

二维综合孔径微波辐射计圆环结构天线阵及其稀疏方法

何宝宇, 吴 季

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 国家863计划微波遥感技术实验室, 北京8701信箱, 北京100080)

摘 要: 本文介绍了圆环天线阵二维综合孔径微波辐射计的测量原理和反演算法, 并通过模拟退火算法讨论了两种二维综合孔径微波辐射计圆环阵的稀疏方案, 一种方案利用天线旋转, 在半圆周上稀疏天线; 另一种方案通过将空间频率采样点的均匀分布作为优化的约束条件, 在全圆周上稀疏天线. 结果显示两种设计较传统设计均有改进之处. 对于半圆周天线而言, 在积分时间允许的条件下, 通过天线旋转与分时测量, 天线阵可进一步稀疏. 对于全圆周天线而言, 与Y形天线阵结构相比, 在同样的空间频率覆盖范围内, 全圆周天线阵使天线单元数达到了最优.

关键词: 二维综合孔径微波辐射计; 稀疏天线阵; 退火算法

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)09-1607-04

Optimization on Circular Thinned Array for Two-Dimensional Synthetic Aperture Microwave Radiometer

HE Bao-yu, WU Ji

(Center for Space Science and Applied Research, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: The study on image theory and the retrieving algorithm of two dimensional synthetic aperture microwave radiometer with circular antenna array is presented. Based upon simulated annealing algorithm, we will discuss two solutions of obtaining the ideal thinned array. One solution uses half circle configuration with very much reduced number of elements and taking an image by rotating the array. The other solution selects element positions around the full circle to provide a roughly uniform coverage in the spatial frequency domain. The results show that both solutions have improved characteristics over the conventional design. For the half circle case, if the integration time allows, with the rotation of the array and the limited time shared measurements the number of elements can be further reduced to a great extent. For the full circle case, the array can be thinned up to the least redundant number, which can never be reached by the most popular Y shaped array configuration under same spatial frequency coverage constraint.

Key words: 2D synthetic aperture radiometer; thinned array; simulated annealing

1 引言

为获得应用需要的空间分辨力, 通常微波辐射计天线孔径的物理尺寸较大. 综合孔径微波辐射计的出现为解决这一问题提供了可行的方案. 综合孔径技术是将小孔径天线在不同位置上的测量结果相干叠加, 达到与大孔径天线相同的测量结果. 进行干涉测量的两个小孔径天线构成二元干涉仪, 二元干涉仪二个单元天线之间的距离矢量称为基线. 二元干涉仪的瞬时输出和发射源的辐射亮温在远区满足 Fourier 变换. 利用空间复频域表示基线, 基线与频域上的点一一对应, 称这些点为空间频率采样点, 因此也将综合孔径微波辐射计的测量过程称为空间频率的采样, 将二元干涉仪输出值定义为可见度函数(Visibility Function) V , 有

$$V = \iint_{\text{视场}} v_1(x, y) v_2^*(x, y) dx dy = C \iint_{\text{视场}} f(x, y) T(x, y) e^{-jk\Delta R} dx dy \quad (1)$$

其中 v_1 与 v_2 分别为两个接收天线通过相干本振混频、中频放大后的输出电压, $f(x, y)$ 为两个天线的方向图函数的乘积, $T(x, y)$ 为观测视场内的辐射亮温分布, $k = 2\pi/\lambda$, ΔR 是两单元天线与观测点之间的距离差, C 为与基线长度、信道增益、被测区辐射功率到辐射亮温的转换因子等因素相关的常数.

一维综合孔径微波辐射计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力的进一步提高. 因此需要开展利用二维综合孔径技术直接成像的研究. 成像算法和基线组合的优化

是二维综合孔径微波辐射计的两个关键技术。

目前二维综合孔径微波辐射计的天线阵单元分布结构有 Y 形、U 形、十字形等。较有代表性的有欧空局 MIRAS 计划中采用的 Y 形结构^[1]。Y 形结构对应的空间频率采样点分布均匀,对常规反演成像算法很有帮助,但由于以上方案均为非最小冗余设计,它们的辐射单元和接收机信道数目较多,天线尺寸较大。相应增加了研制费用,对星载应用加大了发射难度。本文将探讨圆环天线阵结构,并介绍通过天线阵的旋转和分时测量稀疏天线阵的方案。

设综合孔径微波辐射计有 N 个天线单元,各单元间两两组合,最佳情况的组合数为 C_N^2 。考虑到空间频率采样点的对称分布及零频点,空间频率采样点个数最多可达到 $2C_N^2 + 1 = N^2 - N + 1$ 。一维综合孔径微波辐射计由于天线单元线性排布的限制,无法达到零冗余(即没有一条基线是重复的),而二维综合孔径微波辐射计的天线单元在平面内分布,有可能实现零冗余。

2 亮温图像反演基本原理

圆环结构天线测量时,对不同基线的输出电压进行分组编号,由式(1)得各基线输出 $V(m)$ (其中: $m = 0, 1, 2, \dots$) 为

$$V(m) = C_m \iint_{\text{视场}} f(m, x, y) T(x, y) e^{-jk\Delta R} dx dy \quad (2)$$

将 C_m 改写为 $C_m = C_0 a_m$, 其中 C_0 是与基线无关的常量, a_m 代表了各基线间的差异,将 a_m 代入积分式内,由式(2)得式(3)

$$V(m) = C_0 \iint_{\text{视场}} a_m f(m, x, y) T(x, y) \cdot e^{-jk\Delta R} [\cos(k\Delta R) + i \sin(k\Delta R)] dx dy \quad (3)$$

为反演出式(3)中的 $T(x, y)$, 工程应用中将积分式近似为叠加和并以矩阵形式进行求解。考虑到 $V(m)$ 为复数形式不便计算,将其实部和虚部在矩阵中分为两行表示。转化后用矩阵形式表示的方程如式(4)。

$$V_k = C_0 \sum_{i=1}^{N \times N} G_{ki} T_i \quad (4)$$

其中 V_k 为基线输出, T_i 为观测区域亮温矩阵。基线输出的实部和虚部分成两行表示:

$$k = 2m + 1 \text{ 时, } G_{ki} = \alpha f(m, x, y) \cos[k\Delta R] dx dy \quad (5a)$$

$$k = 2m \text{ 时, } G_{ki} = \alpha f(m, x, y) \sin[k\Delta R] dx dy \quad (5b)$$

当构成不同基线的所有天线单元完全一致时,天线方向图函数相等, $f(x, y)$ 将为可测量的数值,式(4)的算术解可采用式(6),该式证明参见文献[2~4]。

$$T_i = \left\{ G_{ki}^T G_{ki} G_{ki}^T \right\}^{-1} V_k \setminus C_0 \quad (6)$$

对于综合孔径微波辐射计而言,天线单元的自相关同样可用于亮温图像的反演,天线单元自相关可看作二元干涉仪 ΔR 等于零的特殊形式。此时由式(5b)可知,自相关输出电压虚部为零。

3 稀疏天线的设想

由于观测目标位于天线的远场,在空间几何位置相同的

两个天线单元之间进行相关测量时,结果应该是相同的,这就为稀疏天线阵提供了条件。

简化后的天线和空间频率采样点的分布需满足如下条件:

- (1) 空间频域的全覆盖均匀采样。
- (2) 在满足条件 1 时,天线单元数量最小。
- (3) 天线单元分布在圆周上。

以 16 单元均匀分布天线阵为例,它的非零基线的长度数为 8,理论要求最简天线阵单元数不小于 $5(n * (n - 1) / 2) \geq 8 = > n \geq 5$, n 为整数),即最多可从满阵为 16 的天线阵中去掉 11 个单元,考虑圆的对称性,5 单元的稀疏方案有多种,下面以两种方案为例。

通常情况下,当余下的天线单元分布在整个圆周上时,频率采样点比较分散,如图 1。天线单元分布在半圆上时,频率采样点较集中,如图 2 所示。

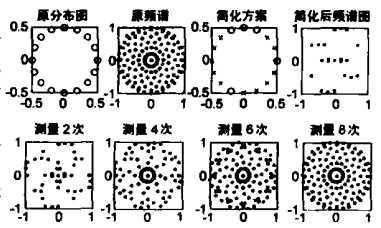


图 1 天线单元分布在圆周上

为了让简化后的天线阵测量时达到简化前的效果,需采用分时旋转测量的方法。对满阵为 16 单元的天线阵列,由于频域采样点相对于原点对称,所以最多只需旋转测量 8 次,简化后的天线阵列即可获得与满阵时相同的频域采样。

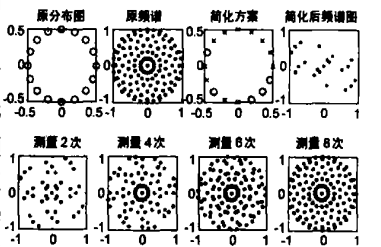


图 2 天线单元分布在半个圆周上

4 稀疏天线方案

下面重点讨论两种分布形式:

(1) 天线单元分布在半圆周上,要求基线达到无冗余,空间频率采样可以不均匀,但利用天线的旋转测量达到均匀分布。

(2) 天线单元分布在圆周上,要求基线无冗余,且使空间频率采样点尽量分布均匀。

设 r_i 是第 i 个天线的位置矢量, k 为天线单元所有可能放置的位置集合, n 个天线单元位置矢量组成集合 $m(r_1, r_2, r_3, \dots, r_n)$ 。天线单元的位置选择问题转换为使矢量集合 $m(r_1, r_2, r_3, \dots, r_n)(r_i \in k, i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 最优的问题。

虽然看起来只是一个简单的优化问题,但由于各天线单元无优先权之分,且各单元的位置取值范围大,从而使问题变得复杂。由于局部极值的存在,传统的渐进法不易求出全局最优值,因此用模拟退火法^[5~7]解决此问题。

模拟退火算法的计算过程如下:(1)如果新方案优于现方案,接受新方案;(2)如果劣于现方案,接受的可能性将取决于

退火变量的选取. 开始搜索时退火变量取值较大, 以去除局部最优值的干扰, 搜索过程中逐渐减小退火变量值, 最终获得全局最优值.

4.1 半圆周稀疏方案

由于圆的对称性,

均匀分布圆环阵所有基线的长度数(不考虑其方向)在半圆的周内即可实现, 图 3 以 8 单元天线阵为例说明简化步骤.

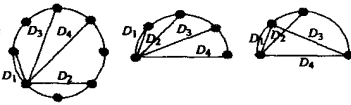


图 3 相同基线长度数的三种圆环方案

由前节知, 当天线单元集中在半圆周上时空间频率采样点较集中, 不但有利于旋转, 且天线物理孔径减半, 本小节讨论在半圆周上稀疏均匀分布圆环阵方法.

设均匀分布圆环阵共有 N 个非零基础线长度, 将各基线长度表示成 D_1, D_2, \dots, D_N , 零基础线表示为 D_0 , 稀疏后的天线单元个数为 n , 利用的模拟退火算法对天线单元的分布进行优化. 具体步骤如下:

(1) 记均匀分布半圆天线阵天线单元位置为 $p_0, p_1, p_2, \dots, p_{n-1}$

\dots, p_N , 为最大限度利用孔径尺寸, 在 p_0, p_N 处放置天线单元, 得到基线长度 D_0, D_N . 为得到长度为 D_{N-1} 的基线, 在 p_1 处放置天线单元(也可在 p_{N-1} 处放置, 由于圆的对称性, 这两个位置对于 p_0, p_N 完全一致). 由此可确定三个基线长度以及三个天线单元位置.

(2) 将余下 $n-3$ 个单元随机放置在余下的 $N-2$ 个位置 (p_2, p_3, \dots, p_{N-1}) 中, 如果该放置方法并未包括所有基线长度, 则从 $n-3$ 个单元中任意选取一单元, 变动此单元位置到 (p_2, p_3, \dots, p_{N-1}) 中任意一个尚未放置天线单元的位置. 设 k_0 是变动前缺省的基线长度数, k 是变动后缺省的基线长度数, 如果 k 大于 k_0 , 则此种变动被接受, 如果 k 小于或等于 k_0 , 接受可能性取决于式(7)是否成立, 如果变动后式(7)满足, 则接受此变动.

$$e^{(k_0 - k)/T} > x \tag{7}$$

其中 T 是退火变量, x 是均匀分布在 0 到 1 之间的随机变量,

下表给出剩余天线单元数在 4 到 11 之间的最优半圆周稀疏方案.

表 1 半圆周天线单元结构分布图

n	天线单元位置(度)	基线长度个数(不含零基础线)
4	0 30.0 120.0 180.0	6
5	0 20.0 80.0 140.0 180.0	9
6	0 13.8 27.7 83.1 138.5 180.0	13
7	0 10.1 21.2 63.5 105.9 148.2 180.0	17
8	0 7.8 31.3 78.3 125.2 140.9 164.3 180.0	23
9	0 6.2 18.6 37.2 80.7 124.1 149.0 180.0	29
10	0 5.0 15.0 30.0 65.0 100.0 135.0 155.0 175.0 180.0	36
11	0 4.2 12.6 25.1 54.4 83.7 113.0 142.3 159.1 175.8 180.0	43

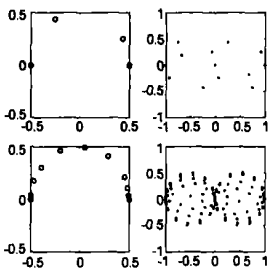


图 4 半圆周天线单元结构分布及其频谱图

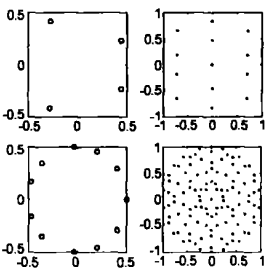


图 5 全圆周天线单元结构分布及其频谱图

将表 1 中 n 等于 4 和 11 的结果图形化后, 其结构分布及

对应频谱如图 4(天线孔径和空间频率均作归一处理), 左图为天线结构分布, 右图为其对应的频谱图.

4.2 全圆周稀疏方案

在全圆上放置天线单元时, 为得到尽可能多且分布均匀的空间频率点, 采用使空间频率采样点之间距离最大的法则. 反演图像在某一方向的分辨力由该方向上的空间频率最大值决定, 最大值确定后, 其余频率采样点需满足 Parseval 定律.

为使空间频率点分布最优, 首先要求各单元组合无冗余, 然后要求各频率点之间距离最大. 为强化相邻点间的作用, 以频率点距离的对数代替通常距离的平方根.

引入向量 $u_{i,j} = r_i - r_j (i, j = 1, 2, \dots, n)$

表 2 全圆周单元结构分布图

n	天线单元位置(度)	空间频率采样点个数(含零频)
4	28.0 - 28.0 124.0 - 124.0	13
5	0.0 72.0 - 72.0 144.0 - 144.0	21
6	40.0 - 40.0 80.0 - 80.0 160.0 - 160.0	31
7	0.0 53.0 - 53.0 98.4 - 98.4 158.8 - 158.8	43
8	0.0 36.4 - 36.4 - 99.0 99.0 126.6 - 126.6 - 180.0	57
9	0.0 35.0 - 35.0 85.0 - 85.0 120.0 - 120.0 155.0 - 155.0	73
10	0.0 43.7 - 43.7 64.4 - 64.4 101.6 - 101.6 150.8 - 150.8 - 180.0	91
11	0.0 35.5 - 35.5 66.0 - 66.0 93.7 - 93.7 136.3 - 136.3 160.5 - 160.5	111

参考对象表示成

$$m(r_1, r_2, \dots, r_n) = \sum_{i,j,k,l} \log(1 + |u_{i,j} - u_{k,l}|) \quad (8)$$

与半圆周情况相仿,任意设定各位置矢量的初值,可计算出当前的 m 值,设其值为 k_0 ,变动其中任意一个天线单元的位置,即改变任意 r_i ,得到变动后的 m 值 k ,同样设定退火变量 T ,随机变量 x ,与半圆周不同的是 k 大于或等于 k_0 的方案将被采纳,小于 k_0 的方案接受与否取决式(7)是否成立(需交换式(7)中 k 与 k_0 的位置)。

表 2 给出天线单元数在 4 到 11 之间全圆周稀疏方案。

将表 2 中 n 等于 4 和 11 的结果图形化后,其结构分布及对应频谱如图 5(天线孔径和空间频率均作归一处理),左图为天线结构分布,右图为其对应的频谱图:

5 结论

作为综合孔径微波辐射计中的一项关键技术,基线的排布或稀疏天线阵列结构的问题一直是人们关注的重点。本文利用模拟退火算法提出了两种圆环天线基线分布方案。

(1)半圆周分布方案,此方案结构简单,对于观测具有方向性分布的亮温图像具有优势。结合卫星平台的旋转和圆环结构的对称性,此方案也可按照一般二维综合孔径微波辐射计的工作原理进行工作。

(2)全圆周分布方案,此方案与天线单元均匀分布方案相比,空间频率点的分布更优,反演图像的效果更好。在积分时间短及其它不适宜旋转的场合,此种方案值得选择。

圆环天线结构相对简单,工程上容易实现,在完善定标、数字相关器等相关技术后,必将成为星载微波辐射计的一个重要发展方向。

参考文献:

[1] M Martir Neira, P Pironen, S Ribo, E Panaro, J Font Rossello. The MIRAS demonstrator pilot project towards SMOS[J]. ESA Bulletin, 2002, 111(3): 123- 131.

- [2] C L Lawson, R J Hanson. Solving least squares problems[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1974.
- [3] S L Campbell, C D Meys. Generalized inverse of linear transformations [M]. New York: Dover, 1979.
- [4] Le Vine, D M Andrew J Griffis, Calvin T Swift, Thomas J Jackson. ES TAR: A synthetic aperture microwave radiometer for remote sensing applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(12): 1787- 1801.
- [5] S Kirpatrick, C D Gelatt Jr, M P Vecchi. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671- 680.
- [6] C S Ruf. Numerical annealing of low-redundancy linear arrays[J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 1993, 41(1): 85- 89.
- [7] T J Cornwell, A novel principle for optimization of the instantaneous Fourier plane coverage of correlation arrays[J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 1988, 36(8): 1165- 1167.

作者简介:



何宝宇 男, 1979 年 1 月生于湖北省巴东县, 2000 年毕业于中央民族大学物理系, 2003 年获中科院空间科学与应用研究中心硕士学位, 现为中科院空间中心研究实习员, 主要从事微波遥感传感器系统研制及信号处理方面的研究工作。
E-mail: hby@nms.ac.cn.



吴季 男, 1958 年 4 月生于北京, 北京邮电大学电磁场与微波技术专业硕士, 丹麦技术大学电磁所博士, 博士后, 现为中科院空间科学与应用研究中心研究员, 博士生导师, 中国空间科学学会常务理事, IEEE 高级会员, 主要从事电磁场理论, 微波天线技术, 空间探测技术以及微波遥感技术等方面的研究工作, 近年来负责研制成功了综合孔径成像微波辐射计, 主要用于土壤湿度的机载和星载遥感。