8 mm 波段二维综合孔径微波辐射计(BHU-2D)

薛 永 苗俊刚 万国龙

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 介绍了二维综合孔径微波辐射计 BHU-2D 成像原理、系统构成及性能指标、校正方法、部分成像实验及其成像结果. BHU-2D 工作在 8 mm 波段,共有 10 个接收单元,天线阵列为 T 形结构,接收机为二次变频超外差结构,I/Q 解调及相关运算采用了数字方式并通过软件实现,采用点辐射源校正方法及背景对消反演算法校正系统通道间不一致、相关偏置及混叠误差. 目前,BHU-2D 已经研制完成,并进行了系统测试及成像实验,得到了室内人工场景及人物场景的辐射亮温分布图像.

关 键 词: 微波辐射计; 二维综合孔径; 8 mm 波段; BHU-2D

中图分类号: TP 722.6

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)09-1020-04

8 mm band 2-dimensional synthetic aperture microwave radiometer (BHU-2D)

Xue Yong Miao Jungang Wan Guolong

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The imaging principle, system structure and characteristics, calibration approach, several imaging experiments and imaging results of 2-dimensional synthetic aperture microwave radiometer BHU-2D (BeiHang University 2-Dimensional) were presented. BHU-2D operates at 8 mm wave band and has 10 receiving channels. The antenna array of BHU-2D is T-shape; receivers' configuration is super heterodyne and has two down converters. I/Q demodulation and correlation of BHU-2D were carried out with digital method and by software; the channel unbalance, correlation bias and aliasing errors were calibrated with radiated point source and background drop inversion algorithm. At present, BHU-2D was accomplished and has been undergoing testing and imaging experiments, and the radiometric brightness distribution images of man-made scenes and the person in lab were obtained.

Key words: microwave radiometer; 2-dimensional synthetic aperture; 8 mm wave band; BHU-2D

微波辐射计是一种无源微波遥感器,通过接收目标物体的微波辐射信号来获取目标亮温信息. 传统的全功率微波辐射计的空间分辨率完全取决于接收天线的物理孔径及工作波长,在一定频率下要提高空间分辨率必须增大天线孔径;然而天线尺寸通常受到机载或星载应用的限制,因此提高空间分辨率一直是微波辐射测量技术的关键问题.

综合孔径技术为提高微波辐射计的空间分辨率提供了有效的手段;此项技术来源于射电天文学领域,20 世纪 80 年代开始被应用到微波遥感对地观测,并在近些年成为微波遥感技术发展的一个热点. 自从 20 世纪 80 年代末 NASA 和麻萨诸塞大学成功研制出第一个一维机载综合孔径辐射计 ESTAR[1] 以来,许多微波遥感研究单位都进行了综合孔径辐射计的设计研制;主要包括

收稿日期: 2007-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40476061);教育部"新世纪优秀人才支持计划"资助项目

作者简介: 薛 永(1983—),男,河南永城人,博士生,xueyong992708@163.com.

ESA 的 MIRAS[2]、JPL 的 GeoSTAR、HUT 的 HUT-2D、中科院空间科学与应用研究中心的一维综合孔径辐射计等;其中 ESA 已经对工作在 L 波段(1.4 GHz)的 69 单元二维 Y 形天线阵列系统 MIRAS 进行了大量研究工作,JPL 已经研制出工作于毫米波段(50 GHz)的 24 单元二维交错 Y 形天线阵列系统 GeoSTAR 样机[3],HUT 已经研制出工作于 L 波段(1.4 GHz)的 36 单元二维 U 形天线阵列系统 HUT-2D[4]样机,中科院空间科学与应用研究中心已经研制出两套分别工作于 C 波段(6.6 GHz)、X 波段(9.398 GHz)的一维综合孔径辐射计[5].北京航空航天大学电磁工程实验室于 2004 年开始综合孔径微波辐射计的研究工作,2006 年设计研制出工作于 8 mm 波段(36.07 GHz)的 10 单元二维综合孔径微波辐射计 BHU-2D,并得到了预期成像结果.

1　综合孔径辐射成像原理

综合孔径辐射计通过测量空间频域信息得到视场内的亮温分布,其测量值为具有一定间隔的两天线接收信号的复相关值,称为可视度函数.在满足远场条件时,可视度函数与视场内亮温分布的关系为

$$V_{12}(u,v)=\frac{1}{2}E[S_{r1}(t)S_{r2}^{*}(t)]=\iint\limits_{\xi^2+\eta^2\leqslant 1}T(\xi,\eta)\check{r}_{12}\left(-\frac{u\xi+v\eta}{f_0}\right)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(u\xi+v\eta)}\,\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta \quad (1)$$

$$T(\xi,\eta)=\frac{T_B(\xi,\eta)}{\sqrt{1-\xi^2-\eta^2}}F_{n1}(\xi,\eta)F_{n2}(\xi,\eta) \quad (2)$$

其中,$S_{r1}(t)$和 $S_{r2}(t)$为图 1 中两天线接收的电压解析信号;(u,v)为以系统中心频率 f_0 对应波长 λ 归一化的两天线间隔,称为基线,$u=\frac{x_2-x_1}{\lambda}$,$v=\frac{y_2-y_1}{\lambda}$;$(\xi,\eta)$为坐标$(x,y)$的方向余弦,$(\xi,\eta)=(\sin\theta\cos\phi,\sin\theta\sin\phi)$;$T_B(\xi,\eta)$为该点的亮温值;$T(\xi,\eta)$为该点的修正亮温值;$F_{n1}(\xi,\eta)$,$F_{n2}(\xi,\eta)$为天线 1 和天线 2 的归一化电压方向图;$\check{r}_{12}(\tau)=\left[\int_0^{\infty}H_{r1}(f)H_{r1}^{*}(f)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f\tau}\,\mathrm{d}f\right]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_0\tau}$称为条纹洗涤函数,体现了系统的去相关效应,与两接收机的频率响应有关;其中 $H_{r1}(f)$,$H_{r2}(f)$为两接收机的归一化频率响应函数.

理想情况下,两接收通道性能是完全相同的,系统相对带宽 $B/f_0\ll 1$,此时条纹洗涤函数 $\check{r}_{12}\left(-\frac{u\xi+v\eta}{f_0}\right)\approx 1$,则

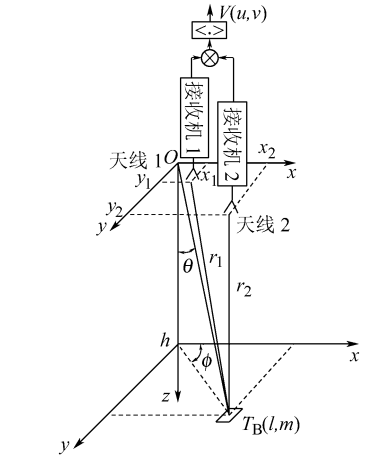


图 1　综合孔径辐射成像原理图

$$V_{12}(u,v)=\iint\limits_{\xi^2+\eta^2\leqslant 1}T(\xi,\eta)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(u\xi+v\eta)}\,\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta \quad (3)$$

可见,综合孔径辐射计测得的可视度函数与视场内修正亮温分布成傅里叶变换关系,即

$$T(\xi,\eta)\underset{\mathrm{IFT}}{\overset{\mathrm{FT}}{\rightleftharpoons}}V(u,v) \quad (4)$$

2　BHU-2D 系统构成及性能指标

BHU-2D 系统由 10 单元 T 形天线阵列、接收机阵列、数字相关及数据处理子系统 3 部分构成,图 2 为 BHU-2D 实物图,表 1 为其基本参数.天线接收的信号经接收机单边带下变频到 50 MHz带宽的中频信号;数字相关及数据处理子系统为包括一 10 通道 200 Hz 采样频率 A/D 卡的计算机,A/D 卡对中频信号进行 A/D 转换及采集,计算机通过软件对采集到的各通道信号进行数字 I/Q 解调及通道间复相关运算,从而得到可视度函数的离散值;根据式(4),对离散可视度函数进行基于逆傅里叶变换的反演运算即可得到视场亮温分布.


①T 形天线阵列②接收机③数字相关及数据处理子系统
图 2　BHU-2D 实物图

T形天线阵列的实物图见图3，天线单元为角锥喇叭天线，3dB波束宽度为32°×34°；由于法兰尺寸的限制，相邻天线间隔为25 mm(2.8λ)．T形天线阵列对应的可视度采样点分布如图4，采样点覆盖的面积即为系统的合成孔径，系统角度分辨率与同等尺寸的实孔径天线相当，近似为3.4°．T形天线阵列存在较多冗余基线，即不同天线对产生的基线相同，对于这些不同天线对的复相关值，系统取其平均值作为该基线的可视度函数采样值，从而有效利用了T形天线阵列的冗余基线．

表1 BHU-2D基本参数

项目	数值
中心频率/GHz	34.07
带宽/MHz	50
输出信号频率/MHz	45～95
最小天线间隔/mm	25
积分时间/s	20



图3 T形天线阵列

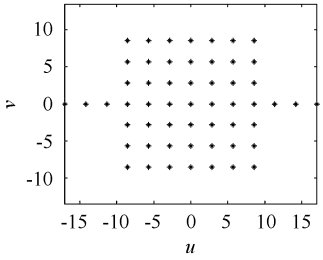


图4 T形天线阵列可视度采样点分布

系统接收机为二次变频超外差结构，10路接收机的本振信号为同一本振信号经同相功分得到；接收机基本结构框图如图5所示．系统接收机的噪声系数约为4 dB，根据表1所述系统其它性能参数及灵敏度计算公式[6]可得系统灵敏度理论值约为1.3 K．

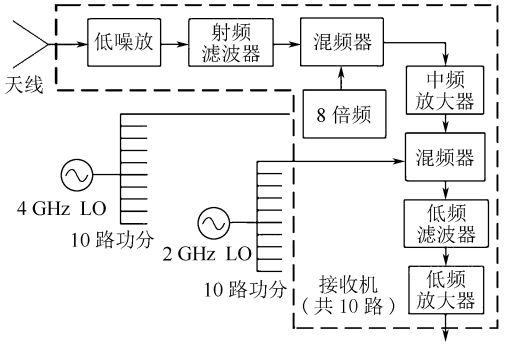


图5 系统接收机基本结构框图

3 BHU-2D系统误差及校正

由于系统的不理想性，BHU-2D存在通道间不一致、相关偏置等误差；此外，由于BHU-2D系统可视度最小采样间隔为2.8λ，其不混叠视场范围为21°，在通过傅里叶变换进行图像反演时还将产生不混叠视场外场景的混叠误差．

利用BHU-2D进行成像实验时，采用了点辐射源校正方法及背景对消反演算法，如式(5)、式(6)所示．其中式(5)适用于人工场景成像，人工场景布置在系统不混叠视场内；用系统测得的场景可视度函数$V_s(u,v)$减去预先测得的场景所处背景的可视度函数$V_b(u,v)$可以校正相关偏置及人工场景外目标的混叠；除以当点辐射源位于视场中心时系统测得的可视度函数$V_p(u,v)$可以校正各通道间不一致误差；式(6)适用于自然场景成像，此时只能通过减去预先测得的冷空场景可视度函数$V_c(u,v)$校正相关值偏置误差，无法校正混叠误差．

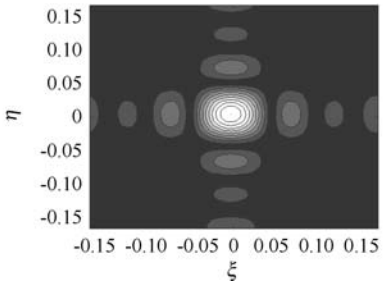
$$T(\xi,\eta)=\mathrm{IFFT}\{[V_s(u,v)-V_b(u,v)]/V_p(u,v)\} \tag{5}$$

$$T(\xi,\eta)=\mathrm{IFFT}\{[V_s(u,v)-V_c(u,v)]/V_p(u,v)\} \tag{6}$$

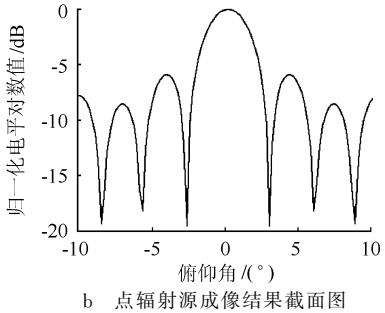
上述方法无法做到精确校正系统误差，实际中可以通过向系统各接收通道注入相关噪声/不相关噪声[7]进行通道间不一致、相关偏置等误差的精确校正，通过减小天线间隔、改善天线方向图性能降低系统混叠误差．

4 BHU-2D系统成像实验结果

BHU-2D系统于2006年7月研制完成，其后进行了一系列系统测试及性能验证成像实验．图6为其点辐射源成像结果及其截面图，点辐射源为一喇叭天线，其发射被低噪声放大器放大的匹配负载辐射信号；由成像结果可以明显观察到点辐射源图像的对称副瓣，由成像结果截面图可以看出BHU-2D系统的角度分辨率约为3.4°，与前述分析一致．图7示出了部分成像场景及其相应的实验结果，所有场景均位于系统不混叠视场内，距离系统约250 cm．图7a、图7c所示的实验场景为注满水的U形、V形UPVC管道，并用加热器将水加热至沸腾状态；其中管道的直径为7.5 cm，U形管道的竖直部分、水平部分长度分别为53.5 cm和64 cm，V形管道的两臂长度为50 cm．

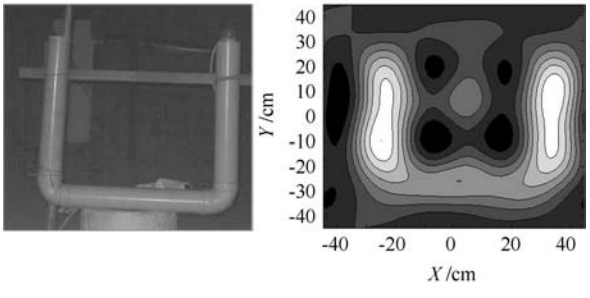


a　点辐射源成像结果

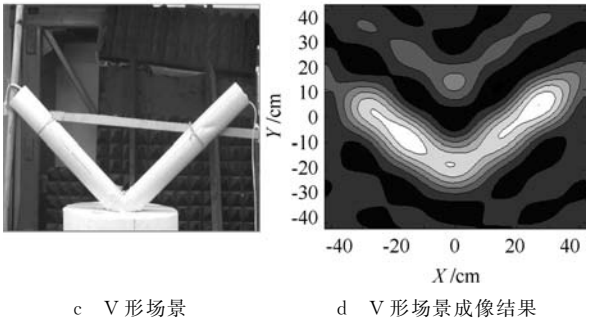


b　点辐射源成像结果截面图

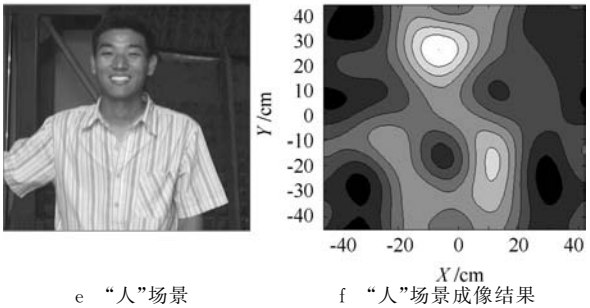
图 6　BHU-2D 系统点辐射源成像结果及其截面图



a　U 形场景　　b　U 形场景成像结果



c　V 形场景　　d　V 形场景成像结果



e　“人”场景　　f　“人”场景成像结果

图 7　BHU-2D 系统成像结果

图 7b、图 7d、图 7f 分别为图 7a、图 7c、图 7e 所示场景的成像结果,可以看出与原始场景较为一致.图 7b 中的水平管道图像较垂直管道图像暗是因为加热器只能在垂直管道内加热,而管道内对流性较差,使得原始场景中水平管道的物理温度(约 371 K)低于竖直管道(约 358 K);图 7d 中的 V 形管道中间部分图像较其余部分暗也是由此原因造成.图 7b 的中心亮点是由其周围管道图像的副瓣叠加而成,图 7d 中也可观察到 V 形管道图像的副瓣.图 7e 所示场景为位于室内环境中的“人”,成像结果图 7f 中能明显看出“人”的轮廓,包括抬起的右臂;由于在室内人与周围环境的亮温差较小,此成像结果表明了系统的良好灵敏度性能.

5　结 束 语

设计研制了 8 mm 波段二维综合孔径微波辐射计系统 BHU-2D,成像实验结果验证了系统的性能,达到了预期的目标.目前系统还未得到室外自然场景的理想成像结果,而且系统还没有实现精确、实时校正,下一步的工作将主要集中在系统的进一步测试及误差测量与校正方面.

参考文献(References)

[1] 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 Trans GRS, 1998, 26(5):597－611

[2] Corbella I, Torres F, Camps A, et al. L-band aperture synthesis radiometry: hardware requirements and system performance[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Honolulu: IEEE, 2000, 7: 2975－2977

[3] Lambrigtsen B, Wilson W, Tanner A, et al. GeoSTAR-A synthetic aperture microwave sounder for geostationary missions[C]// Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2005, 5659:185－194

[4] Kainulainen J, Rautiainen K, Tauriainen S, et al. First 2-D interfero-metric radiometer imaging of the earth from an aircraft[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(2):241－245

[5] Liu H, Wu J, Ban S Z, et al. The CAS airborne X-band synthetic aperture radiometer: system configuration and experimental results[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Alaska: IEEE, 2004, 3:2230－2233

[6] Camps A. Application of interferometric radiometry to earth observation[D]. Barcelona: School of Telecommunication Engineering, the Polytechnic Universitat of Catalonic, 1996

[7] Corbella I, Torres F, Camps A, et al. Baseline calibration of interferometric radiometers: experimental results[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Seoul: IEEE, 2005, 8:5547－5550

(责任编辑:娄　嘉)