镜像综合孔径微波辐射成像原理验证实验研究

李青侠^{1,2},窦昊锋^{1,2},陈良兵³,桂良启^{1,2},陈 柯^{1,2},郎 量^{1,2},靳 榕^{1,2},郭 伟^{1,2} (1. 华中科技大学电子信息与通信学院,湖北 武汉 430074; 2. 多谱信息处理技术重点实验室,湖北 武汉 430074; 3. 南昌大学信息工程学院,江西 南昌 330031)

摘 要:为验证镜像综合孔径微波辐射成像的原理,设计了 V 波段镜像综合孔径辐射成像原理实验系统 (MAS-V),介绍了系统组成及原理并进行了电暖器辐射成像及空间分辨率实验,电暖器热辐射部分清晰可见,且轮 廓与光学图像结果一致。实验结果表明:镜像综合孔径微波辐射成像的原理正确。对于相同的天线阵列,镜像综 合孔径的空间分辨率优于常规综合孔径,约为其 2 倍。若增大反射板与天线阵列的距离,镜像综合孔径的空间分 辨率将进一步提高。研究结果为镜像综合孔径微波辐射成像方法应用于静止轨道大气遥感提供了参考。

关键词:被动微波遥感;镜像综合孔径;微波辐射成像;空间分辨率;辐射计 中图分类号:TP732 文献标志码:A DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.016

Research on Experimental Verification of Principle of Microwave Radiometric Imaging with Mirrored Aperture Synthesis

LI Qingxia^{1,2}, DOU Haofeng^{1,2}, CHEN Liangbing³, GUI Liangqi^{1,2},

CHEN Ke^{1,2}, LANG Liang^{1,2}, JIN Rong^{1,2}, GUO Wei^{1,2}

(1. School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China:

Science and Technology on Multi-Spectral Information Processing Laboratory, Wuhan 430074, Hubei, China;
 School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China)

Abstract: In order to verify the principle of microwave radiometric imaging with mirrored aperture synthesis (MAS), an innovative experimental system of MASat V band (MAS-V) is proposed. Composition and principle of the system are introduced. An imaging experiment of an electric warmer and experiments of spatial resolution are carried out. The thermal radiation of the electric heater is clearly visible, with the outline conforming to the result of the optical image. The experimental results show that the MAS principle is correct and for the same antenna array, MAS can achieve higher spatial resolution compared with conventional aperture synthesis. If the distance between the reflector and the antenna array is increased, the spatial resolution of MAS will be further improved. Research results provide a reference for the application of MAS in atmospheric remote sensing from geostationary orbit.

Keywords: passive microwave remote sensing; mirrored aperture synthesis; microwave radiometric imaging; spatial resolution; radiometer

0 引言

由于台风、暴雨等气象灾害会造成重大人员伤亡 和经济损失,破坏巨大,世界各国都对极端气候的准 确预报提出了非常迫切的现实需求。对较快变化的 天气现象的监测和预报需要全天候大气参数的三维 分布探测。利用星载微波辐射计多频点测量可获得

收稿日期:2017-11-22;修回日期:2018-02-23

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC1401005);国家自然科学基金(41176156,61771213,41505015);中央高校基本科研业务费资助 (2016JCTD203);上海航天科技创新基金(SAST2017-113,SAST2016087,SAST2015032)

作者简介:李青侠(1966一),男,博士,教授,主要研究方向为微波遥感、天线阵列及信号处理。

大气温度和湿度的垂直分布,但低轨道卫星探测的时间分辨率低,难以满足气象灾害动态监测、及时预报的需求。为实现对大气高分辨率的连续探测,需要使用装载于静止轨道卫星的微波辐射计载荷^[1]。

实孔径微波辐射计和综合孔径微波辐射计应 用于静止轨道大气遥感时,都面临难以实现高空 间分辨率的困难。实孔径微波辐射计面临实现大 天线的困难,如大孔径反射面天线的制造、扫描困 难及易变形等^[2]。综合孔径微波辐射计(本文中 称为常规综合孔径,以区别于镜像综合孔径)虽然 可以利用稀疏天线阵列合成等效大孔径^[3],但其 所需天线阵元数多,系统及信号处理复杂度高,工 程实现困难。因此,目前世界上还没有工作在静 止轨道上的微波辐射计载荷。

为探索提高空间分辨率的微波辐射计成像新方法,即用较少的天线阵元数获取更高的空间分辨率, 华中科技大学提出了镜像综合孔径微波辐射成像的 概念^[4-6],并通过理论分析和仿真研究了镜像综合孔 径微波辐射成像方法的正演和反演过程,成像性能 与系统参数之间的关系,一维、二维镜像天线阵列排 布,图像反演算法等关键问题^[7-13],但这些创新的研 究都是基于理论分析和仿真,缺乏实验验证,故尚未 实际应用。

理论上,镜像综合孔径微波辐射成像的空间分 辨率至少是常规综合孔径的2倍,但到目前为止尚 缺乏实验验证,因而无法实际应用。为验证镜像综 合孔径微波辐射成像的原理,本文研制了一套V波 段镜像综合孔径辐射成像原理实验系统(MAS-V), 并进行了镜像综合孔径原理及空间分辨率的实验验 证,可为镜像综合孔径微波辐射成像方法的应用提 供一定的指导。

1 镜像综合孔径微波辐射成像原理

镜像综合孔径微波辐射成像的原理是在天线阵列 旁增加反射板,形成镜像阵列,通过双天线的相关输出 求解余弦可见度,再利用余弦变换,得到观测场景的微 波辐射图像。镜像阵列增大了天线阵列的等效口径, 大幅增加了基线的数量,从而提高了空间分辨率。

镜像综合孔径微波辐射成像技术与常规综合孔径 相比有 2 点不同:1)镜像综合孔径的空间频率采样域 为场景亮温的余弦变换域,而常规综合孔径的空间频 率采样域为场景亮温的傅氏变换域;2)镜像综合孔径 系统的余弦可见度可通过测量相关输出并求解方程组得到,而常规综合孔径的可见度函数可直接测量。

1.1 一维镜像综合孔径成像基本原理

一维镜像综合孔径系统由一个反射面和一维线 性天线阵列组成,且天线阵面与反射面相互垂直,如 图 1 所示,图中 *a*_i 及 *a*_j 表示天线阵列中的任意 2 个天线,2 个天线到反射面的距离分别为 *x*_i 和 *x*_j。





一维镜像综合孔径系统中的任意一个天线接收 到的辐射信号 b(t)包括 2 种:从辐射源直接入射的 信号 b^d(t)及经反射面反射的信号 b^t(t),即

$$b(t) = b^{d}(t) + b^{r}(t)$$
 (1)

双天线接收信号的同相相关输出可表示为

$$R_{ij} = \langle b_i(t)b_j(t)\rangle \tag{2}$$

式中: R_{ij} 为双天线接收信号的同相相关输出; $b_i(t)$ 和 $b_j(t)$ 分别为天线 a_i 和天线 a_j 接收的信号;〈•〉为时间平均算符。

在满足远场条件时,线性天线阵列中的任意1对 天线 a_i 和 a_j 接收信号的相关输出 R_{ij} 可以表示为 $\begin{cases} R_{ij} = C_V(x_i - x_j) - C_V(x_i + x_j), 垂直极化$ $R_{ij} = C_V(x_i - x_j) + C_V(x_i + x_j), 平行极化$ 当入射波为垂直极化波时,信号经过反射面反射后 会有 180°反相;当入射波为平行极化波时,信号经 过反射面反射后相位没有变化; $C_V(u)$ 是一维余弦 可见度;其公式为

$$C_V(u) = 2 \int_0^1 T(\xi) \cos(2\pi u\xi) d\xi \qquad (4)$$

式中: $\xi = \sin \theta$ 为方向余弦; θ 为入射波的入射角; π 为圆周率; $T(\xi) = T_{\alpha}(\xi)/\sqrt{1-\xi^2}$ 是一维修正亮温 分布; $T_{\alpha}(\xi)$ 是一维亮温分布;u 是空间采样频率。

任意 2 个天线接收信号的相关输出都包含 2 个 采样频率的余弦可见度,对于任意 2 个天线,均可以 得到类似于式(3)的方程,以垂直极化入射波为例, 这些方程可以组合成一个线性方程组

$$\begin{bmatrix} R_{12} \\ R_{13} \\ \vdots \\ R_{(M-1)M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & 1 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_V(1) \\ C_V(2) \\ \vdots \\ C_V(N) \end{bmatrix} (5)$$

式中:M 为天线数目;N 为空间采样频率数目。式 (5)称为转移方程。通过求解转移方程可得余弦可 见度,如果所有的余弦可见度都能够获得,就可通过 反余弦变换来重建场景的亮温图像

$$T(\boldsymbol{\xi}) = 2 \int_{0}^{\infty} C_{V}(\boldsymbol{u}) \cos(2\pi \boldsymbol{u}\boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{u}$$
(6)

1.2 二维镜像综合孔径成像基本原理

二维镜像综合孔径系统由 2 个反射面和二维天 线阵列组成,其中 1 个天线的信号接收过程示意图如 图 2 所示。对于坐标位置为(*x_i*,*y_i*,0)的天线 *a_i*,其 接收来自同一个微小面源辐射的 4 个信号,分别为直 接入射信号 *bⁱ_i*(*t*),两反射面单次反射的信号 *bⁱ_i*(*t*)和 *bⁱ_i*(*t*),以及由两反射面两次反射的信号 *bⁱ_i*(*t*)。

天线 a_i 接收的信号 b_i(t)可以表示为

$$b_{i}(t) = b_{i}^{d}(t) + b_{i}^{x}(t) + b_{i}^{y}(t) + b_{i}^{o}(t)$$
(7)

对于二维镜像综合孔径,任意1对天线 *a_i* 和 *a_i*,其接收信号的相关输出 *R_{ii}*为

$$\begin{cases}
R_{ij} = C_V(x_j - x_i, y_j - y_i) - \\
C_V(x_j - x_i, y_j + y_i) + \\
C_V(x_j + x_i, y_j - y_i) - \\
C_V(x_j + x_i, y_j - y_i) + \\
R_{ij} = C_V(x_j - x_i, y_j - y_i) + \\
C_V(x_j - x_i, y_j + y_i) - \\
C_V(x_j + x_i, y_j - y_i) - \\
C_V(x_j + x_i, y_j + y_i) &
\Psi 行极化
\end{cases}$$
(8)

式中: $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 为对波长归一化后的天线 坐标; $C_V(u, v)$ 为二维余弦可见度,定义如下

$$C_{V}(u,v) = 4 \int_{0}^{1} \int_{0}^{1} T(\xi,\eta) \cos(2\pi u\xi) \cdot \cos(2\pi v\eta) d\xi d\eta$$
(9)

式中: $(\xi,\eta) = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi)$ 为方向余弦; (θ,φ) 为入射波的入射方向角; $T(\xi,\eta) = T_{\Omega}(\xi,\eta)/\sqrt{1-\xi^2-\eta^2}$ 为二维修正亮温分布; $T_{\Omega}(\xi,\eta)$ 为二维 亮温分布;(u,v)为空间采样频率。

任意1对天线都可以得到如式(8)所示的方程。 以垂直极化入射波为例,这些方程组合可得到如下





转移方程

				$\begin{bmatrix} 12 \\ 13 \\ \vdots \\ $		
$\lceil 1 \rceil$	-1	0	•••	1	0]	$\begin{bmatrix} C_V(0,1) \end{bmatrix}$
:	:	:	÷	:	:	$C_V(0,2)$
:	:	:	÷	:	:	:
0	1	-1	•••	-1	1	$\left\lfloor C_V(M,N) \right\rfloor$

式中:S为天线数目;(M,N)为两个维度的空间采 样频率数目。

(10)

通过求解转移方程可得余弦可见度,如果所有 的余弦可见度都能够获得,则可通过反余弦变换重 建场景的亮温图像

$$T(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta}) = 4 \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{\infty} C_{V}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v}) \cos(2\pi \boldsymbol{u}\boldsymbol{\xi}) \cdot \cos(2\pi \boldsymbol{v}\boldsymbol{\eta}) d\boldsymbol{u} d\boldsymbol{v}$$
(11)

综上所述,镜像综合孔径微波辐射成像的原理为: 通过系统的双天线相关输出计算得到系统的余弦可见 度,再由反余弦变换得到系统观测的辐射亮温分布。

2 镜像综合孔径微波辐射成像实验系统

为验证镜像综合孔径微波辐射成像的原理及性能,本文研制了一套工作在 V 波段,包含 24 个接收 通道的 MAS-V 系统,该系统包括 V 波段接收天线 阵列、接收通道阵列、反射板、信号同步采集器、数据 存储与处理服务器、机械转台。系统框图如图 3 所 示。接收前端阵列接收 24 路 V 波段辐射信号后, 通过放大、滤波、两级下变频转换为24路中频信号, 经信号同步采集器转换为 24 路数字信号(AD 为数 模转换器),后送到服务器进行成像处理。



图 3 MAS-V 系统框图 Fig.3 Block diagram of MAS-V

该实验系统的反射板可拆卸。未安装反射板 的实验系统照片如图 4 所示,可支持常规综合孔 径微波辐射成像实验;安装 2 块反射板的实验系 统如图 5 所示,可支持镜像综合孔径微波辐射成 像实验。通过控制转台支持天线阵列扫描、天线 阵列旋转实验,通过更换天线阵底板支持多种天 线阵形实验。





图 4 未安装反射板的 MAS-V 实验系统 Fig.4 MAS-V without reflector

系统配置了 2 种 V 波段接收天线:圆极化天线 和线极化天线,每种天线都配置了 24 个接收通道, 组成天线阵列。圆极化天线为圆形喇叭天线,极化 方式为左旋圆极化,工作频段为 50~60 GHz,3 dB 波束宽度约为 20°,增益大于 15 dB,轴比小于 3 dB, 驻波比小于 1.5。线极化天线为矩形喇叭天线,极 化方式为线极化,工作频段为 50~60 GHz,3 dB 波 束宽度约为 20°,增益大于 15 dB,驻波比小于 1.3。

V波段24个接收通道前端阵列分为6个四通





图 5 安装 2 块反射板的 MAS-V 实验系统 Fig.5 MAS-V with two reflectors

道射频前端组件、3个八通道中频放大组件和1个本振源模块。本振源模块可以实现频率控制、增益调节功能,并给所有组件提供本振和供电。根据实验需要,6个四通道射频前端组件可以组成多种天线阵列,通过调节本振频率实现不同频率的接收(51~59 GHz,含7个频点:51.6,52.8,54.0,55.2,56.4,57.6,58.8 GHz),输出中频带宽200 MHz(40~240 MHz)。

信号同步采集器由美国国家仪器有限公司的 18 槽 PXIe-1085 机箱, PXIe-8880 高性能控制器, 7 块四通道的 PXIe-5160 高速信号采集卡(共 28 个 采集通道), PXIe-6361 多功能输入输出卡, PXIe-6674T 定时控制卡, NI8260 磁盘阵列构成。利用 LabVIEW 编程语言, 实现中频信号采集及控制功 能。每个采集通道的最大模拟带宽为 500 MHz, 采 样速率为 1.25 GSa/s。

机械平台由控制机柜、三维转台和小推车三部 分组成,分别由3个电机驱动下方位、俯仰、上方位 转动。下方位可实现180°水平方向的转动,俯仰可 以实现-11.5°~120°垂直方向的转动,上方位可以 实现天线阵列自身的360°旋转。

3 理论、仿真与对比

理论上,镜像综合孔径微波辐射成像系统可以 对自然场景成像,其空间分辨率至少是常规综合孔 径的2倍,但到目前为止还缺乏实验验证。本文利 用 MAS-V 实验系统对电暖器辐射进行成像,验证 其原理的正确性;对双噪声点源进行成像实验,验证 镜像综合孔径的空间分辨率。验证方法是在实验系 统前放置2个噪声源,在实验中调整2个噪声源的 间距,实验系统对2个噪声源成像,在图像中可以区 分的2个噪声源的最小距离就是空间分辨率。将实 验测量的镜像综合孔径微波辐射成像的空间分辨率 与理论、仿真结果进行对比,并与常规综合孔径空间 分辨率进行对比。

3.1 二维镜像综合孔径实验系统对电暖器的成像 实验

利用 MAS-V 实验系统对电暖器辐射进行成 像,验证镜像综合孔径原理的正确性。MAS-V 实 验系统如图 5 所示,工作频率设置为 51.6 GHz,天 线阵列配置为 8×6 的 24 阵元双 L 天线阵,天线间 最小间距为 $3.5\lambda(\lambda)$ 为工作波长),反射板距离天线 阵列 1.75λ 。天线阵列距离电暖器 3.98 m,电暖器 直径为 25 cm,如图 6 所示。



图 6 电暖器 Fig.6 Electric warmer

电暖器成像结果如图 7 所示,电暖器热辐射部分 在图中清晰可见,且轮廓与光学图像结果一致,呈现 为圆环状是由于电暖器中间部分为金属圆盘。实验 结果表明:镜像综合孔径微波辐射成像的原理正确。



图7 电暖器成像实验



3.2 二维镜像综合孔径实验系统对双点源的成像 实验

用实验系统 MAS-V 测量间距不同的 2 个噪声 源(双点源),测量镜像综合孔径辐射成像系统的空 间分辨率。实验系统 MAS-V 如图 5 所示,工作频 率设置为 51.6 GHz,天线阵列配置为 8×6 的 24 阵 元双 L 天线阵,天线间最小间距为 3.5λ ,反射板距 离天线阵列 1.75λ 。天线阵列距离双点源 3.88 m。 图 8(a)用于测量横向空间分辨率,图 8(b)用于测量 纵向空间分辨率。



(a)双点源,横向排布 (b)双点源,纵向排布

图 8 双点源实验场景 Fig.8 Experiment scene with two noise sources

对于横向空间分辨率测量实验,双点源间距设 置为 5~16 cm,得到双点源的图像如图 9 所示,当 两个点源距离 7 cm 时,双点源可清晰分辨出来。

对于纵向空间分辨率测量实验,双点源间距设 置为 5~10 cm,得到的双点源图像如图 10 所示,当 两个点源距离 9 cm 时,双点源可清晰分辨出来。

3.3 二维镜像综合孔径辐射成像空间分辨率的 理论分析

二维镜像综合孔径的阵列因子 F_A 可以用两个 方向上的一维阵列因子的乘积表示^[14]

$$F_{A}(\xi,\eta;\xi',\eta') = \frac{\sin[(2M+1)\pi(\xi-\xi')\Delta u]}{\sin[\pi(\xi-\xi')\Delta u]} \cdot \frac{\sin[(2N+1)\pi(\eta-\eta')\Delta v]}{\sin[\pi(\eta-\eta')\Delta v]}$$
(12)

式中: $(\xi, \eta) = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi), (\xi', \eta') =$ $(\sin \theta' \cos \varphi', \sin \theta' \sin \varphi'), (\theta, \varphi)$ 表示观测方向, (θ', φ') 表示方向图的空间变化方向;M, N为两个 方向的最大正基线; $\Delta u, \Delta v$ 为两个维度的天线间最 小间距,取值为 3.5 λ 。

对于镜像综合孔径微波辐射计,空间分辨率(主 波束宽度)定义为天线阵列方向图峰值两边的第一 对零点之间的间隔,则二维镜像综合孔径辐射成像 的空间分辨率的理论公式为

$$\Delta \xi = \frac{2}{(2M+1)\Delta u} \tag{13}$$



图 9 横向空间分辨率测量实验结果









$$\Delta \eta = \frac{2}{(2N+1)\Delta v} \tag{14}$$

式中:Δξ和Δη为用方向余弦表达的空间分辨率。

实验中设置的双 L 天线阵,M=15,N=11,天线 阵与双点源的距离为 3.88 m,在 $\eta=0.05$, $\xi=0.07$ 方 向,将这些参数代入式(13)和(14)并结合几何关系, 计算得到横向空间分辨率为 7.1 cm,纵向空间分辨 率为9.6 cm。实验结果与理论计算结果基本一致。

3.4 二维镜像综合孔径辐射成像系统观测双点源 仿真

仿真中,取与实验一致的参数:天线阵列为 8× 6 的 24 阵元双 L 天线阵,场景为双点源,横向距离 为 7 cm,与天线阵列距离 3.88 m,两点源位置换算 成余 弦 坐 标 分 别 为 (0.082 7, 0.049 3) 以 及 (0.102 8,0.049 3),双点源横向间隔为 0.02。仿真 结果如图 11 所示,仿真结果与实验结果基本一致。





4 空间分辨率对比分析

以一维镜像综合孔径与一维常规综合孔径为 例,从理论、仿真、实验三个方面对比分析两者的空 间分辨率。两者的天线阵列形式相同,同为一维 8 阵元天线阵列,天线间距为[111111],天线间 距单位为 3.5λ,反射板距离天线阵列 1.75λ。天线 阵列与双点源的距离为 3.97 m。理论、仿真、实验 均取同样的参数。

4.1 理论对比分析

-维镜像综合孔径空间分辨率的理论公式^[5,14]为

$$\Delta \theta_m = \left| \arcsin\left[\sin \theta + \frac{1}{(2M+1)\Delta u}\right] - \\ \arcsin\left[\sin \theta - \frac{1}{(2M+1)\Delta u}\right] \right| \quad (15)$$
4.15

一维综合孔径空间分辨率的理论公式[15] 为

$$\Delta \theta_{a} = \left| \arcsin \left[\sin \theta + \frac{1}{(2P+1)\Delta u} \right] - \operatorname{arcsin} \left[\sin \theta - \frac{1}{(2P+1)\Delta u} \right] \right| \quad (16)$$

式中: $\Delta\theta_m$ 和 $\Delta\theta_a$ 为以角度表达的空间分辨率; θ 为 信号入射角度,实验中 $\theta=4^\circ$;M为一维镜像综合孔 径最大正基线,对于镜像综合孔径实验,M=14,天 线阵列与双点源的距离为3.97 m,通过公式计算得 到横向空间分辨率为7.8 cm;P为一维常规综合孔 径最大正基线,对于一维综合孔径实验,P=7,天线 阵与双点源的距离为3.97 m,通过公式计算得到横 向空间分辨率为15.2 cm。

从理论计算中可以看出,当阵型、阵元数均相同 时,一维镜像综合孔径空间分辨率优于一维常规综 合孔径的空间分辨率,约为其2倍。

4.2 仿真对比分析

仿真时,镜像综合孔径与常规综合孔径的天线 阵列相同,同为一维8阵元天线阵列,天线间距为 [11111],天线间距单位为3.5λ,反射板距离 天线阵列1.75λ,天线阵列距离双点源3.97 m,双点 源间距为6~15 cm。仿真结果如图12所示。在双 点源相距8 cm时,一维镜像综合孔径可以分辨双点 源,而综合孔径不能分辨双点源。当双点源相距 15 cm时,综合孔径才可分辨双点源。

4.3 实验对比分析

空间分辨率对比实验场景如图 13 所示。一维 镜像综合孔径与一维常规综合孔径天线阵列分别 取双 L 阵的最上一横排 8 个天线阵元,天线间距 为[111111],天线阵列距离双点源3.97 m, 双点源间距分别为 6~15 cm,实验结果如图 14 所示。

图 14 结果显示:当双点源相距 8 cm 时,一维 镜像综合孔径可以分辨双点源,而常规综合孔径 不能分辨双点源;当双点源相距 15 cm 时,常规综 合孔径才可分辨双点源。理论计算的一维镜像综 合孔径空间分辨率为 7.8 cm,常规综合孔径空间 分辨率为 15 cm,仿真的一维镜像综合孔径空间分 辨率为 8 cm,常规综合孔径空间分辨率为15 cm, 镜像综合孔径微波辐射成像的理论、仿真、实验三 者结果基本一致。对比分析表明:阵型和阵元数 相同时,一维镜像综合孔径的空间分辨率优于常 规综合孔径的空间分辨率,约为其 2 倍。若增大 反射板与天线阵列的距离,镜像综合孔径的空间 分辨率将进一步提高。



图 12 空间分辨率对比仿真





⁽a) 常规综合孔径

(c)取双L阵最上一行8个天线

(d) 双点源

图 13 空间分辨率实验场景 Fig.13 Experiment scene of spatial resolution

4.4 空间分辨率的损失

对于实际的镜像综合孔径微波辐射成像系统, 其反射板尺寸有限,在天顶方向上无法反射信号, θ 不可取 0°。实验中,信号的入射角度 θ 在 4°左右,对 于天线间距为[1 1 1 1 1 1]的天线阵列来说,计算 出来的角分辨率为 1.132°。而当入射角度为 0°时 角分辨率相对于入射角度为 0°时的角分辨率的损 失为(1.132°-1.129°)/1.129°=0.27%,即由于反 射板尺寸有限,导致无法在 0°观测时,空间分辨率 会有损失,但在实验中,由于信号入射角度偏离 0° 并不太大,所以空间分辨率损失很小。

5 结束语

本文在实验系统 MAS-V 上进行了初步实验, 对电暖器及噪声源进行了成像,实验结果表明:镜像 综合孔径微波辐射成像的原理正确,其中双点源实 验测量了镜像综合孔径的空间分辨率,与理论、仿真

⁽b) 镜像综合孔径



图 14 空间分辨率对比实验结果 Fig.14 Experimental results for comparison of spatial resolution

进行对比,结果基本一致。

将镜像综合孔径与常规综合孔径的空间分辨率 进行了比较,结果显示:阵型和阵元数相同时,一维 镜像综合孔径的空间分辨率优于常规综合孔径辐射 计,约为其2倍。若增大反射板与天线阵列的距离, 镜像综合孔径的空间分辨率将进一步提高。本文的 研究结果为探索镜像综合孔径微波辐射成像方法应 用于静止轨道大气遥感提供了可能。

本文的初步实验验证了镜像综合孔径微波辐射 成像的原理,后续将利用实验系统 MAS-V 验证亮 温图像重建算法和误差校正算法,比较不同天线阵 列的性能,测量镜像综合孔径的灵敏度,验证极化对 天线相关输出的影响,以及验证旋转镜像综合孔径 辐射成像方法等,这些实验将为镜像综合孔径微波 辐射计的研制和应用提供指导。

参考文献

- [1] 张如意,李卿,董瑶海,等.静止轨道气象卫星观测系统发展设想[J].上海航天,2012,29(5):7-13.
- [2] LAMBRIGTSEN B, TANNER A, GAIER T, et al. A microwave sounder for GOES-R: developing the

GeoSTAR mission[C] // IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver:[s. n.], 2006: 3947-3950.

- [3] RUF C S, SWIFT C T, TANNER A B, et al. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the Earth[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26 (5): 597-611.
- [4] CHEN L B, LI Q X, GUO W, et al. One-dimensional mirrored interferometric aperture synthesis [J].
 IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(2): 357-361.
- [5] CHEN L B, LI Q X, YI G L, et al. One-dimensional mirrored interferometric aperture synthesis: performances, simulation, and experiments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51 (5): 2960-2968.
- [6] CHEN L B, ZHANG X Y. Two-dimensional mirrored interferometric aperture synthesis[C]//International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE). Xi'an;[s.n.], 2012; 482-485.
- [7] LIQX, CHENK, GUOW, et al. Rotating mirrored aperture synthesis (RMAS) for passive microwave

remote sensing[C] // IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, 2015: 3481-3484.

- LI Q X, CHEN K, GUO W, et al. ESMAS: experiment system of mirrored aperture synthesis [C] // IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing: IEEE, 2016: 2028-2031.
- [9] LI Y F, LI Q X, FENG L. Relationship between mirrored aperture synthesis radiometers and aperture synthesis radiometer [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(5): 631-635.
- [10] YI G L, HU F, JIN R, et al. Array configuration design of one-dimensional mirrored interferometric aperture synthesis [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(6): 1021-1025.
- [11] LI Y F, LI Q X, JIN R, et al. Array configuration optimization for rotating mirrored aperture synthesis

(RMAS) [C] // IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing: IEEE, 2016: 853-856.

- [12] DOU H F, LI Q X, CHEN K, et al. Antenna array optimaization for mirrored aperture synthesis with autocorrelation[C] // IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing: IEEE, 2016: 2024-2027.
- [13] ZHU D, HU F, WU L, et al. Low-redundancy linear arrays in mirrored interferometric aperture synthesis[J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 368-371.
- [14] 李青侠,陈柯,郎亮,等.高分辨率被动微波遥感: 综合孔径微波辐射成像(下册)[M].北京:科学出版 社,2017.
- [15] 李青侠,陈柯,郎亮,等.高分辨率被动微波遥感: 综合孔径微波辐射成像(上册)[M].北京:科学出版 社,2017.