

二维综合孔径辐射计中的稀疏天线布局

胡岸勇, 苗俊刚

(北京航空航天大学电子信息工程学院电磁工程实验室, 北京 100083)

摘要:介绍了二维综合孔径辐射计的成像原理、反演算法和天线优化布局的基本思想,并用模拟退火算法对两种类型的天线布局做了优化仿真。其一是针对圆形区域内分时旋转的测量方式,根据两种不同的设计思想得到了两种不同的天线优化布局结果,并对其进行了试验验证;其二是提出了新型的非规则随机天线布局的方法,并以 T 形条带区域的天线优化布局为例,对其进行了优化计算和成像仿真。

关 键 词:二维综合孔径辐射计;模拟退火算法;稀疏天线布局

中图分类号:TH 765.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-0323(2007)02-0158-04

1 引言

干涉式辐射计测量的是不同天线接收信号的复相关值,这些复相关值是可视度函数的采样,它在可视度平面上的位置由这两个天线位置所形成的基线所确定。基线是指由一个天线位置指向另一个天线位置所形成的以波长归一化的向量。修正亮温与可视度函数在远场条件和傍轴近似下是傅立叶变换对的关系,即可视度函数是修正亮温的二维傅立叶变换^[1~3]。因此,由傅立叶变换的性质可知系统的角分辨率取决于最长基线,系统的不混叠成像视场角取决于平均基线间隔。当天线布置成规则阵列时,如 T 形、Y 形、U 形等^[4~7],其可视度采样点分布在规则的网格点上,可用快速傅立叶算法反演成像。然而规则天线布阵所需的接收单元数目大多系统复杂,且基线存在大量的冗余造成一定的资源“浪费”。在保证一定的成像质量的情况下,为了节约成本和降低系统复杂性,可以采用稀疏天线布局的方式,在场景变化缓慢和成像实时性要求不高的情况下,还可以采用分时旋转的测量方式。

当天线采用完全随机布局时,其可视度采样点不是分布在规则网格点上,为了利用快速傅立叶算法反演成像,需先用插值算法得到规则网格点上的可视度值。插值算法的精度和稳定性不但与插值方法有关,而且与可视度采样点的分布形式和平均采样密度有关。一般来说,可视度采样点平均密度越

大、分布越均匀,插值算法的效果就越好^[8~11]。对稀疏天线布局来说,在系统角分辨率和天线数目确定的情况下,可视度采样点的平均密度就确定了,为了增加可视度采样点的平均密度,可以采用分时旋转的测量方式。另一种稀疏天线布局的思想是把天线约束在规则的网格点上,即非规则随机天线布局。因为天线限制在规则网格点上,所以得到的可视度值也分布在规则的网格上而且是精确的测量值,大量减少了需要插值的可视度数目,大大提高了插值算法的速度和精度。

2 模拟退火算法简介

模拟退火算法^[12]是一种对 NP 完全组合优化问题的有效近似。它源于对固体退火过程的模拟,用 Metropolis 接受准则,并用一组称为冷却进度表的参数控制算法的过程,使算法在多项式时间内给出一个近似解。模拟退火算法用控制参数 t 的一个递减有限序列 $\{t_k\}, k=0, 1, 2, \dots$ 以及对应的链长 L_k 的有限长齐次 Mapkob 链序列去控制算法过程。这些参数集称为一个冷却进度表。一个冷却进度表包括 4 个主要参数:控制参数 t 的初始值 t_0 、控制参数 t 的衰减函数,控制参数 t 的终值 t_f 、Mapkob 的链长 L_k 。使用模拟退火算法的基本步骤是:①构造出能反映问题最优化的目标函数;②根据目标函数设计温度下降表的各种参数,如初始温度、温度下降的速度和链长等;③根据设计好的参数,折中计算时间和

优化精度进行迭代计算并对优化的结果进行分析。

3 圆形区域内旋转方式的天线布局

我们分析两种稀疏布局方式。第一种是用少量天线布局通过多次旋转逼近大量天线在圆域内最优布局的效果。在区域内以可视度采样点尽量均匀分布为目标函数的大量天线布局优化结果是天线趋于

圆周上的均匀分布^[13],因此可以用圆周上的均匀分布来近似圆域内的最优布局,考虑到允许天线阵旋转,可以去掉圆周上形成冗余基线的天线,从而形成一种圆周上的稀疏天线布局。我们以10根天线在半径为0.5 m的圆上的稀疏布局为例来说明,优化布局结果如图1所示。

由图可知,10根天线经过25次等角度旋转以

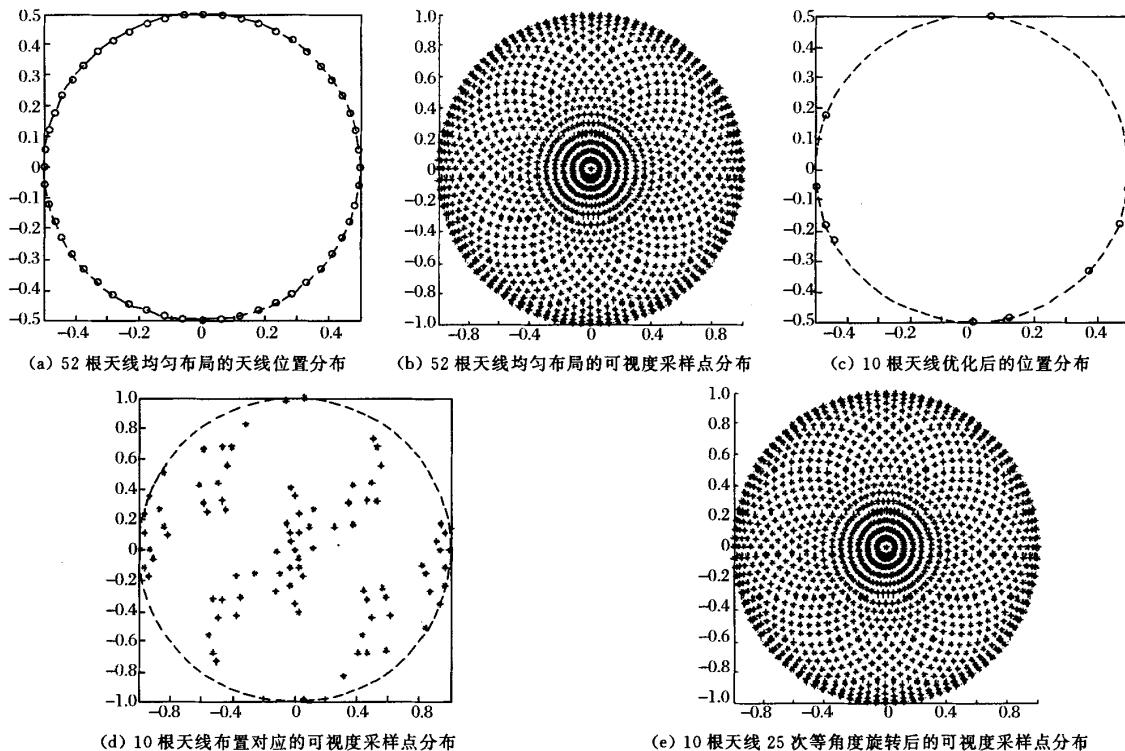


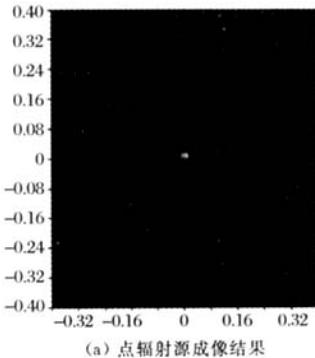
图1 10根天线在圆周上25次旋转的优化布局结果

Fig. 1 Optimum locations of ten antennas on the circle after twenty-five rotations

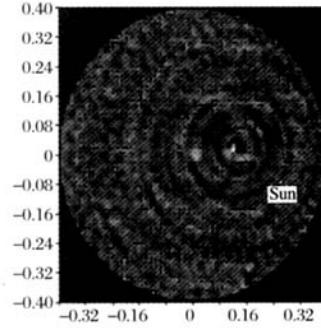
后完全达到了52根天线均匀布局的效果。以此天线布局用8 mm波段干涉式辐射计对点源和太阳场景分别进行了成像试验,其中点辐射源用匹配负载、低

噪声放大器和天线来模拟,位于辐射计正前方,其实验结果如图2所示。

第二种是对圆域内的最优天线布局方法附加上



(a) 点辐射源成像结果

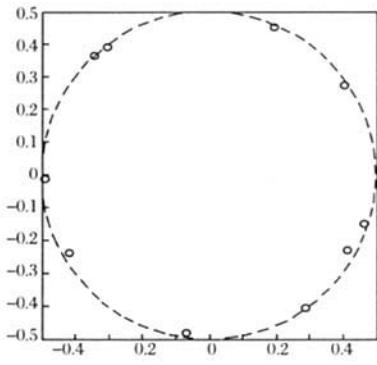


(b) 太阳成像结果

图2 点辐射源和太阳成像结果

Fig. 2 Experiment results of the point-source and the sun

旋转条件的一个推广,即约束天线在圆域内随机分布和一定的旋转次数,要求旋转以后的可视度采样点尽量均匀分布,其数学描述如下:设有 N 根天线随机分布在区域 Ω 内,旋转 M 次,第 i 次旋转时天线的位置分布为 $r_1^i, r_2^i, \dots, r_N^i, r_m^i \in \Omega, m=1, 2, \dots, N, i=1, 2, \dots, M$ 。对任意两个天线 k, l 其在第 i 次旋转时形成的基线为 $u_{k,k}^i = r_k^i - r_l^i$, 设任意两个天线能安置到的最短距离为 d , 且这个距离不随旋转而发生变化, 即 $d = \min_{i \neq j} \{ |r_i^i - r_j^i| \}$ 。则由这 NM 个天线位置 $(r_1^i, r_2^i, \dots, r_N^i, r_m^i \in \Omega, m=1, 2, \dots, N, i=1, 2, \dots, M)$ 变量形成的目标函数可表述为:



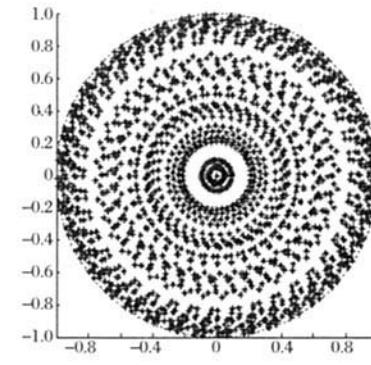
(a) 10 根天线优化后的位置分布

$$\begin{cases} f(r_1^i, r_2^i, \dots, r_N^i) = -\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{m,n,k,l} \log(|u_{m,n}^i - u_{k,l}^i|) \\ r_m^i \in \Omega, m=1, 2, \dots, N; i=1, 2, \dots, M \\ \min\{|r_i^i - r_j^i|\} \geq d, i \neq j \end{cases}$$

我们以 $N=10, \Omega$ 为半径是 0.5 m 的圆、 $d=0.02$ m 和等角度旋转 19 次的情形为例进行说明, 优化布局结果如图 3 所示。

4 T 形条带区域内的非规则天线布局

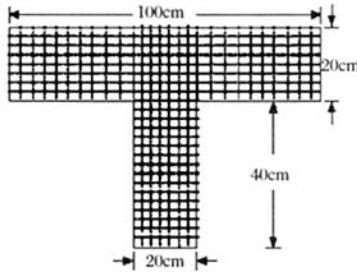
由上述可知, 如果对天线的分布位置不再附加其它约束时, 优化得出的可视度采样点整体上是均



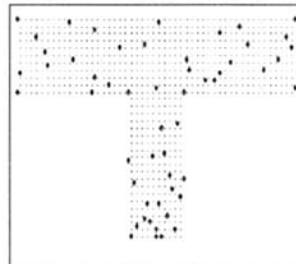
(b) 10 根天线 19 次等角度旋转后的可视度采样点分布

图 3 10 根天线在圆域内 19 次旋转的优化布局结果

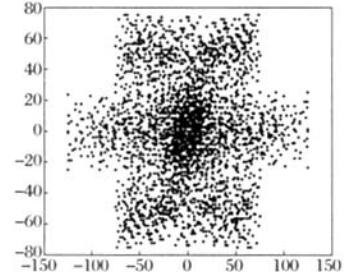
Fig. 3 Optimum locations of ten antennas inside the circle after nineteen rotations



(a) T 形条带区域

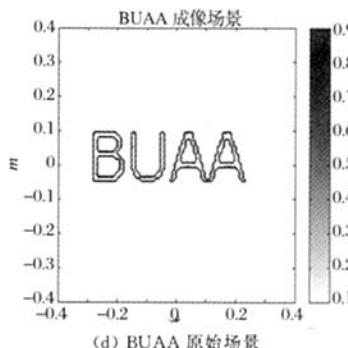


(b) 54 根天线优化后的位置分布

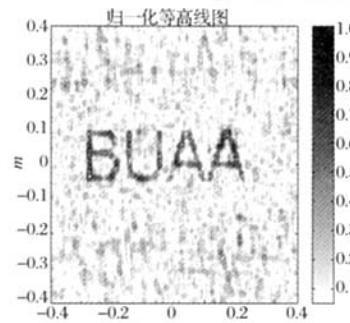


(c) 54 根天线对应的可视度采样点分布

归一化等高线图



(d) BUAA 原始场景



(e) BUAA 成像结果

图 4 T 形条带区域内的天线优化布局及成像仿真结果(仿真条件:信号中心频率为 36.05 G, 带宽为 50 M, 空缺的可视度采样点未插值)

Fig. 4 Optimum locations inside the T-shape area and the corresponding simulation results

匀分布而细节上是随机分布的,需先使用插值算法得到规则网格点上的可视度值,再用快速傅立叶算法反演成像。为了减少需要插值的可视度点数,提高插值的速度和精度,可以采用非规则随机天线布局的方式,即约束天线只能分布在一些规则的网格点上。我们以图4(a)所示的T形条带区域、天线分布在1 cm的规则网格点上、天线之间的最小距离为2 cm等为约束条件,以可视度采样点尽量均匀和尽量少的冗余为目标函数对54个天线的非规则随机布局做了优化仿真。优化布局和成像仿真的结果如图4所示。

5 结语

作为综合孔径辐射计中的一项关键技术,天线的优化布局一直是人们关注的重点。本文研究了两种类型的天线优化布局方式:一是圆域内旋转方式的优化布局,此种布局采用分时测量的方式,可以进一步节约系统成本和降低系统复杂性。二是T形条带内的非规则优化布局,此种布局方式可以减少插值计算的点数从而节省了计算时间和提高了成像质量。另外,T形带状区域的形状容易与飞机共形,将非常适合于机载辐射计。

参考文献:

- [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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(5): 597-611.
- [2] Adriano Camps, Ignasi Corbella, Javier Bara, Francesc Torres. Radiometric Sensitivity Computation in Aperture Synthesis Interferometric Radiometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(2).
- [3] Le V D, Hilliard L M, Swift T, et al. A Synthetic Aperture Microwave Radiometer To Measure Soil Moisture and Ocean Salinity from Space[A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1991. IGARSS '91. 'Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management[C]. 1991, 2: 975-978.
- [4] William Wilson, Alan Tanner, Todd Gaier. GeoSTAR-A Synthetic Aperture Approach for A Geostationary Microwave Sounder [A]. IEEE Aerospace Conference Proceeding[C]. 2004.
- [5] Borges A, SMOS-PLM Team. SMOS Mission & MIRAS Instrument Synthetic Aperture Radiometer in Space[A]. 34th European Microwave Conference-Amsterdam[C]. 2004.
- [6] Helmut Suess, Reinhard Schroeder, Markus Peichl, et al. Possible Military Requirements and Application of Active and Passive Imaging Sensors at Micro-and Millimeterwave Frequencies[A]. IEEE, 2002.
- [7] Brian Laursen, Niels Skou. A Spaceborne Synthetic Aperture Radiometer Simulated by the TUD Demonstration Model [A]. IEEE, 1994.
- [8] Kung Yao, John B Thomas. On Some Stability and Interpolatory Properties of Nonuniform Sampling Expansions[J]. IEEE Transactions On Circuit Theory, 1967, CT-14(4): 404-408.
- [9] Landau H J. Sampling, Data Transmission and the Nyquist Rate[A]. Proceedings of the IEEE[C]. 1967, 55(10).
- [10] James J, Clark Matthew R, Palmer Peter D, et al. A Transformation Method for the Reconstruction of Functions from Nonuniformly Spaced Samples [J]. IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1985, ASSP-33(4).
- [11] Yen J L. On Nonuniform Sampling of Bandwidth-limited Signals[J]. IRE Transaction on Circuit Theory, 1956.
- [12] 唐焕文,秦学志.实用最优化方法[M].大连:大连理工出版社,2004.
- [13] Cornwell 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).

Thinned Array On 2D Synthetic Aperture Radiometer

HU An-yong, MIAO Jun-gang

(Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The Imaging theory, retrieving algorithm and principle of thinned array of two dimensional synthetic aperture radiometer are presented, and based upon simulated annealing algorithm, two kinds of optimized thinned array are obtained. One is the array restricted in the circle area with rotating, and the other is the array restricted in T-strip area with the restriction that the antennas must be on the regular grids. Experimentation and simulation results proved that these kinds of thinned array are practical.

Key words: 2D synthetic aperture radiometer, Simulated annealing, Thinned array

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>