

文章编号: 1007-4619(2007)01-0033-06

二维圆周综合孔径阵列优化及其毫米波成像特性研究

何云涛, 江月松, 陈海亭

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 运用模拟退火算法对由 20—30 根天线组成的二维圆周综合孔径阵列进行优化排列, 得到优化排布结果。在此基础上依据综合孔径成像的基本原理, 分析了毫米波的成像算法, 在 $u-v$ 域运用了栅格化处理 (Gridding 方法) 和线性插值方法。运用该成像算法对已优化排布的阵列进行了仿真, 并进一步讨论了天线数目、插值方法等因素对成像特性的影响。

关键词: 综合孔径; 阵列优化; $u-v$ 覆盖; 可视度函数; 毫米波; 成像

中图分类号: TH765.2 **文献标识码:** A

Studies of Optimization and Imaging Properties of Two-dimensional Circle Array for mm-wave Synthetic Aperture System

HE Yun-tao, JIANG Yue-song, CHEN Hai-ting

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

Abstract: A method called simulated annealing is adopted for the optimization of a two-dimensional circle array composed of 20—30 antennas. Based on the optimized array and principle of synthetic aperture imaging, some problems about millimeter wave imaging algorithm using Gridding treatment and linear interpolation in UV domain are studied. And then the imaging of the optimized array is simulated and analyzed. The influences on imaging quality by number of antenna and the linear interpolation are also discussed.

Key words: synthetic aperture; optimization of array; $u-v$ coverage; visibility function; mm-wave; imaging

1 引 言

被动微波综合孔径成像系统不仅在天文学研究中已经获得成功的应用^[1], 而且因其在军用和民用领域有重要的应用需求, 近十余年来受到一些国家的重视, 研发星载对地观测被动微波综合孔径成像系统^[2,3]。由于毫米波具有波长更短, 成像分辨率更高, 天线体积小和重量轻等一系列优点^[4], 近几

年, 人们又在对地观测被动微波综合孔径成像的基础上, 提出研制机载对地观测毫米波综合孔径成像系统的构想^[5,6]。

被动毫米波综合孔径成像的原理是: 通过优化排列的天线阵列中各单元天线被动接收来自目标场景在毫米波段的辐射, 并将接收到的能量信号做处理, 使用特定的反演算法恢复出视场的亮温分布图。为了获得良好的实时成像质量, 除了要得到一个重构视场 (FOV) 的快速而又合理算法外^[1-3,7], 一个

收稿日期: 2005-12-06; 修订日期: 2006-03-15

基金项目: 航空基础科学基金项目 (编号: 05F51073)

作者简介: 何云涛 (1982—), 男, 2004 年毕业于北京航空航天大学航空科学与工程学院, 获学士学位。现为北京航空航天大学电子信息工程学院物理电子学专业博士研究生。研究方向为毫米波和光学综合孔径成像。已发表论文 1 篇。E-mail: taoyunhd@ee.buaa.edu.cn

重要的方法就是要对天线阵列中每个子天线的位置进行优化排列,以获得充分而均匀的、具有最小的空间频率冗余度的 $u-v$ 覆盖。二维圆周阵列既可以便于空基平台安装,也可以实现零冗余度的实时成像优化排列^[8]。模拟退火法(Simulated Annealing Algorithm, SAA)是可以避免局部最优的一种全局优化方法^[9]。本文应用模拟退火优化算法对由 20—30 个天线单元组成的二维圆周被动毫米波综合孔径阵进行了优化排列,获得了无冗余度的空间频率覆盖排列。在此基础上依据综合孔径成像的基本原理,分析了毫米波成像算法中的有关方法问题,首次将射电天文学综合孔径成像方法中的 $u-v$ 域栅格化处理(Gridding方法)引入到被动毫米波综合孔径成像中,解决了 $u-v$ 采样点不在规则点式的问题;并在使用 FFT 进行反演成像时在 $u-v$ 平面上对其进行线性插值,明显地改善了成像质量。在对已优化排布的阵列进行成像仿真的同时,进一步讨论了天线数目、插值方法等因素对成像特性的影响。

2 模拟退火算法与综合孔径阵列优化

模拟退火算法最早是由 Metropolis 在 1953 年提出的,1983 年 Kirkpatrick 等成功地将退火思想引入组合优化领域^[9]。本文基于 Comwell 等人对二维微

波综合孔径阵列优化的方法^[9,10],应用 Matlab 软件对 17—30 个子孔径组成的二维圆周阵进行优化排列。优化过程中的关键问题是目标函数的设计,本文将目标函数设计为:

$$E(r_1, r_2, \dots, r_N) = \sum_{i,j,k,l=1}^N \log(\sqrt{(u_{ij}-u_{kl})^2+(v_{ij}-v_{kl})^2}) \quad (1)$$

式中, r_i 为第 i 根天线矢量坐标, u_{ij} 和 v_{ij} 为对应天线的 $u-v$ 平面坐标值。目标函数的设计是基于下述指导思想:位于 $X-Y$ 平面上综合孔径阵列的冗余度越小, $u-v$ 平面上 $u-v$ 覆盖点就越多,即 $u-v$ 平面被填充得就越好,所成图像的旁瓣也越小,即像的质量越好。实现最低冗余度排列,并使 (u, v) 点均匀填充整个 $u-v$ 平面,即少的“频率空洞”,是天线阵优化设计的一个重要准则。在算法设计时,必须使 $u-v$ 平面上的 (u, v) 点之间的距离最大。此外,在应用(1)式时还必需加上约束条件:相邻两根天线之间的最小距离必需大于两根天线的几何尺寸,这样才能满足实际工程的需要。基于上述目标函数和约束条件的优化结果见表 1。由于篇幅关系,表 1 中只给出天线数目分别为 20, 25, 30 根时的结果,每根天线在圆周上的位置以角度表示。同时,图 1 中则给出了由 25 根天线在二维圆周上的均匀分布和优化排列时的 $u-v$ 覆盖情况。

表 1 7—16 个子孔径二维圆周阵优化排列后的位置

Table 1 The position of 7—16 optimized apertures in 2-D circle array

天线数目	天线在圆周上的角度 / (°)						
20	10.1632	26.1725	49.2588	62.9889	86.6022	103.2693	116.0825
	135.9690	158.4131	170.1119	192.3583	212.4198	224.7185	248.0702
	259.8899	279.3548	302.2978	318.5277	332.2697	356.2296	
25	15.7522	28.7427	42.3240	60.3944	72.6845	86.4326	99.9818
	118.2161	129.3279	146.5474	157.5523	174.6521	185.4164	202.5534
	219.2168	230.2598	244.1606	260.2385	276.8504	301.8630	288.0936
	317.5520	331.8821	346.2336	2.5274			
30	15.4739	24.0631	35.0982	50.1864	63.7640	75.0911	83.7279
	94.9936	109.0240	123.4975	143.7908	130.9826	170.1427	158.9378
	183.6841	191.0828	206.7546	219.6949	239.1610	228.2810	251.6808
	266.8975	279.4670	299.1783	289.8635	315.6641	335.5093	326.9280

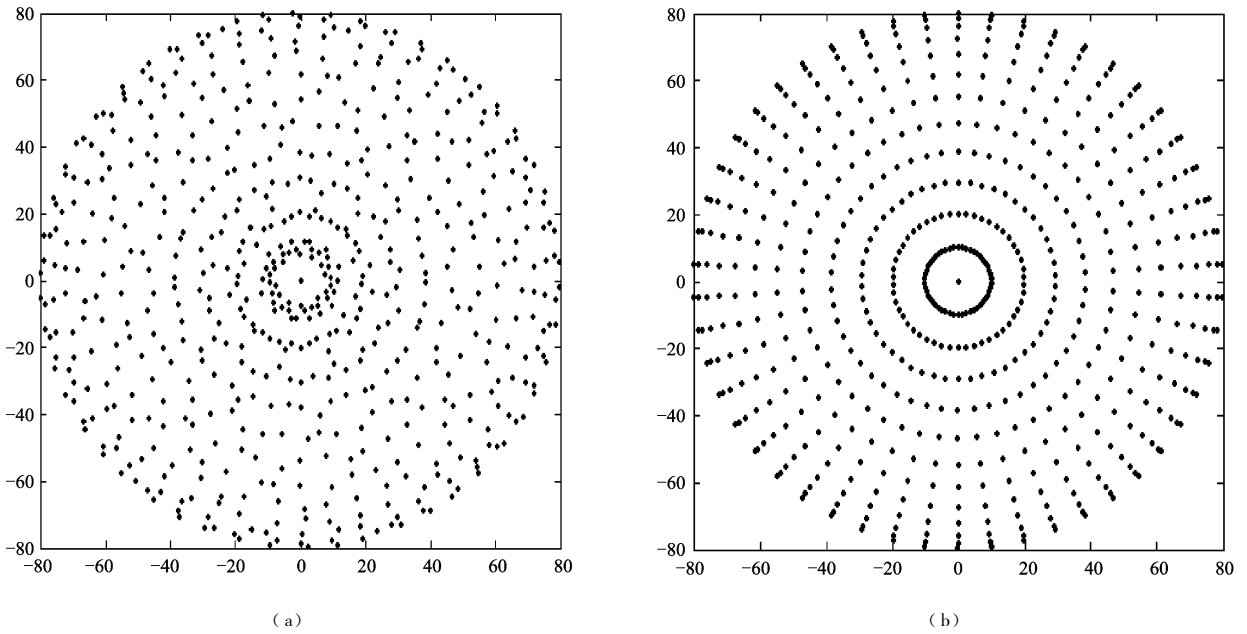


图 1 N=25根天线二维圆周阵列优化排列 (a)和均匀分布 (b)情况下的 (u, v)覆盖图

Fig 1 A comparison of u-v coverage between the optimized array(a) and the non(b) in a 2-D circle array of 25 antennas

3 二维被动综合孔径阵列毫米波成像理论

被动式毫米波综合孔径阵列成像的一般原理是:天线阵接收到的地面辐射信号在经过天线阵列中的两两天线的复相关,得到可视度函数 $V(u, v)$,该可视度函数与视场 (FOV)的亮温 $T(\xi, \eta)$ 在远场条件 $R > 20D_{Syn}^2/\lambda$ 下正好形成一对 Fourier(FFT)变换,可以通过求解这个复相关结果来反演求出视场 (FOV)的亮温。

如图 2所示, oxy 是视场 (FOV)坐标系, OXY 是天线阵坐标系,距 FOV 的距离是 Z ,地面亮温是 $T(x, y)$ 。

第 i 根天线接收到的信息是其在整个视场范围内地面辐射信号的积分:

$$v_i(t) = \iint_S f_i(x, y) T(x, y) e^{-jk_r} dS \quad (2)$$

式中, $f_i(x, y)$ 是该天线的方向增益图。在电磁波辐射的过程中,忽略了大气等对其造成的衰减。天线接收到辐射信号后,两两之间进行复相关。对于任意一个由天线 i 和 j 组成的二元辐射计单元,其复相关可以用下式表示:

$$V_{ij} = E[v_i(t) v_j(t)^*] \quad (3)$$

当天线阵列与视场之间的距离满足远场条件:

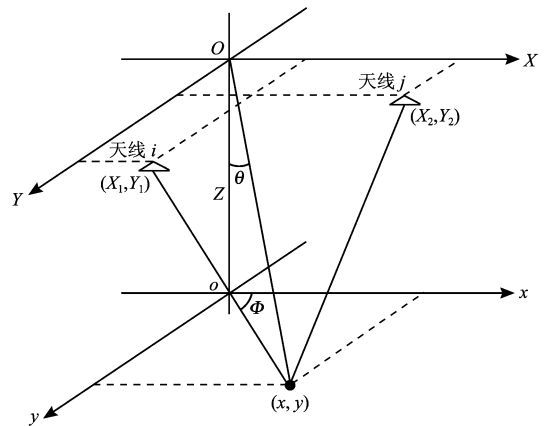


图 2 对地观测二元干涉仪示意图

Fig 2 A basic 2-element interferometer for earth imaging

$$Z > 20 \times \frac{D_{Syn}^2}{\lambda} \quad (4)$$

式中, D_{Syn} 是合成口径大小, λ 是天线接受辐射信号的中心波长。则可以得到^[1]:

$$V(u_{ij}, v_{ij}) = K \iint_S f(\xi, \eta) T(\xi, \eta) e^{-j2\pi(u_{ij}\xi + v_{ij}\eta)} dS \quad (5)$$

式中, u, v 是天线坐标差值对波长的归一化,其表达式如下:

$$u_{ij} = (X_i - X_j) / \lambda \quad (6.1)$$

$$v_{ij} = (Y_i - Y_j) / \lambda \quad (6.2)$$

式(5)中, K 是一个积分常数; X_i 和 Y_i 是天线对应的

坐标; (ξ, η) 是在天线坐标 (X, Y) 处视场的余弦方向, 对应着 $(\sin\theta\cos\phi, \sin\theta\sin\phi)$; $F(\xi, \eta)$ 为天线 i 和 j 的合成方向函数。从式 (5) 可得到, 任意两根天线之间进行复相关得到的可视度函数 $V(u, v)$ 与视场中的亮温 $T(\xi, \eta)$ 形成了一对 FFT 对。因此, 从复相关的结果进行逆 FFT 可以得到原视场的亮温分布, 因实际计算时都是离散化进行的, 所以有:

$$\hat{T}(\xi_m, \eta_n) = \sum_k \sum_l w(u_k, v_l) V(u_k, v_l) e^{j2\pi(u_k\xi_m + v_l\eta_n)} \quad (7)$$

式中, $w(u, v)$ 为一窗函数。

4 二维仿真成像算法分析

根据综合孔径阵列瞬时成像理论, 在 $u-v$ 平面上所得的采样值是离散的, 对 N 根天线进行两两相关, 则采样点的个数为 $N \times (N-1) + 1$ 。根据式 (5) 和式 (7), 如果直接使用 FFT 来反演被观测的亮温分布, 则计算量太大。解决此问题的有效方法是用快速 FFT 计算方法^[1, 6, 7], 但 FFT 算法要求所有的计算点必须是规则分布的格点才可以进行。由于优化排列分布天线的 $u-v$ 采样点通常不在规则的格点上, 故无法实现快速 Fourier 变换。

为了能够应用 FFT 算法进行快速成像, 可以采用的方案有两种: 一是将天线按照使 $u-v$ 采样点在规则点上的原则布置; 二是对 $u-v$ 平面上的采样点进行规则化处理。对于第一种方案, 虽然可以应用 FFT 算法, 但它破坏了最优排列的结果。本文采用了后一种方案。这里先介绍一下栅格化处理^[7]的基本方法: (1) 在 $u-v$ 平面上, 选取一个 du, dv 值, 分别作为其网格的宽度和高度; (2) 对每个具体的网格中的所有 (u, v) 点, 求其平均值, 将这个值赋给该网格的中心点 (图 3), 则

$$V_0 = (V_1 + V_2 + V_3) / 3 \quad (8)$$

这里要求在每个单元内至少有一次测量值, 单元大小的选择要大于 (u, v) 点之间的间隔。这就存在一个问题: 对实际上的 (u, v) 值都发生了改变, 而且用于 FFT 计算的数据个数还减少了, 对成像造成

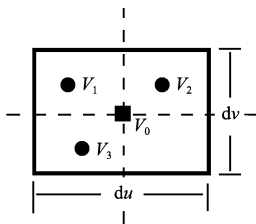


图 3 单个栅格单元

Fig 3 A single cell

了一定的负面影响。但实际上并非如此, 根据数字信号处理理论, 当采样值间隔达到了奈奎斯特采样间隔后, 已经可以无失真的恢复原信号。因此, 每个奈奎斯特采样点附近的其他采样值都是冗余的。实际上, 在一个网格中出现多个点的情况在经过优化的天线阵中是比较少的。

在稀疏天线阵综合孔径成像系统中, 即使天线阵优化过, 在 $u-v$ 平面上仍然不可避免地存在着没有被采样到的频率空洞, 在经过前面的栅格化处理后, 在那些没有采样点的栅格中, 在进行 FFT 计算时认为其值为零。但这是不合理的, 因为该处的真实值不一定为零。比较合适的处理方法是进行插值。设网格中对应的 i 行 j 列处没有采样值, 采用一次线性分段内插, 则可以得到该 $u-v$ 点的值为:

$$V_{i,j} = (V_{i-1,j} + V_{i+1,j} + V_{i,j-1} + V_{i,j+1}) / 4 \quad (9)$$

在后面将看到, 经过这样处理后, 成像结果有了明显的改善。

最后对所得到的可视度函数进行 IFFT 即可反演得到亮温:

$$\hat{T}(\xi, \eta) = \text{IFFT}[w(u, v)V(u, v)] \quad (10)$$

5 仿真结果及其分析

在仿真中, 针对机载对地观测遥感应用的情况, 天线中心频率 $f_0 = 37\text{GHz}$ 取圆周直径 $D = 5\text{m}$, 飞机高度 $Z = 2000\text{m}$, $du = dv = 1.25$, 被观测的地面目标用写有字母“AB”的 30×30 像素的图像模拟, 每个像素对应的是 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 的地面单元。采用前面列出的优化天线排布结果, 并与未优化 (圆周上均匀排布) 的结果做了对比。

图 4 是天线数目 N 分别为 20, 25 和 30 的优化阵列对点源的成像效果仿真。从图中可以很清楚的看到, 随着天线数目的增加, 旁瓣逐渐变小, 变平坦。图 5 是对地面“AB”目标的成像结果。可以看到, 随着 N 的增大, 字母“AB”越来越清晰, 也即是成像的效果越来越好。这也很容易解释: 随着天线数目的增加, 其 $u-v$ 平面的采样覆盖越来越好, 成像质量也相应的提高。

图 6 和图 7 是由相同天线数目 (25 根天线) 组成的综合孔径阵列在不同的排布和插值情况下, 对同一目标的成像效果。可见, 不论是对点源的成像 (图 6), 还是对面目标的成像 (图 7), 在没有优化时其旁瓣信号 (图 6(b) 和图 7(b)) 比优化时旁瓣信号 (图 6(a) 和图 7(a)) 大许多。但如果在优化情况

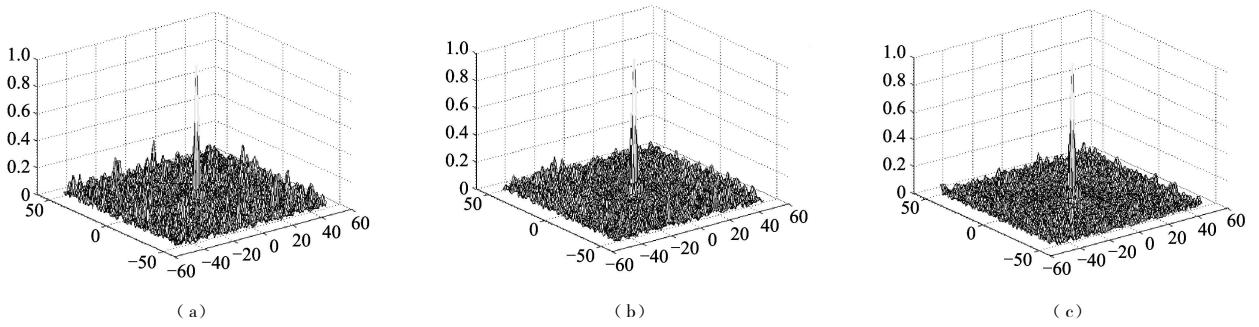


图 4 N 分别为 20(a), 25(b), 30(c)时优化结果的归一化点源成像图

(a) N=20时的点源成像图; (b) N=25时的点源成像图; (c) N=30时的点源成像图

Fig 4 The normalized image of a spot source using optimized arrays of 20(a), 25(b), 30(c) antennas

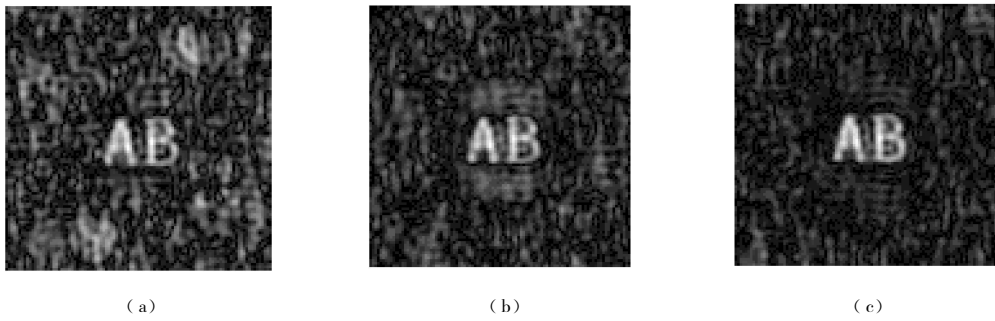


图 5 N 分别为 20(a), 25(b), 30(c)的优化结果的对“AB”的仿真效果图

Fig 5 The simulated image of the “AB” using optimized arrays of 20(a), 25(b), 30(c) antennas

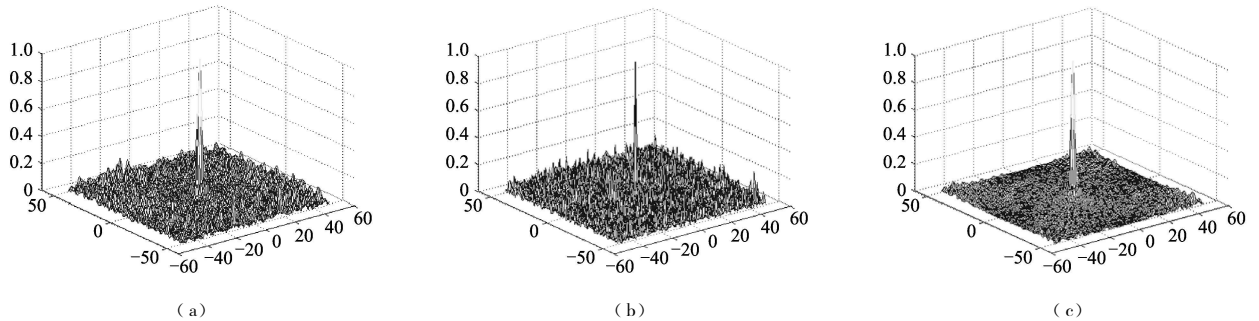


图 6 N 为 25 时, 归一化点源成像图

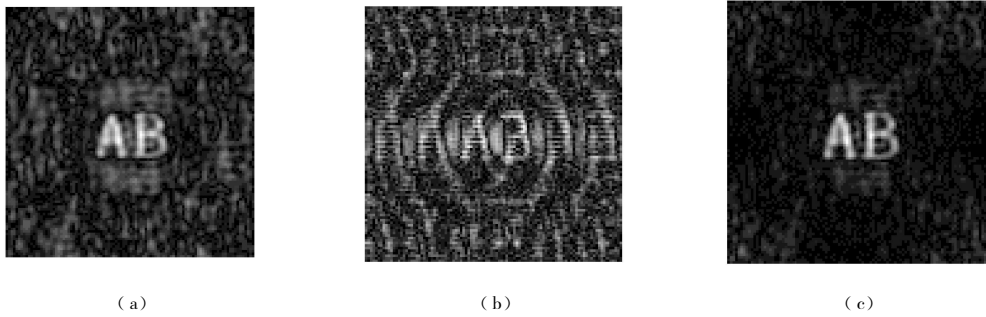
(a) 优化但无插值; (b) 未优化, 无插值; (c) 优化且有插值处理

Fig 6 N=25, the normalized image of spot source with optimized array and non-interpolation(a), non-optimized array and non-interpolation(b), optimized array and interpolation(c)

下,并在成像过程中应用栅格化处理后再加入线性插值时,成像结果(图 6(c)和图 7(c))又有了很大的改善。这是因为,虽然天线阵已经优化,但在 $u-v$ 平面内仍然存在一些频率空洞,在没有插值时,认为其值为零;但线性插值通过和其周围的其他值相联系起来,合理地进行插值时,可将频率空洞补上,因此可改善成像效果。

6 结 论

本文采用模拟退火法,对二维圆周上 20—30 子孔径组成的毫米波综合孔径阵列,进行了优化排列,依据最小冗余度和均匀分布的原则以及天线尺寸等,设计了优化的目标函数和约束条件,并进一步依



(a)

(b)

(c)

图 7 N 为 25 时, “AB” 的成像效果图

(a) 优化但无插值; (b) 未优化, 无插值; (c) 优化且有插值处理

Fig 7 N=25, the result image of the “AB” with optimized array and non-interpolation(a), non-optimized array and non-interpolation(b), optimized array and interpolation(c)

据综合孔径阵列辐射成像的原理, 针对机载对地观测应用情况进行了二维成像仿真。应用栅格化方法解决了目标图像重构过程中的 FFT 计算问题, 应用线性插值方法进一步提高了成像质量。本文的研究方法和结果对于开展机载对地观测毫米波综合孔径成像系统研究具有重要的参考价值。

参 考 文 献 (References)

- [1] Richard A. Thompson, James M Moran, George W Swenson Jr. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy[M]. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [2] Markus Peichl, Suess H, 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[J]. Radio Science, 1998, 33(3): 781-801.
- [3] Ruf S Christopher, Calvin T Swift, Alan B Tanner, et al. Interferometric Synthetic Aperture Microwave Radiometry for the Remote Sensing of the Earth[J]. IEEE Trans GRS, 1988, 26: 597-611.
- [4] Yu J L, L Shouei M, Moffa P. Passive Millimeter Wave Imaging [J]. Microwave Magazine, IEEE, 2003, 4(3): 39-50.
- [5] Jiang Y S, You R. Synthetic Aperture Millimeter Wave Camera of Airborne for Earth Observations: Principles and Configurations of Antenna Array[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(6): 431-436 (in Chinese).
- [6] Harvey A R, Appleby R. Prospects for mm-wave Aperture Synthesis from Space-borne and Aerial Platforms[A]. Proc SPIE[C], 2000, 4901: 27-38.
- [7] Brian Laursen, Niels Skou. Synthetic Aperture Radiometry Evaluated by a Two-Channel Demonstration Model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 36(3): 1988-1998.
- [8] Comwell T J. A Novel Principle for Optimization of the Instantaneous Fourier Plane Coverage of Correlation Arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(8): 1165-1167.
- [9] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Jr Vecchi M P. Optimization by Simulated Annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671-680.
- [10] Comwell T J, Holdaway M A, Uson J M. Radio-interferometric Imaging of Very Large Objects: Implications for Array Design [J]. Astron Astrophys., 1993, 271: 697-713.