与响应函数为 $H(w) = |w|$ 的窗函数进行加权后做逆傅里叶变换, 其描述的反投影运算可以看作是一个将滤波后的投影数据沿原方向“涂抹”到像平面中的过程, 是对各个角度采样数据处理的一种累加积分过程, 而各角度的滤波投影数据可以相互独立地进行“涂抹”运算。注意, 在反投影计算时需要在空间域进行插值来求得像素位置的函数值, 一般线性插值便可取得很好的效果。

根据上述论述, 对于旋转扫描干涉成像情况, 需要对天线阵在每个角度的空间频域采样数据进行加窗求逆傅里叶变换, 然后再做反投影来得到原始图像的重建图像。加窗反投影重建算法的基本过程如图2所示。需要注意的是, 窗函数 $H(w) = |w|$ 不可避免地会造成空间域信号出现吉布斯(Gibb's)震荡现象, 在重建图像中表现出一定的波纹效应。因此需要用特定的窗函数进行处理, 其目的在于控制采样数据中的噪声, 提高重建图像的清晰度和平滑感。

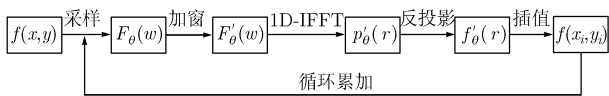


图2 加窗反投影成像算法流程框图

4 系统采样分析

空间频域的采样间隔对重建图像的质量影响很大, 为了提高重建精度, 应当尽可能地增加天线基线数目和缩小角度采样间隔, 但这样会增加实际的成本和成像时间, 必须要进行合理的权衡。下面来讨论一下天线的基线大小以及旋转角度的取样问题。根据式(1)可知, 以方向余弦为自变量的亮温分布函数限制在半径为1的单位圆区域内, 即图像函数定义域为 $x^2 + y^2 \leq 1$ 。为了保证重建图像不出现混叠, 空间频谱函数 $F(w, \theta)$ 在射线 w 方向上的采样间距必须满足 $\Delta w \leq 1/\Delta r = 1/2$, 根据式(1)的定义, 最小天线基线应满足: $\Delta l \leq \lambda \cdot \Delta w = \lambda/2$, 这样其逆傅里叶变换后得到的投影数据才能够充满整个图像区域。如果图像函数的最高频率为 f_{\max} , 则非零基线数目应当满足: $N \geq f_{\max}/\Delta w = 2f_{\max}$ 。然而由于目标函数是空间有限的, 一个空间有限的函数不可能是有限带宽函数, 所以不可能实现频域的完全采样, 这也不可避免地导致了图像的模糊以及分辨率的降低。

对于角度取样情况, 要完全重建原始图像理论上需要角度采样间隔无限小, 即采样数目无限大。然而实际情况仍然可以确定一个有限的角度采样间隔使其能够得到比较好的图像质量。角度采样间隔取决于目标函数的空间半径 R 以及全向带宽 B 。根据前文分析可知 B 取决于天线的采样宽度且 $R=1$, 即 $B=N \times \Delta w = N/(2R) = N/2$, 则空间频域内的采样范围限制在以 B 为半径的区域内, 且其最外层角度方向上采样间隔为 $\Delta u \approx B \times \Delta \theta$, 而通常要求 $\Delta u = \Delta w$, 因此得:

$$\Delta \theta = \Delta u/B = \Delta w/B = 1/N \quad (10)$$

同时由于空间频谱函数 $F(w, \theta)$ 在 θ 方向上是以 2π 为周期的, 根据周期采样定理^[13], 若 $F(w, \theta)$ 关于 θ 的最高频率为 $f_{\max} = K/(2\pi)$, K 为正整数, 则函数 F 能够从关于 θ 的至少 $2K+1$ 个取样值中精确恢复, 因此有

$$\Delta \theta = 2\pi/(2K+1) \approx \pi/K \quad (11)$$

比较式(10)和式(11)可得:

$$K \approx 2\pi RB = \pi N \quad (12)$$

式(12)为角度采样数目的近似公式, 它确定了半周内角度采样数目与天线阵非零基线数的近似关系。

5 数值模拟分析

成像模拟时采用“Shepp-Logan”头型图作为目标图像, 它是由一系列不同灰度值的椭圆组成, 其空间频谱可以由解析公式精确计算得到, 这样就可以准确地模拟采样数据。为了与将来测量实验做准备, 模拟时采用均匀分布的28基线结构天线阵。最短基线取为 $\Delta u = 0.5\lambda$, 对应空间频域射线采样间隔为 $\Delta w = \pi$ 。根据式(12)对应的角度采样间隔为 $\Delta \theta = 2^\circ$ 。成像模拟时采用了两种常见的窗函数进行试验比较: 凯塞窗和汉明窗^[14]:

$$W_{\text{Kaiser}}(k) = I_0 \left(\alpha \sqrt{1 - [(2k - n - 1)/(n - 1)]^2} \right) / I_0(\alpha), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$W_{\text{Ham}}(k) = 0.54 - 0.46 \cos[2\pi(k - 1)/(n - 1)], \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式(13)中 I_0 为零阶贝塞尔函数, α 为副瓣电平的控制因子, 选择为 $\alpha = 2.5$ 。

上述两种窗函数分别具有不同的半功率波瓣宽度以及副瓣电平, 分别对应着重建图像的空间分辨率和噪声抑制。此外, 为了进行对比同时采用基于矩形网格FFT和线性插值的均匀网格化算法进行成像, 模拟结果分别如图3所示。

为了进一步衡量重建图像的质量, 采用两种客观的图像评价准则: 图像的归一化均方差和互相关系数。均方差体现了重建图像与原始图像之间的绝对偏差, 而相关系数体现了两者之间的相似程度。重建图像的评价结果如表1所示。从图3和表1中可以看出加窗反投影方法具有很好的成像质量, 在均方差和互相关系数两个方面都要明显优于均匀网格化算法。同时从图3(b)和图3(c)中可以看到, 采用不同的窗函数会得到不同的成像效果, 采用凯塞窗的分辨率要高于

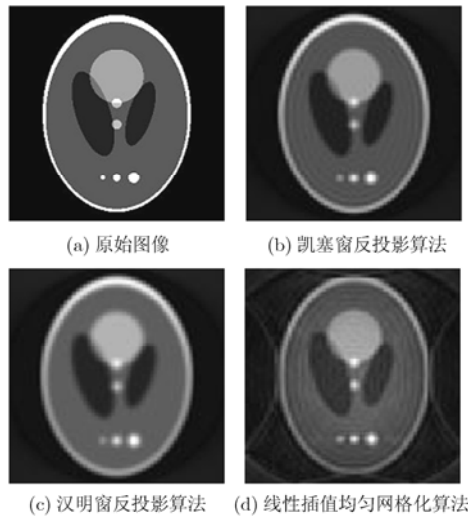


图3 成像模拟结果

表1 算法性能比较

成像方法	归一化均方误差	相关系数
凯塞窗反投影算法	0.1334	0.9074
汉明窗反投影算法	0.1546	0.8844
线性插值均匀 网格化算法	0.2129	0.8603

采用汉明窗,但抑制噪声方面却比汉明窗差,因此要根据实际境况选用合适的窗函数。窗函数的选择为加窗反投影算法提供了可调节性和灵活性,进一步拓展了成像算法的应用范围。

6 结束语

从理论分析和仿真结果两方面都表明了加窗反投影成像算法非常适合于干涉式旋转扫描成像辐射计的独特圆周采样方式,此方法相比均匀网格化插值傅里叶变换法有3个突出的优点:(1)图像重建程序可以与实地测量同步进行,实现边采样边处理的成像方式,提高了成像效率,同时又降低了对数据存储的要求。(2)不需要在空间频域进行插值,提高了成像精度。(3)可以有效地结合窗函数来对成像算法进行调节,并根据实际情况在分辨率和平滑性之间进行平衡折衷,因此具有很好的灵活性以及很宽的适用范围。

在此成像算法的基础上对旋转采样策略进行分析,得出结论:在天线阵基线数目确定的情况下,合理的圆周采样数目与天线阵基线数目有一定关系,即如式(12)所示 $K \approx \pi N$, 这为圆周采样策略提供了一个参考基准,过低于此基准会造成图像质量明显降低,而过高于此基准不但图像质量没有明显改观,而且增加系统的性能要求,提高成本。

参考文献

[1] Ruf C S, Swift C T, Tanner A B, and Le Vine D M. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for

the remote sensing of the earth. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1988, 26(9): 597-611.

[2] Levine D M, *et al.* ESTAR: A synthetic aperture microwave radiometer for remote sensing applications. *Proc. of the IEEE*, 1994, 82(12): 1787-1801.

[3] Martin Neira M, Menard Y, Goutoule J M, and Kraft U. MIRAS: A two-dimensional aperture synthesis radiometer. *Proc. IEEE IGARSS'94*, Pasadena, CA, USA, 1994, (3): 1323-1325.

[4] Wu J and Liu H, *et al.* Research activity on synthetic aperture radiometry in CSSAR/CAS. *Progress In Electromagnetic Research Symposium 2005*, Guangzhou, China, 2005:1-5.

[5] 吴季, 刘浩, 孙伟英, 姜景山. 综合孔径微波辐射计的技术发展及其应用展望. *遥感技术与应用*, 2005, 20(2): 24-29.

Wu J, Liu H, Sun W Y, and Jiang J S. Technical development and application prospect of synthetic aperture microwave radiometer. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(2): 24-29.

[6] 吴季, 刘浩, 何宝宇, 孙伟英. 旋转扫描被动微波成像子母卫星系统. 中国专利, 公开号: CN1782734, 2005.

Wu J, Liu H, He B Y, and Sun W Y. Rotation scanning passive microwave imaging system of mother & sun satellite. China patent, Pub. No. CN1782734, 2005.

[7] Sun W Y, He B Y, and Wu J. Optimization of fourier plane coverage of antenna arrays for SPORT. *Progress In Electromagnetic Research Symposium 2005*, Guangzhou, China, 2005: 533-537.

[8] Schwarz U J. Mathematical statistical description of the iterative beam removing technique (method CLEAN). *Astronomy and Astrophysics*, 1978, 65(2): 345-356.

[9] Schomberg H and Timmer J. The gridding method for image reconstruction by Fourier transformation. *IEEE Trans. on Med. Imag.*, 1995, MI-14(3): 596-607.

[10] Keller Y, Averbuch A, and Israeli M. A pseudoPolar FFT technique for translation, rotation and scale-invariant image registration. *IEEE Trans. on Image Process*, 2005, 14(1): 12-22.

[11] Ignasi Corbella, Núria Duffo, Mercè Vall-llossera, and Adriano Camps. The visibility function in interferometric aperture synthesis radiometry. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1677-1682.

[12] Natterer F. *The Mathematics of Computerized Tomography*. New York: Wiley, 1986, ch.3.

[13] Stark H and Wengrovitz M. Comments and corrections on the use of polar sampling theorems in CT. *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1983, 31(5): 1329-1331.

[14] Anterrieu E, Waldteufel P, and Lannes A. Apodization functions for 2-D hexagonally sampled synthetic aperture imaging radiometers. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2002, 40(12): 2531-2541.

张成: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为微波辐射机理及综合孔径辐射计成像算法。

吴季: 男, 1958年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波遥感机理、电磁场理论、微波天线技术、空间探测技术与卫星工程和综合孔径微波辐射计等。