

基于滤波反投影算法的自旋式综合孔径辐射计分辨率与灵敏度分析

孙逢林^{*①②③} 张升伟^{①②} 刘浩^{①②} 张成^{①②}

^①(中国科学院微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100190)

摘要: 针对自旋式稀疏阵列综合孔径微波辐射计近似于极坐标的采样方式下成像算法复杂、系统参数估计困难等问题, 该文提出一种基于滤波反投影算法的系统参数估计方法。该方法通过对极坐标下狄拉克采样梳子函数进行1维傅里叶-汉克尔变换得到系统的点扩散函数, 并根据点扩散函数主瓣分解, 重点分析了径向与角度方向采样间隔对无混叠视场范围的影响以及主瓣宽度对应的分辨率。该文同时利用滤波反投影算法推导了自旋式稀疏阵列辐射计灵敏度的估计方法。数值仿真与实测点源响应函数的一致性表明了该模型的精确性。

关键词: 自旋式综合孔径成像辐射计; 滤波反投影算法; 傅里叶-汉克尔变换; 空间分辨率; 辐射灵敏度

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)06-1413-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01270

Resolution and Radiometric Sensitivity Analysis of the Rotating Synthetic Aperture Radiometer Based on Filtered Back Projection Algorithm

Sun Feng-lin^{①②③} Zhang Sheng-wei^{①②} Liu Hao^{①②} Zhang Cheng^{①②}

^①(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Thinned rotating arrays of microwave/millimeter wave synthetic aperture imaging radiometer result in polar like visibility samplings where complex image reconstruction algorithms are in need and it is tough work to estimate important system parameters. To address this problem, a new method based on filtered back projection algorithm is proposed. In this approach, the system Point Spread Function (PSF) is obtained by 1-D Fourier-Bessel (Hankel) transforming from Dirac comb function. Spatial resolution and alias-free of view affected by radial and angular sampling intervals are analyzed by decomposing PSF into main lobe and a series of ring lobes. A new formulation to estimate the radiometric sensitivity of thinned rotating arrays by filtered back projection algorithm is also proposed. The consistency between the numerical and measured point spread function indicates that the proposed model is accurate.

Key words: Rotating synthetic aperture imaging radiometer; Filtered back projection; Fourier-Hankel transform; Spatial resolution; Radiometric sensitivity

1 引言

与传统的实孔径全功率辐射计不同, 干涉式综合孔径辐射计并不是直接探测地球表面亮温分布, 而是采集视场内亮温分布的傅里叶变换系数^[1-3]。傅里叶变换系数的采样是通过一系列排列在特定位置的稀疏阵列两两单元接收到的电压信号的复相关实现的, 其复相关得到的系数被称为可视度函数。不同形状布局的阵列已经被广泛使用, 如HUT-2D

采用的“U”型阵列^[4], SMOS/MIRAS^[5]以及GeoSTAR^[6]采用的都是“Y”型阵列。以上提及的稀疏阵列都会产生均匀但冗余的可视度函数 (u, v) 分布。为了降低阵列的复杂度, 一些稀疏阵列结合分时采样模式被采纳, 例如GAS的非均匀“Y”型阵列^[7], ANSAS的非均匀线性阵列^[8]以及GIMS的非均匀圆环阵列。这些阵列都是通过自旋形成类似于极坐标的可视度函数分布。在辐射场景与传感器之间几何关系较为稳定的情况下, 这样的分时采样方式能够大大地减少系统的复杂度。然而, 在极坐标下传统的基于FFT的图像反演方法不能直接应用, 系统的性能参数(包括空间分辨率以及辐射灵敏度),

2013-08-22 收到, 2013-11-08 改回

气象行业科研专项项目(2009416049)资助课题

*通信作者: 孙逢林 sflzan@hotmail.com

以及混叠效应等估计会变得很复杂。文献[9]介绍了一种基于网格分割的测量方法，其认为不同辐射元胞中的可视度函数具有不同的积分时间长度以及不同的权重值，提供了方便有效的辐射灵敏度的估计方法。然而，这样的方法并没有考虑到反演算法精度对于辐射灵敏度的影响。医学影像中的滤波反投影重构算法十分适合极坐标采样图像反演，且重构算法简单精确^[10]，近来又有滤波反投影快速重构算法被提出^[11]。本文借鉴滤波反投影图像重构算法，为自旋式综合孔径辐射计基本性能参数的估计开辟了一条新的途径。

2 干涉成像基本原理

干涉式成像辐射计的基本结构是二单元干涉仪。通过干涉仪来测量远场入射的电磁波，其干涉测量的相位差依赖于干涉仪的基线和电磁波入射角度。描述干涉式综合孔径辐射计Corbella方程的详细内容可以参考文献[12]，Corbella方程为

$$V_{ij}(u, v) = \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq 1} T_{MB}(\xi, \eta) r \left(-\frac{u\xi + v\eta}{f_0} \right) e^{j2\pi(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta \quad (1)$$

其中 (u, v) 为天线阵列平面基线组成归一化波长坐标； Ω_{ij} 为天线单元的立体角； $(\xi, \eta) = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi)$ 为相对于 (X, Y) 轴的方向余弦坐标； $r(\bullet)$ 表示空间去相关效应的条纹洗涤函数； $T_{MB}(\xi, \eta)$ 为修正亮温

$$T_{MB}(\xi, \eta) = \frac{T_B(\xi, \eta) - T_R}{\Omega_{eq} \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} F_{ni}(\xi, \eta) F_{nj}(\xi, \eta) \quad (2)$$

其中 $T_B(\xi, \eta)$ 为场景的亮温分布， T_R 为接收机的物理温度，单位为K； $F_{ni,j}(\xi, \eta)$ 为归一化的天线方向图。

3 自旋式稀疏阵列

3.1 测量方法

本文采用几个简单的案例来陈述自旋式综合孔

径辐射计稀疏阵列的测量方式。图1表明了不同形状布局的稀疏阵列以及它们在 (u, v) 平面内的可视度函数分布。自旋式稀疏阵列在 (u, v) 平面内可视度函数的采样是沿着一系列中心圆轨迹进行的。作为一种折中，这种方法整合了系统概念中的许多优势。一方面，通过分时采样的方法，某个时刻只需要径向可视度函数的完整覆盖，其它角度可视度函数的覆盖可以通过阵列自旋得到，大大地减少了接收单元的数量以及后续数字单元处理数据的压力；另一方面，相对于实孔径辐射计，这种方法的采样时间有所减少，因为采样时间只随着自旋角度的增加而积累，即只需要1维角度方向的扫描。

在实际系统中，只能采集到有限数目的可视度函数。有限区域的长间隔离散化会导致混叠效应，从而影响反演图像的质量。在自旋式稀疏阵列中，可视度函数的离散化是沿着极坐标的径向与角度方向同时进行的。首先，假设角度方向的采样间隔等距并且可以任意小，此时圆对称采样分布，只考虑极坐标中径向有限区域离散化的影响。

忽略式(1)中的空间去相关效应，将可视度函数与辐射场景的亮温分布都写为极坐标形式，即 $u = \omega \cos \varphi, v = \omega \sin \varphi, \xi = r \cos \theta, \eta = r \sin \theta$ ，得到

$$\tilde{T}_{MB}(r, \theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} V(\omega, \varphi) e^{j2\pi\omega r \cos(\varphi - \theta)} \omega d\omega d\varphi \quad (3)$$

若 $V(\omega, \varphi)$ 是圆对称的，角度方向的采样间隔等距且可以任意小，则将 $V(\omega, \varphi)$ 分解为

$$V(\omega, \varphi) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} V_n(\omega) e^{jn\varphi} \quad (4)$$

$$e^{j2\pi\omega r \cos \theta} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-j)^n J_n(2\pi r \omega) e^{-jn\theta} \quad (5)$$

其中 J_n 表示为是第 1 类 n 阶 Bessel 函数，将式(4)，式(5)代入式(3)得到傅里叶-汉克尔变换形式：

$$\tilde{T}_{MB}(r, \theta) = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-j)^n e^{jn\theta} \int_0^{+\infty} \omega V_n(\omega) J_n(2\pi r \omega) d\omega \quad (6)$$

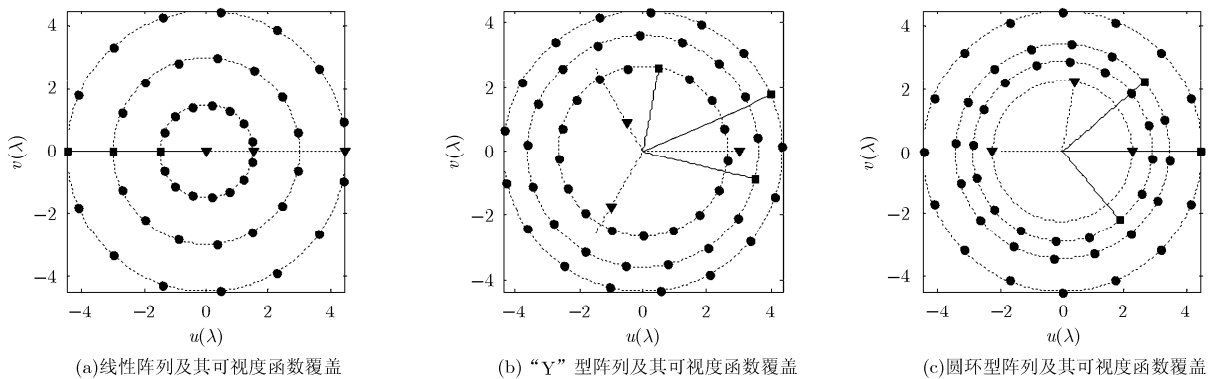


图 1 自旋式 3 单元阵列 (u, v) 平面采样

对于径向对称的函数，对称性使得只有零阶项存在

$$\tilde{T}_{MB}(r) = \int_0^{+\infty} 2\pi\omega V_0(\omega) J_0(2\pi r\omega) d\omega \quad (7)$$

假设离散采样由 (u, v) 平面的中心为 $\omega = 0$ ，间隔为 $\Delta\omega$ 的 M 个同心圆组成，狄拉克采样梳子函数为式(8)

$$\sum_{m=1}^M \delta\left(\frac{\omega}{\Delta\omega} - m\right) = \sum_{m=1}^M \delta(\omega - m\Delta\omega) \Delta\omega \quad (8)$$

将式(8)代入到式(7)可以得到

$$\tilde{T}_{MB}(r) = \int_0^{+\infty} 2\pi\omega J_0(2\pi r\omega) \sum_{m=1}^M \delta(\omega - m\Delta\omega) \Delta\omega V_0(\omega) d\omega \quad (9)$$

由式(9)知，极坐标通过 1 维的傅里叶-汉克尔变换可以得到系统的点扩散函数；对于有限区域的采样，采样具有有限的面积，因此原点的权重应该为 $\pi(\Delta\omega/2)^2$ [13]。此时系统的点扩散函数为

$$\text{PSF}(r) = \pi(\Delta\omega/2)^2 + \sum_{m=1}^M 2\pi m(\Delta\omega)^2 J_0(2\pi r m \Delta\omega) \quad (10)$$

为了提高效率，系统采样不具备无限长的积分时间，因此不管是步进式自旋还是连续性自旋，都需要同时考虑角度方向离散对于重建图像的影响。考虑角度方向的离散性，采样函数修正为

$$\sum_m \sum_k \delta[u - m\Delta\omega \cos(k\Delta\varphi), v - m\Delta\omega \sin(k\Delta\varphi)] m(\Delta\omega)^2 \Delta\varphi \quad (11)$$

将式(11)代入式(3)的方向余弦坐标形式可以得到

$$\tilde{T}_{MB}(\xi, \eta) = \sum_m \sum_k V(m\Delta\omega, k\Delta\varphi) \cdot e^{j2\pi m\Delta\omega(\xi \cos k\Delta\varphi + \eta \sin k\Delta\varphi)} m(\Delta\omega)^2 \Delta\varphi \quad (12)$$

事实上，式(12)是医学影像里经典的滤波反投影图像重构算法，从式(12)可以得到反演图像的卷积形式：

$$\tilde{T}_{MB}(\xi, \eta) = \iint_{\xi'^2 + \eta'^2 \leq 1} T_{MB}(\xi', \eta') K(\xi, \xi', \eta, \eta') d\xi' d\eta' \quad (13)$$

其中卷积核为

$$K(\xi, \xi', \eta, \eta') = \sum_m \sum_k e^{j2\pi m\Delta\omega[(\xi - \xi') \cos k\Delta\varphi + (\eta - \eta') \sin k\Delta\varphi]} \cdot m(\Delta\omega)^2 \Delta\varphi \quad (14)$$

该卷积核具有空间平移不变的性质，将式(5)代入式(14)得到系统汉克尔函数展开形式的点扩散函数：

$$\text{PSF}(r, \theta) = 2\pi \sum_m \sum_{n=\lfloor \frac{2\pi}{\Delta\varphi} \rfloor} J_n(2\pi r m \Delta\omega) m(\Delta\omega)^2 e^{-jn(\theta + \pi/2)} \quad (15)$$

从式(15)可以看出，当 $\Delta\varphi \rightarrow 0$ 时点扩散函数 $\text{PSF}(r, \theta)$ 退化为式(10)。点扩散函数的主瓣由式(10)中零阶汉克尔函数的累加和决定，通过分解得到主瓣：

$$\text{PSF}_{\text{main}}(r) = 2\pi(M\Delta\omega)^2 \text{jinc}(2\pi Mr\Delta\omega) \quad (16)$$

其中 $\text{jinc}(r)$ 为 $J_1(r)/r$ 。通过式(16)可知，径向瑞利零值点分辨率为 $1.22/(M\Delta\omega)$ ，瑞利 3 dB 分辨率为 $0.705/(M\Delta\omega)$ 。

为了明确 $\Delta\omega$ 与 $\Delta\varphi$ 对图像质量的影响，本文对点扩散函数进行了一些数值计算。首先，设置可视度函数采样同心圆的数目 $M=9$ ，采样间隔 $\Delta\omega = \lambda/2$ ，对式(14)进行计算。图 2 表示了角度采样间隔 $\Delta\varphi$ 分别为 $1/M, 4/3/M$ 以及 $2/M$ 时系统的点扩散函数。可以看到 $\Delta\varphi \leq 1/M$ 时，角度采样间隔不会对点扩散函数造成影响，因此不会有混叠现象发生，当 $\Delta\varphi > 1/M$ ，有混叠现象发生，并且无混叠区域占的比重与 $1/(M\Delta\varphi)$ 成正比。其次，根据不同的 $\Delta\omega$ 与 $\Delta\varphi$ ，对式(15)进行数值计算，利用有限阶数汉克尔函数进行逼近。对比图 3(a)-图 3(c)与图 2(a)-图 2(c)可以看出，有限阶数汉克尔函数可以有效地逼近点扩散函数。图 3(d)-图 3(f)为采样间隔 $\Delta\omega = \lambda$ 时，不同角度采样间隔对应的点扩散函数。可以发现径向无混叠视场范围为 $r \leq \lambda/(2\Delta\omega)$ 。

从数值仿真的结果可以看出，系统无混叠视场由 $\Delta\omega$ 与 $\Delta\varphi$ 决定，点扩散函数在 $r = \lambda k/(2\Delta\omega)$ 处形

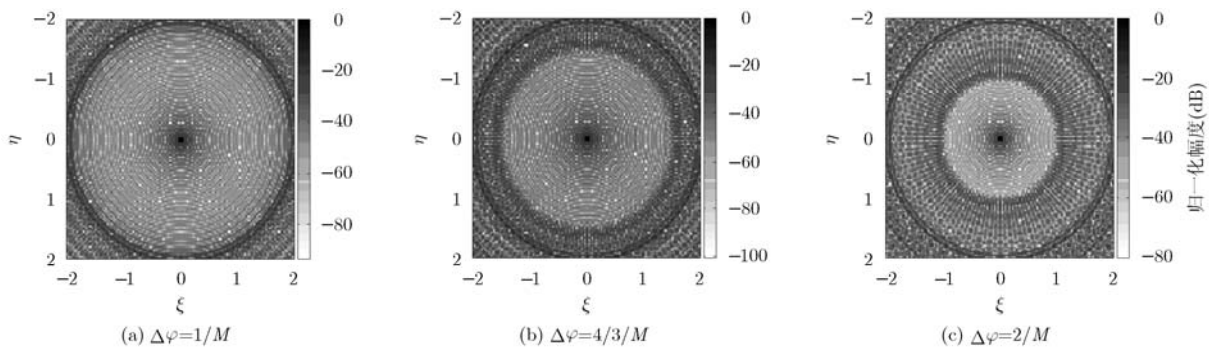


图 2 可视度函数极坐标角度方向离散化对点扩散函数的影响

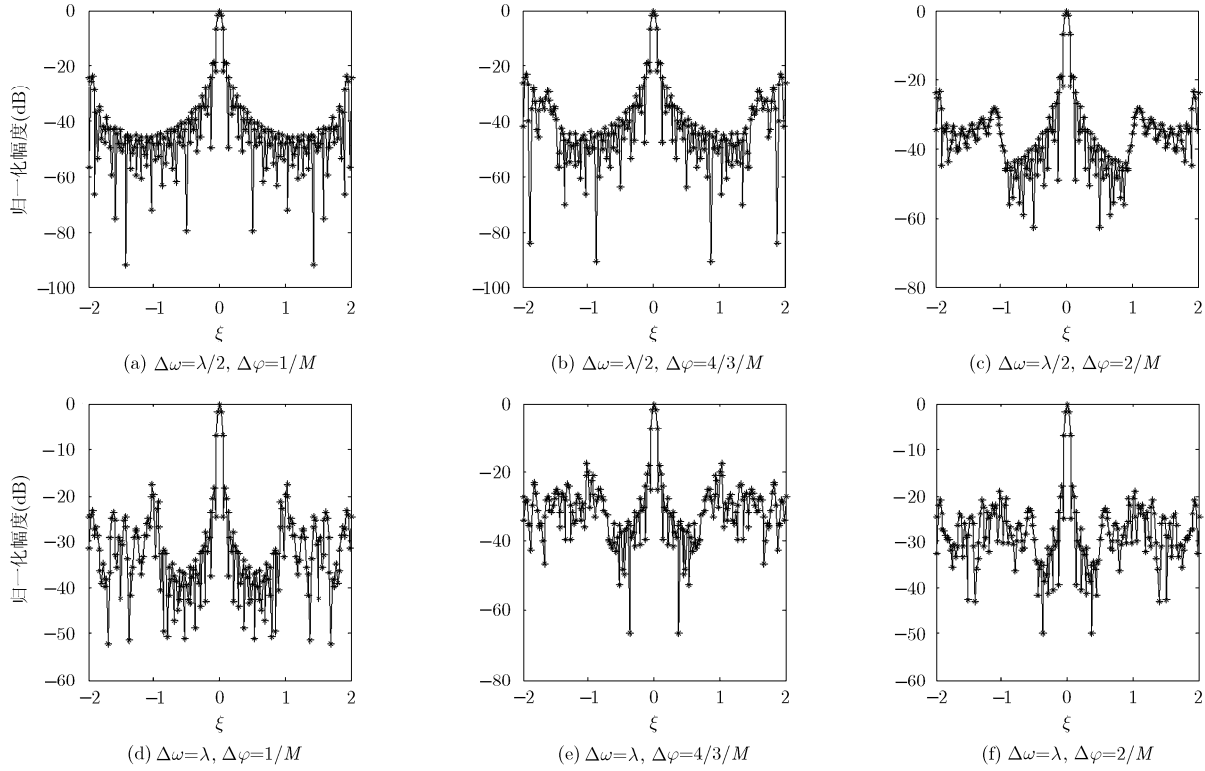


图 3 有限阶汉克尔函数逼近点扩散函数

成峰值，与传统的矩形离散采样方式不同，极坐标离散采样方式的点扩散函数位于主峰区外的峰值较主峰都有衰减，而传统的矩形离散化采样方式下，点扩散函数是周期性延拓的。

3.2 自旋式阵列辐射灵敏度

辐射灵敏度 ΔT_B 描述了辐射计能够从图像中分辨出亮温微弱差异或者变化的能力，因此关系到能否探测出视在温度与背景的辐射亮温相近的隐藏目标。如文献[14]所述，理想天线单元基线 m - n 以及 k - j 的误差互相关，假设具有相同的积分时间 τ (单位 s)，以及相同的等效噪声带宽 B (单位 Hz)，在矩形接收机的情况下得到

$$E[\Delta V_{mn}(t)\Delta V_{kj}^*(t)] = R_{V_{mn}V_{kj}}(0) - V_{mn}V_{kj}^* = \frac{V_{mk}V_{nj}^*}{B\tau_{\text{eff}}} \quad (17)$$

将可视度函数的灵敏度定义为

$$\Delta VF(\omega, \varphi) = \frac{T_A + T_R}{\sqrt{B\tau_{\text{eff}}}} \quad (18)$$

根据式(2)，可以得到修正亮温的方差如下：

$$\begin{aligned} E[\Delta T(\xi, \eta)\Delta T^*(\xi, \eta)] &= \text{var} \left[\sum_m \sum_k W(m, k)V(m, k) \right. \\ &\quad \left. \cdot e^{j2\pi m\Delta\omega(\xi \cos k\Delta\varphi + \eta \sin k\Delta\varphi)} m(\Delta\omega)^2 \Delta\varphi \right] \quad (19) \end{aligned}$$

令 $W(m, k), V(m, k)$ 分别为 $W(m\Delta\omega, k\Delta\varphi)$ 与

$V(m\Delta\omega, k\Delta\varphi)$ 的缩写，定义中间变量：

$$K(m, k) = W(m, k)e^{j2\pi m\Delta\omega(\xi \cos k\Delta\varphi + \eta \sin k\Delta\varphi)} \cdot m(\Delta\omega)^2 \Delta\varphi \quad (20)$$

$$\begin{aligned} E[\Delta T(\xi, \eta)\Delta T^*(\xi, \eta)] &= \sum_m \sum_k |K(m, k)|^2 \text{var}(V(m, k)) \\ &\quad + \sum_m \sum_k \sum_{m' \neq m} \sum_{k' \neq k} K(m, k)K^*(m', k') \\ &\quad \cdot \text{cov}(V(m, k), V^*(m', k')) \quad (21) \end{aligned}$$

对于差异比较大的 m 与 m' ， k 与 k' ，可视度函数误差相关度不大，因此忽略式(21)的第 2 项可以得到

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta T(\xi, \eta)}^2 &\approx \sigma_{V(\omega, \varphi)}^2 (\Delta\omega)^4 (\Delta\varphi)^2 \\ &\quad \cdot \sum_m \sum_k [m^2 W^2(m\Delta\omega, k\Delta\varphi)] \quad (22) \end{aligned}$$

将修正亮温转化为场景亮温可以得到辐射灵敏度。

$$\begin{aligned} \Delta T_B(\xi, \eta) &= \frac{\Omega_{\text{eq}} \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2} (T_A + T_R)}{\sqrt{B\tau_{\text{eff}} |F_n(\xi, \eta)|^2}} \\ &\quad \cdot (\Delta\omega)^2 \Delta\varphi \sqrt{\sum_m \sum_k [m^2 W^2(m, k)]} \quad (23) \end{aligned}$$

假设系统参数：接收机的噪声温度 $T_R=300$ K，视在温度 $T_A=300$ K，等效噪声带宽 $B=2$ GHz，有效积分时间 $\tau_{\text{eff}}=1$ s，天线方向图为 0.2 dB 的幅度 A

以及 $\pi/8$ 相位 φ_a 随机波动光滑的余弦函数：

$$F_n(\theta) = \cos^2(\theta)(1 + A \cos(2\pi \sin(\theta) + \varphi_a)) \quad (24)$$

反演图像通过加窗能够提高系统辐射灵敏度，加窗函数可以理解为空间邻域像素点的加权平均。这里分别采用汉明、布莱克曼、高斯、凯撒等窗函数来对比，结果如图 4 所示。可以看到离视轴越远的地方辐射灵敏度急剧变差；加窗以后辐射灵敏度有所提高，其中布莱克曼窗函数提高灵敏度最明显。

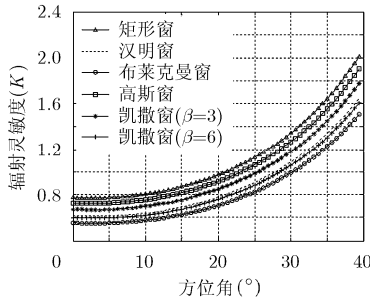


图 4 不同窗函数对应的辐射灵敏度

3.3 自旋式圆环稀疏阵列点源响应

为了验证滤波反投影重构算法在自旋式稀疏阵列中的有效性，展开了一些点源实验工作。地球同步轨道毫米波温度探测仪是采用这种自旋式圆环型稀疏阵列分时采样技术的综合孔径毫米波成像辐射计，由中国科学院国家空间中心提出，作为中国下一代地球气象卫星(风云四号—M)的有效载荷^[15,16]。圆环上 27 单元稀疏阵列通过遗传算法优化，以空间

频域径向均匀分布为优化目标。在距成像仪观测点约 280 m 远处的建筑楼顶架设点源，通过观测点源目标来测试系统的点源响应即点扩散函数。由于选择的是较小的角速度自旋模式，平均角度采样间隔较小。由于不满足远场条件，对可视度函数先进行相位校正，然后通过滤波反投影算法重构点源图像，并应用滤波反投影算法根据实验系统参数进行数值仿真，结果如图 5 所示。从图 5 可以看出，实测的 GIMS 点源响应与根据数值仿真的结果基本一致，但由于系统非理想因素，实测点源响应函数的副瓣水平比仿真的结果高，并且存在非对称现象。

4 结束语

干涉式综合孔径辐射计通过分时采样技术能够大大降低系统的复杂度，其中自选式稀疏阵列受关注度比较高。由于自旋式稀疏阵列分时采样具有特殊性，不可避免地呈现类似极坐标的特点，本文提出的基于滤波反投影图像重构的算法能够有效方便地估计出自旋式稀疏阵列综合孔径辐射计的两个重要参数：空间分辨率与辐射灵敏度。理论分析以及数值计算的结果都表明，本文方法还能有效地估计由于采样间隔而导致的空间域图像的混叠程度即无混叠视场的范围。因此，对自旋式稀疏阵列设计、可视度函数采样参数的选择以及优化目标提供了参考依据。后续的工作将是根据自旋式稀疏阵列径向非均匀离散采样引起的误差，对于噪声的敏感程度以及此时辐射灵敏度的估计方法进行分析。

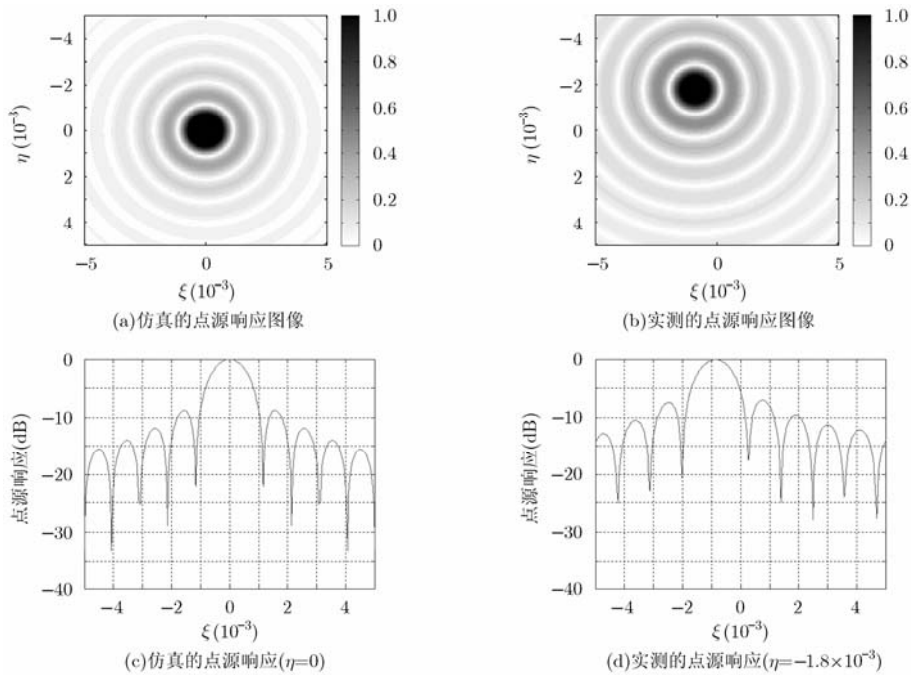


图 5 滤波反投影算法点源响应仿真与实测图像对比

参考文献

- [1] Ramos P I, Forte G F, Camps A, *et al.*. Calibration, performance, and imaging tests of a fully digital synthetic aperture interferometer radiometer[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(3): 723-734.
- [2] 李慧玲, 刘浩, 吴季, 等. 综合孔径辐射计可见度函数预处理算法及时域仿真研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2475-2481.
Li Hui-ling, Liu Hao, Wu Ji, *et al.*. Research on the preprocessing method for the visibility functions in synthetic aperture radiometer and the time domain simulation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(10): 2475-2481.
- [3] 孙逢林, 张升伟. 基于综合孔径辐射计稀疏阵列非均匀采样图像的快速重建[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 927-932.
Sun Feng-lin and Zhang Sheng-wei. Fast image reconstruction for non-uniform sampling of thinned array of synthesis aperture radiometer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 927-932.
- [4] Seppanen J, Kainulainen J, Hallikainen M, *et al.*. Moisture retrievals of boreal forest soil using HUT-2D synthetic aperture radiometer[C]. Proceedings of IEEE International on Geoscience and Remote Sensing Symposium' 2012, Munich, Germany, 2012: 1220-1222.
- [5] Kerr Y H, Waldteufel P, Richaume P, *et al.*. The SMOS soil moisture retrieval algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1384-1403.
- [6] Lim B, Gaier T, Kangaslahti P, *et al.*. Initial results from the GeoSTAR-II laboratory demonstrator[C]. Proceedings of IEEE International on Geoscience and Remote Sensing Symposium'2012, Munich, Germany, 2012: 1282-1285.
- [7] Carlstrom A, Christensen J, Ingvarson P, *et al.*. Geostationary Atmospheric Sounder (GAS) demonstrator development[C]. Proceedings of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, 2009: 2036-2040.
- [8] Jirousek M, Peich M, and Suess H. ANSAS-A low frequency imaging spectrometre using aperture synthesis[C]. Proceedings of German Microwave Conference, Munich, Germany, 2009: 1-4.
- [9] Liu Hao, Maagt P, Christensen J, *et al.*. Radiometric analysis of the rotating synthetic aperture radiometers utilizing grid-based measurement approach[C]. Proceedings of IEEE International on Geoscience and Remote Sensing Symposium' 2007, Barcelona, Spain, 2007: 235-238.
- [10] 张成, 吴季. 基于加窗反投影的干涉式微波辐射计成像算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1064-1067.
Zhang Cheng and Wu Ji. The windowed back projection imaging method for interferometric radiometer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1064-1067.
- [11] Bruno D M and Samit B. Distance-driven projection and back projection in three dimension[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2004, 49(11): 2463-2475.
- [12] Moreno G P, Kainulainen J, Martin N M, *et al.*. Experimental demonstration of the corbella equation for aperture synthesis microwave radiometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(4): 945-957.
- [13] Lauzon M L and Rutt B K. Effects of polar sampling in *k*-space[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 1996, 36(6): 940-949.
- [14] Camps A, Corbella I, Bará J, *et al.*. Radiometric sensitivity computation in aperture synthesis interferometric radiometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2): 680-685.
- [15] Liu Hao, Wu Ji, Zhang Sheng-wei, *et al.*. The geostationary interferometric microwave sounder (GIMS): instrument overview and recent progress[C]. Proceedings of IEEE International on Geoscience and Remote Sensing Symposium' 2011, Vancouver, Canada, 2011: 3629-3632.
- [16] Zhang Cheng, Liu Hao, Wu Ji, *et al.*. Imaging performance analysis for the Geostationary Interferometric Microwave Sounder (GIMS) demonstrator[C]. Proceedings of the 12th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, Rome, Italy, 2012: 1-4.
- 孙逢林: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为干涉式综合孔径辐射计图像处理.
- 张升伟: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事陆基、机载及星载微波遥感器系统设计与研制.
- 刘浩: 男, 1978年生, 研究员, 研究方向为干涉式综合孔径辐射计的系统 and 信号处理.