



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102567573 B

(45) 授权公告日 2014. 05. 21

(21) 申请号 201110405375. 2

(22) 申请日 2011. 12. 08

(73) 专利权人 中国科学院国家天文台

地址 100012 北京市朝阳区大屯路甲 20 号

专利权人 清华大学

(72) 发明人 苏彦 周建峰

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任

公司 11021

代理人 周国城

(51) Int. Cl.

G06F 17/50 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102055512 A, 2011. 05. 11,

US 5764954 A, 1998. 06. 09,

Y. Su, et al.. Optimization of

interferometric array configurations by “sieving” u - v points. 《Astronomy & Astrophysics》. 2004, 第 414 卷 (第 1 期), 第 389-397 页 .

审查员 焦月

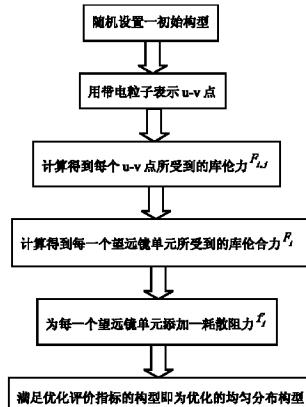
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种优化综合孔径阵构型的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种优化新型综合孔径阵构型的方法。综合孔径阵成像技术是实现极高分辨率天文观测的有效手段,对研究宇宙中一些天体如活动星系核、X 射线双星等起着至关重要的作用;综合孔径阵的构型直接影响着成像的质量,因此构型的优化设计对建设大型的综合孔径阵十分关键。本优化方法首次将库伦场的概念引入到优化设计中,库伦力的作用促使阵构型向优化的方向演化,通过设置额外的耗散力,最终得到最优化的阵构型。库伦场的引入使得阵构型的优化设计更为精确,并大大降低优化的计算量。另外,本优化方法首次将势能作为评价综合孔径阵构型优劣的指标,使得将阵构型的优化建立在合理的物理基础之上。



1. 一种优化综合孔径阵构型的方法,其特征在于,所述综合孔径阵具有 N 个望远镜单元,所述 N 个望远镜单元具有  $N*(N-1)$  个 u-v 点,其中,每个望远镜单元对应  $2*(N-1)$  个 u-v 点,该方法包括以下步骤:

为所述具有 N 个望远镜单元的综合孔径阵随机设置一初始构型;

使用一个带电粒子来表示所述  $N*(N-1)$  个 u-v 点中的每一个;

计算得到每个 u-v 点所受到的库伦力  $F_{i,j}$ ,其中  $F_{i,j}$  表示第 i 个望远镜单元与第 j 个望远镜单元对应的 u-v 点所受的库伦力;

根据所述每个 u-v 点所受到的库伦力  $F_{i,j}$  计算得到每一个望远镜单元所受到的库伦合力  $F_i$ ;

为每一个望远镜单元添加一耗散阻力  $f_i$ ;

计算优化评价指标,所述优化评价指标达到某一条件时的构型即为优化的均匀分布构型;

所述优化评价指标为整个系统的库伦势能;

所述整个系统的库伦势能达到最小时的构型即为优化构型,所述整个系统的库伦势能为所有 u-v 点之间距离的倒数和,即

$$M_c = \sum_{i,j,k,l} \frac{1}{|r_{i,j} - r_{k,l}|},$$

其中,  $r_{i,j}$  和  $r_{k,l}$  为 u-v 点的位置坐标。

2. 如权利要求 1 所述的优化综合孔径阵构型的方法,其特征在于,所述带电粒子为带单位正电荷的粒子。

3. 如权利要求 1 所述的优化综合孔径阵构型的方法,其特征在于,所述带电粒子由于库伦力的作用互相排斥,但又被限制在一个固定区域内。

4. 如权利要求 1 所述的优化综合孔径阵构型的方法,其特征在于,所述每一个望远镜单元所受到的合力作用  $F_i$  表示为:

$$F_i = \sum_{j=1}^N (F_{i,j} + F_{j,i}) \quad j \neq i$$

5. 如权利要求 1 所述的优化综合孔径阵构型的方法,其特征在于,所述耗散阻力的大小正比于望远镜单元的移动速度,所述耗散阻力的方向与望远镜单元的移动速度相反,即所述耗散阻力表示为:

$$f_i = -\lambda v_i,$$

其中,  $v_i$  为第 i 个望远镜单元的移动速度,  $\lambda$  为耗散系数,设为常数。

6. 如权利要求 1 所述的优化综合孔径阵构型的方法,其特征在于,所述望远镜单元在库伦合力与耗散阻力的作用下发生移动。

7. 如权利要求 1 所述的优化综合孔径阵构型的方法,其特征在于,所述方法还能够获得 Gauss 型的 u-v 分布。

8. 如权利要求 7 所述的优化综合孔径阵构型的方法,其特征在于,所述获得 Gauss 型的 u-v 分布的步骤为:

将 Gauss 型负能量势井  $M_g$  与库伦势能结合作为优化评价指标以获得 Gauss 型的 u-v 分

布,其中,  $M_g$  表示为:

$$M_g = -k_g e^{-r_{i,j}^2/\sigma^2},$$

其中,  $k_g$  和  $\sigma$  为调节势井形状的参数,  $r_{i,j}$  为 u-v 点的位置坐标。

## 一种优化综合孔径阵构型的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种对综合孔径阵构型进行优化的方法,具体地,本发明用来确定天文观测的天线阵中各单元天线的位置。

### 背景技术

[0002] 在天文观测中,成像分辨率是衡量望远镜性能的一个重要参数。对单孔径望远镜来说,其成像分辨率为  $\lambda / D$ ,其中  $\lambda$  为观测波长,D 为望远镜的口径。由于工程技术上的困难,单架望远镜的口径不能做得太大。例如目前最大的光学望远镜 Keck 的口径为 10 米,对应的角分辨率约为 0.1 角秒。综合孔径成像技术可以克服以上限制。对综合孔径阵来说,其成像分辨率公式中的 D 为阵中望远镜之间的最大基线,进而可以通过延长阵列的基线来提高成像分辨率。综合孔径技术最早被应用在射电天文领域 (Ryle 1952)。经过 50 多年的不断发展与完善,当今的射电综合孔径阵已经延伸到太空,其观测角分辨率可以超过 0.1 毫角秒。该技术的创始人 Martin Ryle 也因此获得 1974 的诺贝尔物理奖。近年来该技术被逐步推广到光学波段 (Baldwin 1996),一些最大型的光学望远镜如两架口径为 10 米的 Keck 和四架口径为 8 米的 VLT,都致力于在几年内使得光学综合孔径技术达到能够进行实际天文观测的水平。在可以预见的未来,综合孔径成像技术也将应用到 X 波段 (Cash 2000)。NASA 预研的 MAXIM 卫星,正是要做到这一点。由于 X 射线的波长更短,MAXIM 的角分辨率可以达到微角秒,足够用来探测一些临近星系中央的大质量黑洞。

[0003] 综合孔径阵的构型,也就是阵中望远镜之间的相对位置,直接影响到成像质量。综合孔径阵测量的是天体图像对应的空间谱,通过 Fourier 变换把谱转化为天体图像。一个糟糕的构型会重复测量一些谱成份,同时又把另外一部分谱成份给弄丢了,相应的图像也会丢失部份信息。另外,如果构型是各向异性的,那么在望远镜数目比较少方向的成像分辨率会降低,还会带来较大的旁瓣,形成虚假的图像结构。因此,一个设计良好的综合孔径阵构型往往需要最大限度地获取图像的谱信息。这个要求又和我们所研究天体的类型紧密联系在一起:如果我们所探测的天体是致密源,它们的空间谱成份主要集中在高频部分,相应的阵构型应该在长基线处(对应高频空间谱)布置更多的望远镜;反之,对于延展源,就需要在短基线处把望远镜布置得密一些。一个综合孔径阵的构型是否优化,还受到一些外部条件的限制。例如,一个望远镜分布在东西走向的利用地球自转来完成孔径综合的阵,对于高纬度的源会有比较好的观测效果,可以算是一个构型优化的阵;然而对于低纬度源来说,该阵的观测效果会很差,不能算作构型优化的阵。

[0004] 由于综合孔径阵构型优化设计的复杂性,目前尚未有完美的解决方案。为了简化问题,许多优化设计方案一般只考虑其中几项重要指标,如 u-v 分布的均匀性、旁瓣的水平等等。澳大利亚的 Bunton 为澳大利亚 SKA 概念提出了由分布紧凑的多个单元和周边稀疏分布的非对称和旋转结构 (Bunton 1999, 2000);为 350 个单元的 Allen Telescope Array (ATA), Borck 初步考虑了面包圈和圆内均匀分布的干涉阵结构 (Borck 2000, 2001);Cornwell 考虑了小数目的干涉阵,得到对称花纹的 u-v 分布,如水晶一般非常漂亮,称为水

晶阵列 (Cornwell 1986) ;为 ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 计划, Conway 分析了和 Bunton 近似的有旋臂的旋转干涉阵结构,认为旋转干涉阵结构的 u-v 分布更趋向于高斯型分布 (Conway 2000a, 2000b, 2000c) ;Woody 分析了位于圆周上对称的干涉阵 (Woody 1999)。这些方案主要是通过个人的经验获得,缺乏严格的数学论证。

[0005] 除了上面的一些经验方案外,人们还就简化的综合孔径阵构型设计要求 (如不考虑地球自转和观测源的位置等等) 提出了一些优化方案。第一种方案是 Keto 在 1997 年为 SMA (Sub-Millimeter Array) 项目提出的模拟退火法 (Keto 1997)。该方法从一个随机的初始阵列构型出发,运用模拟退火法来搜索更加好的构型。当一个稳定构型出现时,用一个随机的,与之接近的新构型开始新的搜索。这样做可以跳出一些局部优化的解,使得解达到全局最优化。由于综合孔径阵构型的复杂性,在实际的应用时,该方法很难找到全局最优化的构型。而且该算法的计算量大,只适合望远镜数目比较少的阵构型的优化。第二种方法是 Kogan 为 ALMA 计划提出的最小旁瓣法 (Kogan 1997)。该方法基于方向瓣与天线位置之间的解析关系,通过移动天线的位置来最小化综合孔径阵方向图旁瓣。由于这个方法只是从旁瓣角度出发,并且只适应于快照模式,其应用范围受到一定限制。另外,通过最小旁瓣法也不能直接得到特定的均匀或者呈高斯型的 u-v 分布。第三种方法是 Boone 为 ALMA 和 ATA 提出的梯度压力法 (Boone 2001)。该方法定义了一种虚拟的“压力”,该压力正比与一块 u-v 区域内实际 u-v 点数与理想 u-v 点数的差值。如果 u-v 点数过多,就对应一个正压力,该压力会驱动这些 u-v 点向邻近空旷的区域扩散。最终,实际的 u-v 点分布会很接近我们所想要的分布,而对应的阵构型就是优化构型。这种方法的灵活性要大一些,应用范围也相对广泛。它的不足之处在于该方案中的力和 u-v 点的数密度联系在一起,其大小和方向的精度都比较差,而且还随着计数区域的不同划分方法而变化,所以最终优化结果的可靠性和真实性较低。而且并不适合于望远镜数目少的情况,而对于望远镜数比较多的阵,其构型会相当复杂,我们很难确认是否已经获得最优化的构型。

[0006] 申请者 2003 年提出一种系统的综合孔径阵构型的优化设计算法,即筛选算法 (Su et al. 2004)。它的基本思想是:候选望远镜位置对应的 u-v 分布比最终综合孔径阵对应的 u-v 分布密集的多,根据每个 u-v 点对 u-v 分布均匀性的贡献进行逐步筛选,使得最后剩下的 u-v 点符合我们所期望的分布,最终获得优化构型。筛选算法不但可以获得均匀 u-v 分布的优化阵构型,通过增加额外的权重因子,还可以获得 Gauss 型 u-v 分布的优化阵构型。与其它方法不同的是,筛选算法可对以地球自转观测模式为主的综合孔径阵构型进行优化设计,还可针对不同纬度的观测源,进行综合孔径阵构型的折衷优化。因此,筛选算法是一种应用广泛的综合孔径阵构型的优化设计方法。

[0007] 目前,在下一代大型综合孔径阵如 SKA (Square Kilometer Array) 的预研究中,阵构型的优化设计是一个极为重要的部分,为此都成立了专门的工作组。

[0008] 该发明提出一种对综合孔径阵的构型进行优化的方法,基于严格的物理意义,经过完整的数学公式推导,可以得到优化的天线阵结构。

## 发明内容

[0009] 针对目前国内现有方法不普遍适用的缺点,本发明基于严格的物理意义,经过完整的数学公式推导,给出获得优化的天线阵结构的解决方案,本解决方案在不限制天线

阵的数目的前提下,能够得到多天线组阵优化的准确结果。

[0010] 为了实现上述目的,本发明提出的一种优化综合孔径阵构型的方法,其特征在于,所述综合孔径阵具有 N 个望远镜单元,所述 N 个望远镜单元具有  $N*(N-1)$  个 u-v 点,其中,每个望远镜单元对应  $2*(N-1)$  个 u-v 点,该方法包括以下步骤:

[0011] 为所述具有 N 个望远镜单元的综合孔径阵随机设置一初始构型;

[0012] 使用一个带电粒子来表示所述  $N*(N-1)$  个 u-v 点中的每一个;

[0013] 计算得到每个 u-v 点所受到的库伦力  $F_{i,j}$ ,其中  $F_{i,j}$  表示第 i 个望远镜单元与第 j 个望远镜单元对应的 u-v 点所受的库伦力;

[0014] 根据所述每个 u-v 点所受到的库伦力  $F_{i,j}$  计算得到每一个望远镜单元所受到的库伦合力  $F_i$ ;

[0015] 为每一个望远镜单元添加一耗散阻力  $f_i$ ;

[0016] 计算优化评价指标,所述优化评价指标达到某一条件时的构型即为优化的均匀分布构型。

[0017] 本发明所提出的对综合孔径阵构型进行优化的方法的优点在于:

[0018] •首次将库伦场引入到综合孔径阵构型的优化设计中。库伦力的作用促使阵构型向优化的方向演化。通过设置额外的耗散阻力,使得阵构型停留在最优化的位置上。库伦场的引入使得阵构型的优化设计更为精确,并大大降低优化的计算量。

[0019] •首次将势能当作评价综合孔径阵构型优劣的指标,从而将判断阵构型是否优化建立在合理的物理意义基础之上,能够将现有的一些优化构型进行比较,并进一步研究优化构型的规律性。

[0020] •将最新的综合孔径阵构型的优化研究与标准软件包开发相结合。开发基于库伦场的构型优化设计软件包。这些软件包将在 LOFAR (Low Frequency Array for Radio astronomy)、SKA (Square Kilometer Array) 等大型射电综合孔径阵构型的设计中发挥重要作用,对未来光学、X-ray 波段等的综合孔径阵构型的优化设计具有参考和使用价值。

## 附图说明

[0021] 图 1 为本发明优化综合孔径阵构型的方法的流程图。

[0022] 图 2 为 5 单元综合孔径阵的望远镜位置分布及其 u-v 点分布的示意图。

[0023] 图 3 为基于库伦场的综合孔径阵构型优化设计的模拟结果示意图。

## 具体实施方式

[0024] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,以下结合具体实施例,并参照附图,对本发明进一步详细说明。

[0025] 参考图 1,本发明所提出的优化综合孔径阵构型的方法的具体步骤如下:

[0026] 步骤 1,在对综合孔径阵构型进行优化之前,先随机给定 N 个望远镜单元一个初始的阵构型。

[0027] 步骤 2,使用一个带电粒子来表示每一个 u-v 点。

[0028] 在本发明的技术方案中,我们首次将电磁学中库伦场的概念引入综合孔径阵构型的优化设计中。假设一个综合孔径阵有 N 个望远镜单元,相应的 u-v 点有  $N*(N-1)$  个,每个

望远镜单元对应  $2*(N-1)$  个 u-v 点。以具有 5 个望远镜单元的综合孔径阵为例, 图 2 显示了该综合孔径阵望远镜的位置信息(左图)和相对应的 u-v 点分布(右图)。其中一个望远镜用粗线方块表示, 其余的望远镜用细线方块表示; 右图中共有 20 个 u-v 点, 每个 u-v 点对应两个望远镜, u-v 点的位置为这两个望远镜的位置差。与左图粗线方块望远镜相关的 u-v 点(共 8 个)用粗线圆圈表示, 其余的 u-v 点用细线圆圈表示。在本技术方案中, 每个 u-v 点均用一个带单位正电荷的粒子表示, 这些粒子由于库伦力的作用, 互相排斥, 但又被限制在一个固定区域(如单位圆)内, 所述库伦力可表示为:

$$[0029] F = \frac{k_e q_1 q_2}{r_{12}^2},$$

[0030] 其中,  $k_e$  为一常数,  $q_1$  和  $q_2$  为两个带电粒子各自的电荷,  $r_{12}$  为两个带电粒子之间的距离。

[0031] 步骤 3, 计算得到每个 u-v 点所受到的库伦力。

[0032] 在周围带电粒子库伦场的作用下, 每个带电粒子(即 u-v 点)均受到一个库伦力  $F_{i,j}$ , 其中, 下标  $i, j$  表示第  $i$  和  $j$  个望远镜单元对应的 u-v 点, 其 u-v 点的位置是第  $i$  个望远镜的位置矢量减去第  $j$  个望远镜的位置矢量, 所以  $F_{i,j} \neq F_{j,i}$ 。

[0033] 步骤 4, 根据所述每个 u-v 点所受到的库伦力计算得到每一个望远镜单元所受到的库伦合力。

[0034] 由于每个望远镜单元对应  $2*(N-1)$  个 u-v 点, 因此, 相应的每个望远镜单元就会受到一组合力作用。第  $i$  个望远镜单元所受到的合力作用  $F_i$  可表示为:

$$[0035] F_i = \sum_{j=1}^N (F_{i,j} + F_{j,i}) \quad j \neq i$$

[0036] 步骤 5, 为每一个望远镜单元添加一耗散阻力。

[0037] 在该合力的作用下, 每一个望远镜单元会发生移动。为了使望远镜单元停留在优化的位置上, 我们添加一个虚拟的耗散阻力, 阻力的大小正比于望远镜的移动速度, 方向与望远镜的移动速度相反, 具体为:

$$[0038] f_i = -\lambda V_i,$$

[0039] 其中  $V_i$  为第  $i$  个望远镜单元的移动速度,  $\lambda$  为耗散系数, 设定为常数, 该常数大小取值只影响计算的收敛时间, 不影响最终的优化结果。

[0040] 步骤 6, 计算优化评价指标, 所述优化评价指标达到某一条件时的构型即为优化的均匀分布构型。

[0041] 所添加的耗散阻力会逐步耗散掉望远镜单元的动能, 使得整个系统的能量下降, 直到最后, 所有的 u-v 点达到均匀分布, 而且各个 u-v 点所受外力的合力为零, 保持平衡状态, 整个系统的能量达到最小, 此时的阵构型就是我们所期望的优化构型。

[0042] 在本发明的基于库伦场的新方案中, 将所有 u-v 点之间距离的倒数和作为综合孔径阵构型的优化评价指标, 即

$$[0043] M_c = \sum_{i,j,k,l} \frac{1}{|r_{i,j} - r_{k,l}|},$$

[0044] 其中,  $r_{i,j}$  和  $r_{k,l}$  为 u-v 点的位置坐标。

[0045] 在本发明中,  $M_c$  值越小越好。该指标与整个系统的库伦势能等价, 具有很好的物理

含义：一个物理系统，总是在其总势能最小的情况下最为稳定，对应到构型的 u-v 分布，意味着 u-v 点分布最为均匀，也就是说该构型是最优化的。

[0046] 上述基于库伦场的综合孔径阵构型优化设计方法的模拟结果如图 3 所示，图 3 中上一排图形显示了单位圆内随机选择的 32 个台站的位置分布（左上图）和它们对应的 u-v 点分布（右上图）；下一排图形显示了这些台站经过库伦场算法处理后得到的优化位置分布（左下图）和 u-v 点分布（右下图）。模拟结果表明该设计方法非常有效，得到了均匀的 u-v 点分布。对于单元数目比较少的综合孔径阵，可以获得和目前国际上应用的其它优化方法一样好的构型；对于单元数目比较多的综合孔径阵，目前国际上应用的其它方法很难获得优化构型，而本方法仍然可以得到好的结果。

[0047] 上面提到的对于综合孔径阵进行优化的方案可以获得均匀 u-v 分布的优化构型。在实际应用中，可以根据具体需要获得各种类型的优化构型，例如 Gauss 型的 u-v 分布，获得 Gauss 型 u-v 分布通常是为了达到减小旁瓣的效果。具体地，可以引入一个 Gauss 型负能量势井  $M_g$  来获得这样的 u-v 分布，其中，Gauss 型负能量势井  $M_g$  可表示为：

$$[0048] M_g = -k_g e^{-r_{i,j}^2 / \sigma^2},$$

[0049] 其中， $k_g$  和  $\sigma$  为调节势井形状的参数， $r_{i,j}$  为 u-v 点的位置。此时，每个粒子（即 u-v 点）的总势能为  $M_c + M_g$ ，以此作为综合孔径阵构型的优化评价指标，该值越小越好。每个 u-v 点所受力为总势能的梯度。

[0050] 由于负能量势井的存在，u-v 点会向中央集中，但因为库伦斥力作用，u-v 点不会无限靠近。这样，增加了 Gauss 型负能量势井的限制的最终的 u-v 分布就会呈现 Gauss 型分布。

[0051] 此外，我们还可以固定部分单元（它们代表已经存在的望远镜）来对一些阵的升级和扩展进行优化设计，例如把 VLA (Very Large Array) 升级为 EVLA (Expanded Very Large Array) 时，可以把原有 VLA 望远镜单元固定，而让新的单元移动，从而获得整体的优化构型。除了应用在实时观测模式外，该方案也可以应用到基于地球自转的积分观测模式。可见，基于库伦场的综合孔径阵构型的优化设计方案可以应用在许多实际的设计领域。

[0052] 以上所述的具体实施例，对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明，所应理解的是，以上所述仅为本发明的具体实施例而已，并不用于限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内，所做的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

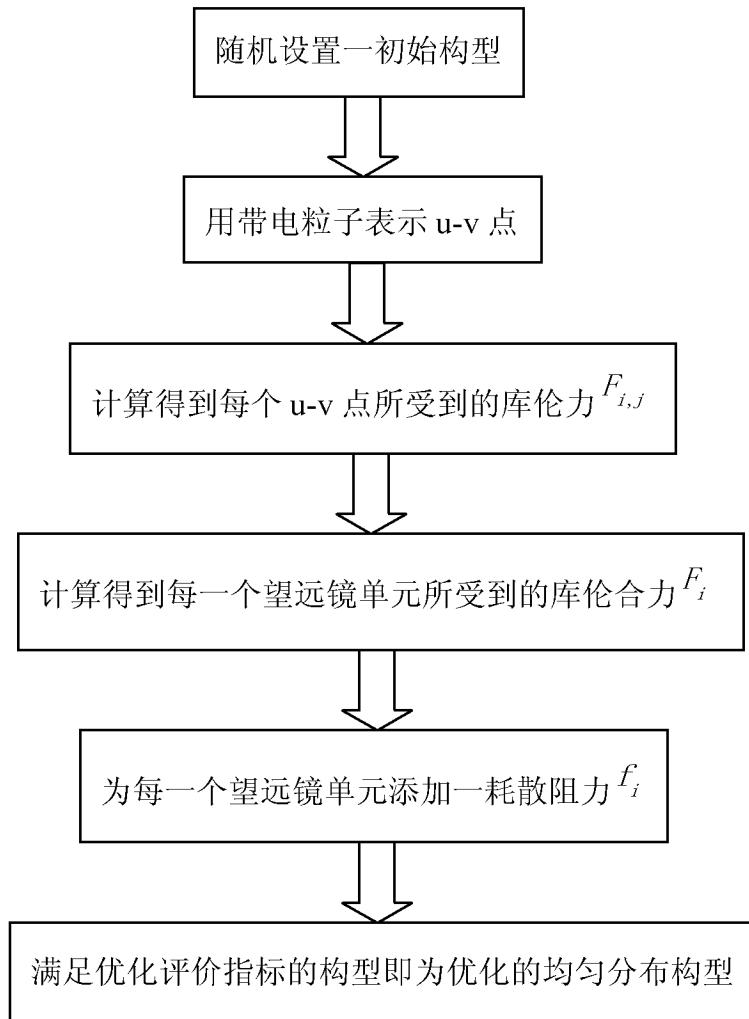


图 1

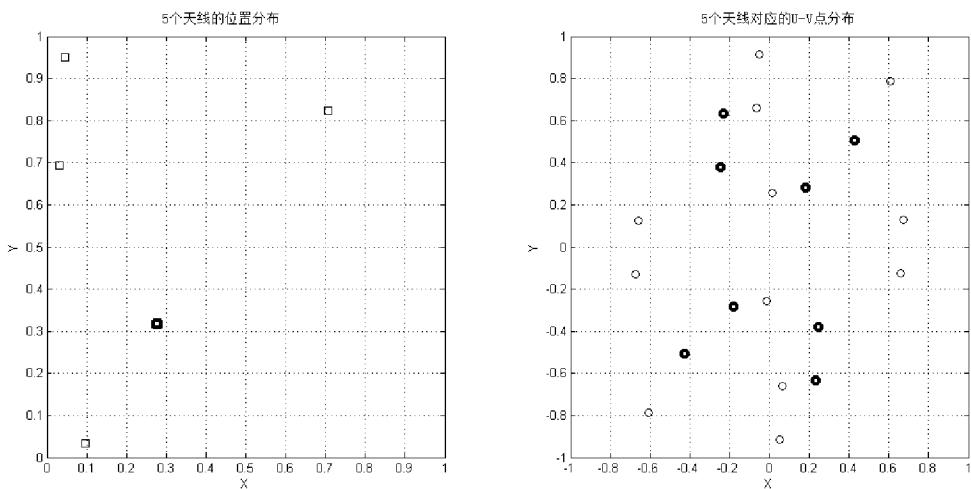


图 2

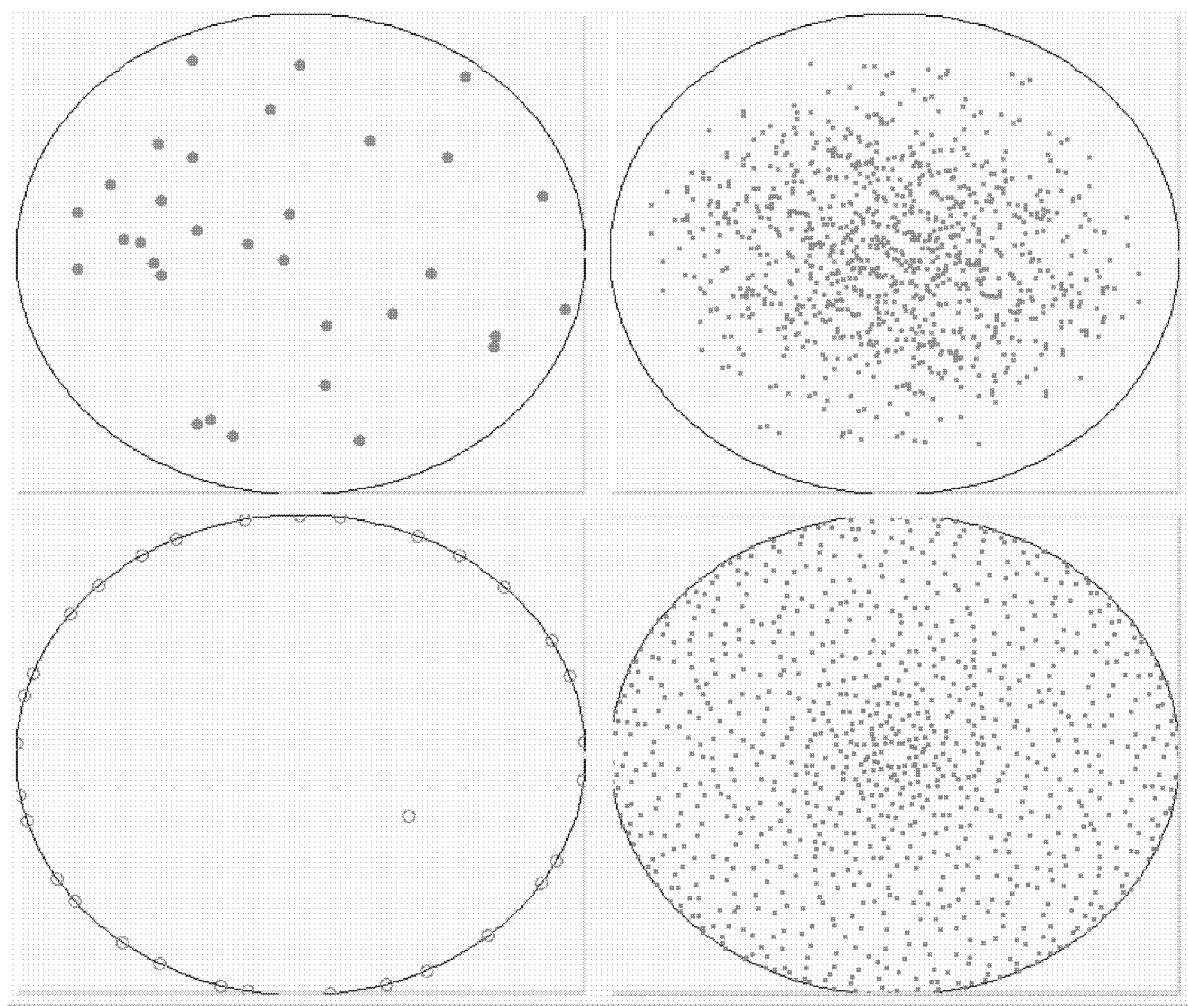


图 3