

干涉式微波成像仪地面实验系统天线阵列设计

孙伟英^{1,2}, 张成¹, 吴季¹

1. 中国科学院空间科学与应用研究中心微波遥感室, 北京 100080
2. 中国科技大学地球空间科学学院, 合肥 230026

[摘要] 为提出二维干涉式微波成像仪的可行方案, 通过地面实验, 开展利用二维合成孔径技术直接成像的研究, 验证部分相关和二维成像机理及算法, 检验系统的空间分辨率和温度分辨率, 具有重要的科学意义。本文对二维干涉式微波成像仪地面实验系统的天线阵列进行了稀疏孔径设计。设计目标是: 考虑方案的物理可实现性, 即平台应用中的工程技术约束条件, 在能够得到同样的空间频域覆盖的情况下, 采用尽量少的干涉天线单元。理论分析和数值模拟结果表明, 设计后的天线阵列满足了地面实验系统工程设计要求; 设计后, 6 单元阵列实现了零冗余, 7 单元阵列冗余度仅为 9.1%; 空间频域的采样点对空间频域覆盖的完备性良好, 为有效地进行亮温图像反演提供了可靠的可见度函数。

[关键词] 微波; 成像仪; 地面实验系统; 天线阵列

[中图分类号] TP721.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)11-0019-04

Antenna Array Design for the Ground-based Experimental System for Interferometric Microwave Radiometer Imager

SUN Weiying^{1,2}, ZHANG Cheng¹, WU Ji¹

1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China
2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: The ground-based experimental system for the interferometric passive microwave imager is designed to test its two-dimensional part correlation, imaging mechanism and algorithm. High spatial resolution is obtained by synthesis aperture technique. One measurement is required for one spatial frequency because the object locates in the far field of antennas of the experimental system. Moreover, the antenna array is revolving during the measurement. Therefore, a sparse aperture design is desirable for the antenna array in order to reduce cost and complexity of the whole system. This paper presents a sparse aperture design for the antenna array in the ground-based experimental system. The design objective is to use as few as possible antenna elements to obtain a similar covering of the spatial frequency domain. The numerical simulation results indicate that the engineering design requirements can be satisfied. Zero redundancy is realized for an array with 6 elements. The redundancy of an array with 7 elements is 9.1%. Moreover, sampling points of the designed antenna array cover completely the spatial frequency domain. Therefore, reliable visibility functions can be provided for brightness temperature image reversion.

Key Words: microwave; radiometer imager; experimental system on land; antenna array

CLC Number: TP721.1

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)11-0019-04

0 引言

微波辐射计是用来测量目标自身微波辐射的高灵敏度的被动微波遥感器。与主动微波遥感器相比, 它具

有体积小、重量轻、功耗低的特点, 并且对目标表面粗糙度等宏观结构特征不敏感, 特别适合于星载应用。但是, 传统辐射计的空间分辨率较低。因此, 目前星载微

收稿日期: 2007-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40574070)

作者简介: 孙伟英, 女, 北京市海淀区中关村南 2 条 1 号中国科学院空间科学与应用研究中心, 助理研究员, 研究方向为空间射电、电磁场与微波技术; E-mail: swy_why@126.com

波辐射计主要应用于大气、海洋等中的大尺度目标的探测。为了提高微波辐射计的空间分辨率,人们引入射电天文中的干涉测量技术,提出了干涉式综合孔径微波辐射计的概念^[1-3]。

中国科学院空间科学与应用研究中心微波遥感技术实验室 1996 年开始进行综合孔径辐射计的预研工作。1999-2001 年,在 863-2 主题的支持下研制了 6 单元、4°角分辨率的 C 波段一维综合孔径微波辐射计样机^[4]。2001-2004 年,在 863-13 主题的支持下,研制了 8 单元、2°角分辨率的 X 波段一维综合孔径微波辐射计样机^[5]。

一维合成孔径辐射计是结合飞行平台的移动进行对地观测,其波束驻留时间和沿飞行方向真实孔径天线的物理尺寸限制了空间分辨率的进一步提高。为了进一步提高微波辐射计的空间分辨率,开展利用二维合成孔径技术直接成像的研究,具有重要的科学意义和应用价值。

探讨星载二维微波成像仪的可行方案,需要首先验证部分相关和二维成像机理及算法,检验系统的空间分辨率和温度分辨率,特别是利用基线与目标相对位置的移动产生的空间频率变化效应。本文在前期工作的基础上,对一维综合孔径微波辐射计的原理样机进行了改进,得到二维干涉式微波成像仪的地面实验系统。地面实验系统的天线分系统是由若干个单元构成的天线阵列。本文的工作是为此天线分系统进行阵列设计,以获得满足工程设计和图像反演需要的天线阵列分布方案。

1 干涉式微波成像仪的地面实验系统

地面实验系统组成单元包括天线单元,信道单元,中频功分网络与相关器单元,数管与主控计算机单元,电源、结构与转台单元等 5 个分系统,如图 1 所示。其中,天线单元是由多个天线按照设计的布局构成的稀疏天线阵列;信道单元包括校准/测量切换开关,微波放大与滤波,混频、中频放大与滤波,本振网络与校准噪声源网络;中频功分网络与相关器单元包括 6 路输出的功分器网络、19 个复相关器组成的相关器组和 6 个信道校准测试通道;数管与主控计算机单元包括测量与校准参量的 A/D、工程参数采集、切换开关与热控的

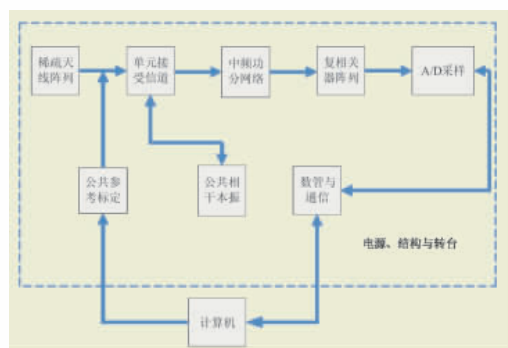


图 1 系统框图

Fig. 1 Experimental system

控制、系统操作时序的产生与控制、数据的缓存与通信和成像处理与显示;电源单元提供系统各个单元需要的直流电压和电流;结构单元包括系统机箱布局 and 热控;转台单元用于地面成像实验。

考虑到目标位于地面实验系统天线的远场,一个空间频率只需测量 1 次,不需重复测量。此外,测量时天线阵旋转。因此,可以对同时进行不同空间频率采样的天线阵进行稀疏孔径设计,降低系统成本及复杂度。

2 地面实验系统天线阵列稀疏孔径设计

2.1 地面实验系统天线阵列

二元干涉仪是地面实验系统的天线阵列的基本单元,如图 2 所示。它具有两路独立接收信道,并将各自信道输出接模拟复相关器,输出可见度函数的实部和虚部。两个接收天线之间的距离矢量 D 称为基线^[6]。

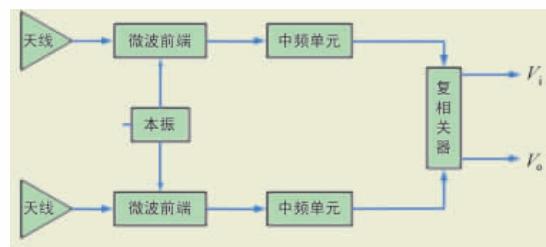


图 2 二元干涉仪系统框图

Fig. 2 System of binary interferometer

利用二元干涉仪,地面实验系统的天线阵列在不同基线长度下进行测量,然后进行 Fourier 变换,得到目标的亮温图像。由于天线阵列在测量时是旋转的,因此不限定基线的方向。进一步考虑到可见度函数 $V(\bar{D})$ 具有复共轭对称特性,

$$V(\bar{D}) = V^*(-\bar{D}) \quad (1)$$

则可以用于反演的 $V(\bar{D})$ 的项数比实际多 1 倍,即有效基线长度比物理基线长度长 1 倍。因此,实际可以达到的空间分辨率比物理口径的空间分辨率高 1 倍^[7]。地面实验系统天线阵列单元参数见表 1。

2.2 天线阵列稀疏孔径设计

冗余问题和最短基线的参数设计是天线阵列稀疏孔径设计最为关键的两个问题^[7]。目前具备的实验系统相关器数量为 19 个,功分器为 6 路输出。对 6 个单元的阵列来说,零冗余设计需要 16 个相关器。对 7 个单元的阵列来说,零冗余设计需要 22 个相关器。零冗余设计可以最大程度地降低系统的复杂度和成本,同时考虑到具有一定的冗余,可以进行系统交叉检验,提高可靠性。综合考虑系统成本、复杂度及可靠性,确定对 6 单元阵列进行零冗余设计;对 7 单元阵列进行非零冗余设计,冗余度在 15% 以内。

除零基线以外,一个 Δu 为最短基线,其大小与单元天线的方向图有关。单元天线的波束宽度为 θ_e 时,合成后的孔径分辨率 θ_s 为

$$\theta_s = \frac{\theta_e}{2N+1} \quad (2)$$

表 1 天线阵列单元参数
Table 1 Parameters of antenna array elements

天线阵列单元数目	6	7
天线类型	右旋圆极化天线	右旋圆极化天线
单元天线尺寸	口径 6 cm	口径 6 cm
半功率波瓣宽度	30°~40°	30°~40°
天线布局	零冗余稀疏天线阵, 16 基线	非零冗余稀疏天线阵, 冗余度<15%
天线驻波比	<1.5	<1.5

其中, N 为最长基线对最短基线的倍数。均匀情况下, 天线阵的孔径尺寸与 N 呈正比, 这是由于 N 阶离散 Fourier 级数, 再加上零阶与镜像共 $2N+1$ 个点。经过 Fourier 变换后, 原来单元天线波束覆盖的区域 θ_e 将被分割成 $2N+1$ 份。

为了实现波束如 θ_s 的空间分辨率, 常规天线的孔径 D_λ 与波束分辨率的关系可以表示为

$$D_\lambda = \frac{1}{\theta_s} \quad (3)$$

对合成孔径辐射计, 由于采用相关测量, Fourier 变换的对称性使得天线阵的波束比常规的天线窄 1 倍。因此得到天线阵的孔径 D_λ 与单元天线的波束分辨率 θ_e 、基线数 N 的关系为

$$D_\lambda = \frac{1}{2\theta_s} = \frac{2N+1}{2\theta_e} \quad (4)$$

设 Δu_λ 为最短基线长度, 天线阵的孔径是基线的个数与单元基线长度 Δu_λ 的积, 即

$$D_\lambda = N\Delta u_\lambda \quad (5)$$

因此

$$\Delta u_\lambda = \frac{D_\lambda}{N} = \frac{2N+1}{2N\theta_e} \quad (\theta_e \text{ 为弧度}) \quad (6)$$

或

$$\Delta u_\lambda = 28.65 \frac{2N+1}{2N\theta_e} \quad (\theta_e \text{ 为度}) \quad (7)$$

零冗余的 6 单元阵列, $N=15, \theta_e=30^\circ$, 因此, $\Delta u_\lambda=1.97\lambda$ 。具有一定冗余的 7 单元阵列, $N=19, \theta_e=30^\circ$, 因此, $\Delta u_\lambda'=1.96\lambda$ 。由于测试频率选择在 X 波段 $f=9.4$ GHz, $\lambda=3.2$ cm, 计算得 6 单元最短基线实际长度 $\Delta u_\lambda=6.3$ cm, 7 单元最短基线实际长度 $\Delta u_\lambda'=6.27$ cm, 满足工程设计时单元天线口径的需求。

3 数值模拟结果

考虑到地面实验系统的主要科学目的是实现原理性验证, 因此稀疏孔径设计的基本原则是尽量保证基线组合的完全和可见度函数采样的完整覆盖。对 6 单元阵列进行了零冗余设计, 整个阵列获得 15 条不同长度的基线, 加上零基线, 共 16 条基线。对 7 单元阵列进行了最小冗余度设计, 设计后整个阵列应获得 19 条长度不同的基线, 加上零基线, 共 20 条基线, 系统冗余度为 9.1%。

对干涉式微波成像仪天线阵列进行稀疏孔径设

计, 减少阵列中的冗余单元, 得到尽可能完备覆盖的相干度, 构成满足设计要求的天线孔径, 是一个大规模的组合优化问题, 属全局最优化问题范畴。本文采用模拟退火法实现圆平面阵稀疏孔径设计。数值模拟时, 最长基线归一化。

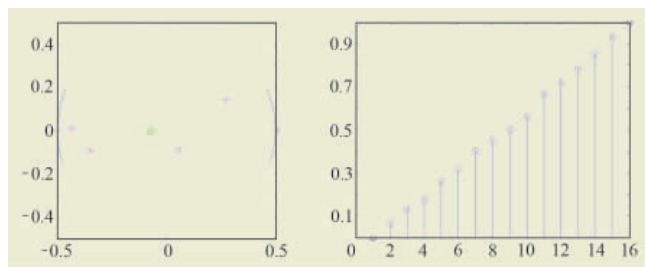
6 单元阵列设计结果如图 3 所示。可以看到, 阵列获得了 16 条基线, 缺失的基线数为零, 即冗余度为零。此外, 阵列在空间频域获得了 31 个采样点, 旋转测量后, 空间频谱图对 u, v 频域的覆盖完备。阵列单元在平面上的位置坐标为 $((0.0566, -0.0883), (0.2767, 0.1383), (-0.3495, -0.0918), (-0.5000, 0), (-0.4350, 0.0090), (0.5, 0))$ 。考虑各个天线单元的大小、重量等参数相同, 天线阵列框架重心位置坐标为 $(-0.0752, -0.0056)$ 。基线长度序列为 $(0 \ 0.0656 \ 0.1322 \ 0.1763 \ 0.2627 \ 0.3159 \ 0.4061 \ 0.4521 \ 0.5011 \ 0.5636 \ 0.6671 \ 0.7234 \ 0.7889 \ 0.8544 \ 0.9350 \ 1.0000)$ 。由 2.2 节中 6 单元阵列的 $\Delta u_\lambda=6.3$ cm, 可以计算得到各条基线的实际长度。

7 单元阵列设计结果如图 4 所示。可以看到, 阵列获得了 20 条基线, 缺失 2 条基线, 即冗余度为 9.1%。此外, 阵列在空间频域获得了 39 个采样点, 旋转测量后, 空间频谱图对 u, v 频域的覆盖比较完备。阵列单元在平面上的位置坐标为 $((0.1125, -0.0811), (0.3451, -0.0121), (-0.1125, 0.0811), (-0.3451, 0.0121), (-0.4958, 0.0013), (-0.4437, 0.0080), (0.5, 0))$ 。考虑各个天线单元的大小、重量等参数相同, 天线阵列框架重心位置坐标为 $(-0.0628, 0.0013)$ 。基线长度序列为 $(0 \ 0.0525 \ 0.0987 \ 0.1511 \ 0.1554 \ 0.2426 \ 0.2774 \ 0.3392 \ 0.3915 \ 0.3959 \ 0.4670 \ 0.5633 \ 0.6139 \ 0.6178 \ 0.6906 \ 0.7891 \ 0.8410 \ 0.8452 \ 0.9437 \ 0.9958)$ 。2.2 节中 7 单元阵列的 $\Delta u_\lambda'=6.27$ cm, 由此可以计算得到各条基线的实际长度。

4 结论

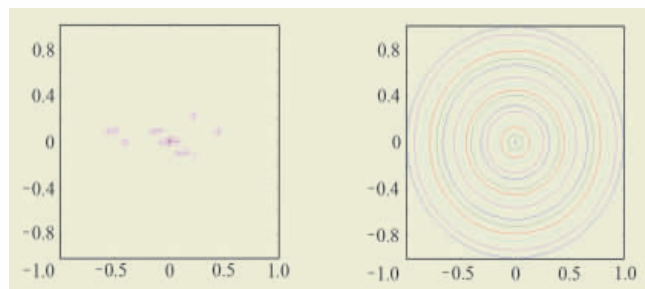
本文给出了干涉式微波成像仪地面实验系统、天线阵列的基本构成, 推导了最短基线设计的一般表达式。在此基础上, 根据地面实验系统的现有条件, 对天线阵列进行了稀疏孔径设计。由理论分析和数值模拟结果可得出如下结论。

1) 设计后 6 单元阵列获得了 15 条长度不同的基线, 加上零基线, 共 16 条。实现了天线阵列零冗余。阵列在空间频域获得了 31 个采样点, 旋转测量后得到的



(a) 阵列单元分布
(a) Distribution of array elements

(b) 基线序列
(b) Series of base lines



(c) 旋转测量前的空间频谱
(c) Spatial frequency spectrum before rotating measuring

(d) 旋转测量后的空间频谱
(d) Spatial frequency spectrum after rotating measuring

图 3 6 单元阵列零冗余设计结果

Fig. 3 Design of antenna array with 6 elements

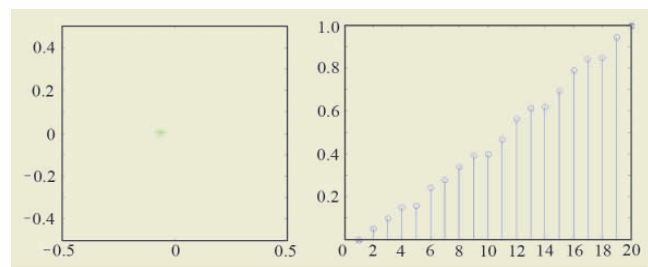
空间频谱对 u, v 频域覆盖完备。

2) 设计后 7 单元阵列获得了 19 条不同长度的基线, 加上零基础, 共 20 条, 冗余度为 9.1%。满足了交叉检验试验系统、提高可靠性的需要。此外, 阵列在空间频域获得了 39 个采样点, 旋转测量后得到的空间频谱对 u, v 频域的覆盖比较完备。

总之, 本文的工作满足了干涉式微波成像仪地面实验系统的特殊要求, 为对地观测的成像实验提供了必要的技术基础。在此基础上, 可以对现有地面实验系统适当改进, 直接用于机载对地观测, 为星载干涉式微波成像仪的方案论证、研制星载干涉式微波成像仪原理样机提供重要的理论基础。

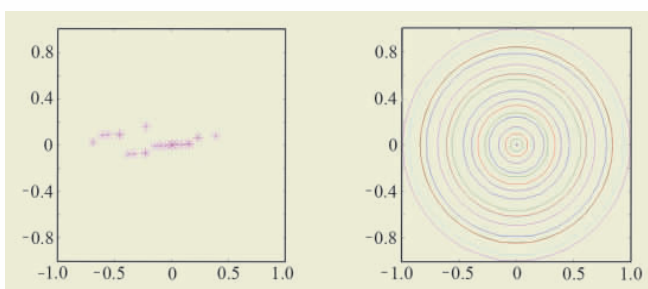
参考文献 (References)

- [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 on Geosci and Remote Sense, 1988, 26(5): 598–611.
- [2] JACKSON T J, LEVINE D M, GRIFFIS A J, *et al.* Soil moisture and rainfall estimation over a semiarid environment with the ESTAR microwave radiometer [J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sense, 1993, 31(4): 536–541.
- [3] PEICHL M, SUESS H, SUESS M. Microwave imaging of the brightness temperature distribution of extended areas



(a) 阵列单元分布
(a) Distribution of array elements

(b) 基线序列
(b) Series of base lines



(c) 旋转测量前的空间频谱
(c) Spatial frequency spectrum before rotating measuring

(d) 旋转测量后的空间频谱
(d) Spatial frequency spectrum after rotating measuring

图 4 7 单元阵列非零冗余设计结果

Fig. 4 Design of antenna array with 7 elements

in the near and far field using two-dimensional aperture synthesis with high spatial resolution [J]. Radio Science, 1998, 33(3): 787–801.

- [4] DONG Xiaolong, WU Ji, ZHU Suyun, *et al.* Design and implementation of CAS C-band interferometric synthetic aperture radiometer[C]//Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2000, 2: 866–888.
- [5] LIU Hao, WU Ji, BAN Shouzheng, *et al.* The CAS airborne X-band synthetic aperture radiometer: System configuration and experimental results[C]//Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2004, 3: 2230–2233.
- [6] 黄永辉, 吴季. 二维综合孔径微波辐射计成像理论与方法研究[J]. 电子学报, 2002, 30(5): 697–701.
HUANG Yonghui, WU Ji. Study on image theory of high resolution two-dimensional synthetic aperture microwave radiometer[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(5): 697–701.
- [7] 黄永辉. 综合孔径成像微波辐射计反演算法及实验研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2001.
HUANG Yonghui. Study on reversion algorithm and experiment of two-dimensional synthetic aperture microwave radiometer[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2001.

(责任编辑 朱宇)