圆心松弛的圆环格点阵及其灵敏度优化研究

贺　锋[1,2]，李曙光[3]，张　悦[1]，胡　飞[1,2]

（1. 华中科技大学 电子信息与通信学院，湖北 武汉 430074；2. 多谱信息处理技术国家级重点实验室，湖北 武汉 430074；
3. 上海航天电子技术研究所，上海 201109）

摘　要：针对目前综合孔径辐射计圆环格点阵圆心位置固定，不能最大程度利用圆环中可布阵区域的问题，提出圆环格点阵圆心优化方法，在不增大布阵区域的前提下，增加了布阵自由度，为阵列性能进一步优化提供了基础。基于圆心松弛的圆环格点阵，提出一种满足给定无混叠视场范围和空间角分辨率要求的广义圆环格点阵设计方法。基于广义圆环格点阵，当给定阵元数时，依据阵列退化因子优化灵敏度。仿真结果表明：优化后的阵列具有更高的辐射测量灵敏度。

关键词：被动成像；综合孔径辐射计；阵列优化；圆环格点阵；圆心松弛；广义圆环格点阵；模拟退火；温度灵敏度优化

中图分类号：TN98　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.004

Center-Relaxed Circular Lattice Array and Its Sensitivity Optimization

HE Feng[1,2], LI Shuguang[3], ZHANG Yue[1], HU Fei[1,2]

(1. School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Multi-Spectral Information Processing, Wuhan 430074, Hubei, China;
3. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: To solve the problem that the center position of circular lattice array (CLA) is fixed, which cannot maximize the usage of deployable ring area, a CLA center optimization method is proposed. Under the premise of keeping the same array arrangement area, this method can increase the degree of freedom of arraying, and improve array performance. Based on center-relaxed CLA, a generalized CLA design method is proposed to satisfy the requirements of given non-aliasing field of view and spatial angular resolution. Based on the generalized CLA, array sensitivity optimization is carried out according to array degradation factor when the number of array elements is given. Simulation results show that the optimized array has higher radiometric sensitivity.

Keywords: passive imaging; synthetic aperture radiometer; array optimization; circular lattice array; center relaxation; generalized circular lattice array; simulated annealing; temperature sensitivity optimization

0　引言

微波（包括毫米波）辐射测量已被广泛用于对地遥感和射电天文。各种地物和人造目标，由于不同的物质属类、物理温度、几何结构和观测方位的差异导致目标和背景的微波辐射特性存在明显差异，故可将微波辐射测量用于目标探测和识别[1]。微波辐射探测具有被动接收隐蔽性好、全天候准全天时工作、图像直观易于辨识等优势[2]。实孔径辐射计采用机械扫描方式成像，用于近距离无源制导探测。但实孔径微波辐射计的空间分辨率受限于天线口径，且实时成像困难。综合孔径辐射计无需机械扫描即可对整个场景凝视成

收稿日期：2017-07-06；**修回日期**：2017-11-08

基金项目：上海航天技术创新基金（SAST2015088）；绿色通信与网络国际联合研究中心项目（2015B01008）

作者简介：贺　锋（1977—），男，博士，副教授，主要研究方向为微波毫米波无源探测和综合孔径辐射计。

像，最先应用于射电天文，后被引入对地遥感，取得了很大的成功。2009 年欧洲空间局研制的国际上首个星载 L 波段综合孔径辐射计发射升空，目前已在轨正常运行 8 年，提供了大量全球海洋盐度和土壤湿度遥感观测数据[3]。

综合孔径辐射计由多个小单元天线构成一个天线阵列，阵列中任何一对天线构成一个基线，基线由这两个天线的位置差矢量决定。每个基线干涉测量场景的热辐射信号，获得的可见度数据代表场景辐射亮温的空间频率域分量，由可见度反演图像即可得到场景亮温[4]。

综合孔径阵列的排布对阵列性能具有重要影响。阵列的空间分辨率由最大基线长度决定。位置差矢量相同的不同天线对构成冗余基线，冗余基线在 uv 平面（空间频率域）上对应同一点。对冗余基线得到的可见度作平均处理后可以降低数据的噪声，从而提高辐射测量的温度灵敏度。给定单元天线个数，阵列的灵敏度和空间分辨率不能同时达到最优。具体应用时需根据实际条件调整阵列的优化准则。在目标探测应用时，允许的积分时间通常较短，阵列排布并不以最大稀疏为优化目标，而需适当的冗余[5]。常见的阵列形式有 Y 型[3]、交错 Y 型[6]、U 型[7]、T 型等，这类阵列的 uv 采样点等间距分布，可利用快速傅里叶变换（FFT）实现快速高效反演成像。圆环阵易与平台共形，具有均匀的阵列结构，甚至还可获得无冗余的 uv 采样；然而获得的 uv 采样点间的间距非常不均匀，不能直接利用 FFT 反演，虽然经过优化排布可提升其 uv 分布的均匀度[8]，但仍需一定程度的插值，以变换到某种规则的 uv 分布[9]。插值容易降低反演精度，反演复杂度较高[10]。

为得到均匀栅格上的 uv 采样分布，同时保持圆环阵闭合且易于与平台共形的结构特点，文献[11]中提出了圆环格点阵（CLA），即在均匀圆环阵（UCA）的基础上，划分矩形栅格网，将阵元放置在给定 2 个同心圆之间的圆环范围内的格点上。由于栅格点间的位置差都是栅格边长的整数倍，故可得均匀分布的 uv 采样。均匀方形或六边形环阵[12]，兼具不占据口径中部区域、与圆形平台共形性好且可获得均匀 uv 采样的优点，但不能改变其外切圆和内切圆的半径比例，不能进一步优化其冗余基线的分布。CLA 可通过调节布阵区域对应的内环和外环的半径、阵元总数来更灵活地满足空间分辨率、无混叠视场范围和阵元总数等布阵约束条件，且其总体冗余度和冗余基线分布也可根据灵敏度需要优化设计，故可更好地满足阵列优化的实际需求。

基于 CLA，文献[13]中提出基于人工免疫算法对阵元数、阵列有效 uv 采样数以及阵列退化因子的多目标优化方法[13]。已有的 CLA 相关研究普遍存在两方面的问题：一是网格与圆环外圆相切，从而圆心在小方格内的相对位置固定，不利于阵列性能的优化；二是网格中小方格的边长、内外圆的半径的设定不灵活，不利于在满足阵列对空间分辨率和无混叠视场范围要求的前提下优化阵列。

本文改进了原 CLA 中网格固定与外圆相切的画法，通过引入圆心的随机扰动寻优，在不放松圆环区域布阵约束的前提下，可提供更多的布阵点位；提出了考虑空间角分辨率和无混叠视场约束的广义 CLA（GCLA）设计方法，并在多个可选阵列中进一步优化其辐射温度灵敏度。

1 圆环格点阵

CLA 可由 UCA 计算得到，对于一个阵元数为 N，圆环半径为 r_0 的圆环阵，网格划分以及 2 个同心圆的半径可表示为[11]

$$x_{\text{grid}} = y_{\text{grid}} = \frac{4r_0}{\text{int}\left[\sqrt{\dfrac{4N(N-1)}{\pi}}\right]} \tag{1}$$

$$r_1 = r_0 - \frac{x_{\text{grid}}}{2} \tag{2}$$

$$r_2 = r_0 + \frac{x_{\text{grid}}}{2} \tag{3}$$

式中：算子 int[·]为取整运算。

通过式(1)～(3)可得布阵的圆环区域和栅格划分，如图 1 所示，其中蓝色圆点表示 UCA 阵元位置，红色方形点表示可排布阵元的位置；放置 UCA 阵元的圆环与划分的栅格相切，圆环与栅格的相对位置固定，且对应唯一的圆环格点满阵。圆环与栅格的相对位置可用圆心等效表示，以下均以圆心位置描述。

从图 1 可看出，假设矩形栅格网不动，若圆环的圆心在一个矩形栅格内扰动，落入圆环内（半径分别为 r_1 和 r_2 的 2 个同心圆之间的区域），总的可排布阵元位置数则会变化。更多的可布阵元位置数，对于避免 uv 平面出现采样空洞和提高阵列性能来说具有重要意义。

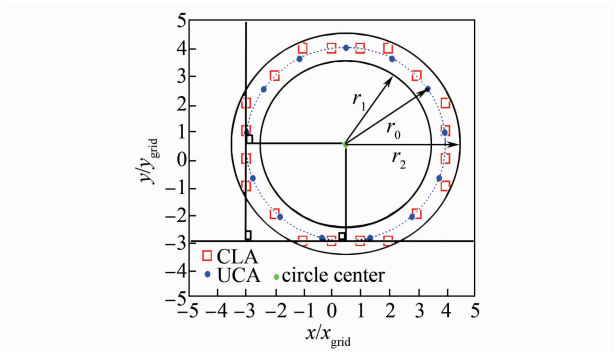


图 1　圆环阵元数为 13 的圆环区域和栅格划分

Fig.1　Ring area and lattice grid of a 13-element array

2　圆环格点阵圆心位置优化

给定圆环阵阵元数 N 和圆环半径 r_0，当圆环的外圆与网格线相切时[6]，其圆心在一个小方格内的相对位置(x_0,y_0)可表示为

$$x_0=\mathrm{mod}\left(\frac{r_2}{x_{\mathrm{grid}}},1\right)=\mathrm{mod}\left(\frac{r_0+x_{\mathrm{grid}}/2}{x_{\mathrm{grid}}},1\right)=\mathrm{mod}\left\{\mathrm{int}\left[\sqrt{\frac{4N(N-1)}{\pi}}+2\right]/4,1\right\},y_0=x_0 \tag{4}$$

式中：mod(·)为求余运算。

给定 N 和 r_0，依上述规则可得唯一圆心位置(对应圆环与栅格固定的相对位置)，可能得不到没有 uv 采样空洞的 CLA 阵列(见图 2)。由式(4)可以看出，CLA 的圆心位置仅为(0，0)、(0.25，0.25)、(0.5，0.5)、(0.75，0.75)中的一个，事实上圆心可以在均匀栅格中的任意位置，即 $x_0\in[0,1]$，$y_0\in[0,1]$。

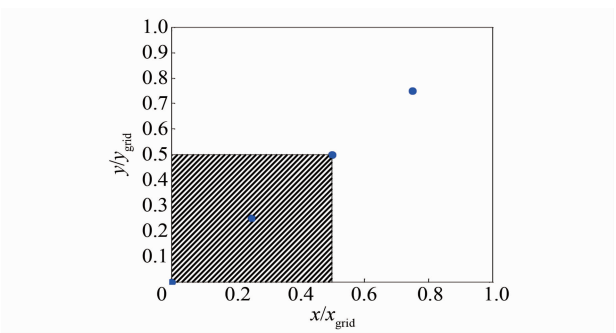


图 2　CLA 中的圆心可能位置

Fig.2　Possible circle centers of CLA

为找到最优圆心坐标，建立如下优化模型

$$\max_{(x,y)} N_{\mathrm{CLA}},\ \mathrm{s.t.}\ H_{\mathrm{hole}}=0 \tag{5}$$

式中：s.t.为约束条件；max 为取最大值；自变量(x,y)为圆心坐标；N_{CLA} 为 2 个圆环之间的所有格点数；H_{hole} 为其对应的 uv 分布中的空洞数。

圆心位置可在单元栅格中变化，因圆环与栅格具有对称性，只需考虑四分之一单元栅格，即圆心在图 2 中阴影区域的变化，也即 $x_0\in[0,0.5]$，$y_0\in[0,0.5]$。

根据以上优化模型，利用模拟退火(SA)算法进行优化。SA 算法选取区间内任意一个圆心初始化坐标 $X_0(x_0,y_0)$。每次退火降温后，在原圆心的邻域中随机选取一个新的圆心，记为 $X(x,y)$。若新圆心优于当前圆心，接受新圆心并作为新解；若劣于当前圆心，以式(6)判定是否接受新圆心，式(6)成立则接受新圆心。

$$p(F_i)=\exp(-\Delta F/T)=\exp[-(F_i-F_{i-1})/T]>p \tag{6}$$

式中：T、F_i 分别为退火过程中的温度和圆心对应的目标函数；p 为 0～1 间均匀随机数。在该问题中，目标函数 F 表示不同圆心的圆环格点满阵对应的候选位置数目，而圆心位置(x_0,y_0)即为优化变量。在 SA 算法的计算过程中，这种可能接受新解的行为可使退火过程跳出局部最优的死循环，理论上可最终获得全局最优解。

使用 SA 算法优化圆心位置的具体步骤如下：

1) 给定初始温度 T_0、降温比率 α、最低温度 T_e，任意设定圆心位置(x_0,y_0)的初值，计算出当前的目标函数 $F(x_0,y_0)$值，记为 F_0。

2) 随机选取(x_0,y_0)邻域中位置(x,y)，如其 uv 分布存在空洞，重复 2)，否则计算圆心变动后的目标函数 $F(x,y)$值，记为 F。

3) 当 F 大于或等于 F_0 时，接受位置(x,y)为新解，否则判断 $\exp[-(F-F_0)/T]>p$ 是否成立，成立则接受新圆心，否则返回到 2)。

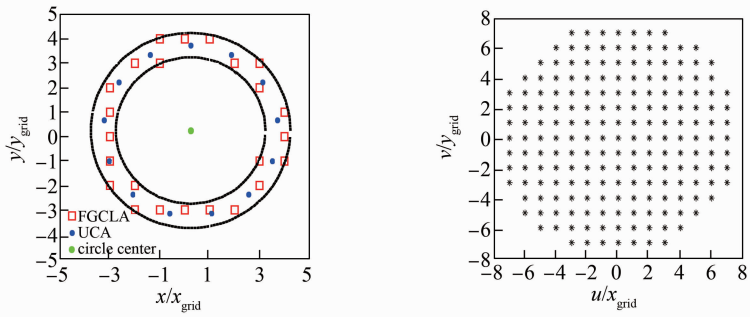
4) 退火过程(降温)采用线性退火方案，$T=\alpha T_0$。

5) 判断是否达到最低温度 T_e，是则结束，输出优化圆心及其满阵阵元数目，否则回到 2)继续迭代。

结合式(5)优化模型，利用 SA 算法，初始温度 $T_0=500$ K，降温比率 $\alpha=0.95$，最低温度 $T_e=1\times10^{-8}$ K，当阵元数为 13 时，最优圆心为(0.241 9，0.247 9)，阵列及其 uv 分布如图 3 所示，得到的圆环格点满阵对应的候选位置数目 $N_{\mathrm{CLA}}=24$。

3　广义圆环格点阵设计

综合孔径干涉阵对场景的辐射进行空间频率域离散带限采样。通过离散傅里叶逆变换(IDFT)反



（a）圆心(0.241 9, 0.247 9)的13单元圆环格点阵　　（b）对应的*uv*分布

图 3　圆心(0.241 9,0.247 9)的 13 单元圆环格点阵及对应的 *uv* 分布

Fig.3　Arrangement of a 13-element CLA with center at (0.241 9,0.247 9) and corresponding *uv* coverage

演得到原始场景亮温的估计，其过程等效于场景亮温与综合孔径的阵列因子(点扩展函数)相卷积。由此，可推导出阵列因子为 uv 采样函数(即 uv 分布，不是可见度数据)的离散傅里叶变换。在不考虑系统误差的前提下，综合孔径辐射计成像的点扩展函数是确定的。由阵列因子的表达式可得出其空间角分辨率(阵列因子主瓣半功率波束宽度)和无混叠视场(阵列因子的相邻栅瓣间距)[14]。对于圆形 uv 采样，其各方向上的空间分辨率均为

$$\Delta\theta = 0.71\frac{\lambda}{D} \tag{7}$$

式中：λ 为波长；D 为阵列口径。

无混叠视场为

$$\begin{cases} \xi_{\max} - \xi_{\min} \leqslant \dfrac{1}{\Delta u} \\ \eta_{\max} - \eta_{\min} \leqslant \dfrac{1}{\Delta v} \end{cases} \tag{8}$$

式中：$\xi = \sin\theta\cos\phi$，$\eta = \sin\theta\sin\phi$ 为球坐标系中的方向余弦；Δu、Δv 分别为空间频率域 2 个方向上的最小采样间距。

将具有圆环布阵约束的均匀栅格阵列定义为广义 CLA，广义是相对于文献[11]中原始 CLA 而言，CLA 中同心圆环约束半径、最小阵元间距都是由对应的 UCA 的半径 r_0 及阵元数 N_{UCA} 决定，广义 UCA 可根据具体应用需求直接确定布阵区域(r_1，r_2)、阵元数目(N)以及阵元最小间隔(Δd)。r_1、r_2 限定了圆环的内径和外径，由阵列的空间角分辨率需求决定。最小阵元间距 Δd 由需达到的无混叠视场范围决定。阵元数目 N 由系统能承受的硬件复杂度限定。广义 CLA 的设计能满足成像具体需求，因而更具实际意义。如综合孔径阵列无混叠视场要求达到 ±11.5°，分辨率为 1.18°，由式(7)可得其最小阵列口径 D，由式(8)得到最小阵元间隔 Δd 为

$$D = 0.71\frac{\lambda}{\Delta\theta} \approx 34\lambda \tag{9}$$

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2\sin\theta_{\max}} \approx 2.5\lambda \tag{10}$$

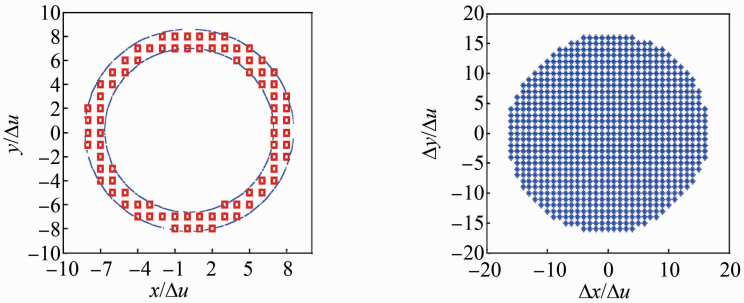
式中：$\Delta\theta$ 和 $\theta_{\max}$ 分别为阵列的空间角分辨率和无混叠视场范围。

由此做如下设计：$r_1 = \dfrac{D}{2} = 17\lambda$ 以满足空间分辨率要求；$\Delta d = 2.5\lambda$ 以满足无混叠视场要求。外圆半径 r_2 在内圆半径 r_1 加上最小阵元间距 Δd 的基础上加上一定余量，具体可根据应用灵活设置布阵区域的约束条件，本例中 $r_2 = 21\lambda$。考虑圆心的约束松弛，利用优化模型式(5)得到的优化圆心为(0.156 7, 0.185 9)，其圆环格点满阵排布及其 uv 分布如图 4 所示。其中，红色方框表示阵元候选位置，所得满阵阵元数为 82，满阵采样点数 861，冗余度为 7.715 4。由图 4(b)可以看出，满阵 CLA 的 uv 分布具有高度圆对称性，其对应的阵列因子各个方向基本相同。

4　广义圆环格点阵的灵敏度优化

4.1　优化过程

依据上述广义 CLA 设计方法，可获得一个满阵的所有阵元位置。然而满阵所需的阵元数较多，通常需要适当稀疏，即以较少的阵元数达到与满阵相同的 uv 覆盖。在同等阵元数条件下，可能获得多个相同 uv 覆盖的阵列排布方案，这些阵列的不同之处在于冗余基线在不同 uv 采样点上的分布不同。冗余基线的分布对系统平均灵敏度有较大影响，其影响可通过退化因子 f 描述[15]，即



（a）广义圆环格点满阵　　（b）对应的*uv*分布

图 4　广义圆环格点满阵及对应的 *uv* 分布

Fig.4　Full filled generalized CLA and corresponding *uv* coverage

$$f=\sqrt{\sum_{m=-P}^{P}\sum_{n=-Q}^{Q}\frac{1}{r_{mn}}} \tag{11}$$

式中：r_{mn} 为某一个基线的重复次数；P 和 Q 分别为横轴和纵轴方向最大基线编号。系统的灵敏度与退化因子 f 直接相关，可以通过优化 f 来改善灵敏度，f 越小，灵敏度越优。

给定阵元数 N，保证无空洞，且 uv 覆盖点数大于内圆覆盖的点数时，退化因子优化为

$$\min_{X} f,\ \text{s.t.}\ H_{\text{hole}}=0, N_{\text{v}}\geqslant N_{r1} \tag{12}$$

式中：N_{v} 为有效采样点数；N_{r1} 为圆环的内圆范围内所有网格点上布满天线时获得的 uv 有效采样点数；H_{hole} 为空洞数。

利用 SA 算法优化退化因子的步骤如下：

1）给定初始温度 T_0，降温比率 α，最低温度 T_{e}，初始阵元位置 $\boldsymbol{X}_0$ 并计算阵列的退化因子 f_0，其中 $\boldsymbol{X}_0$ 为所有阵元 X_0 的坐标序列。

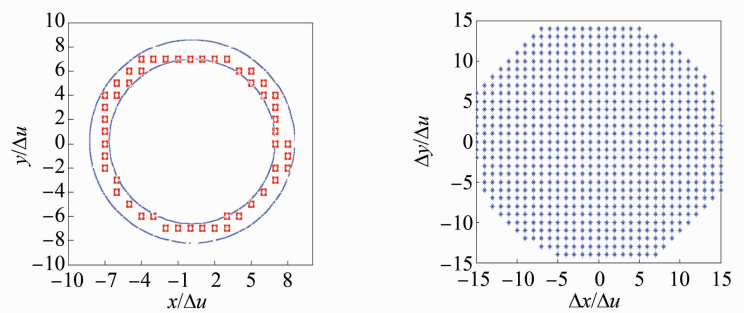
2）扰动阵列中的一个阵元（选取一个新阵元，去掉一个原始阵元，阵元总数不变）得到新阵 $\boldsymbol{X}$，如果其 uv 分布存在空洞，重复 2），否则计算其退化因子 f，转到 3），其中 $\boldsymbol{X}$ 为所有阵元 X 的坐标序列。

3）判断 $f<f_0$ 是否成立，成立则接受新阵，并更新 $\boldsymbol{X}_0=\boldsymbol{X}$，$f_0=f$，判断 $\exp[-(f-f_0)/T]>p$ 是否成立，成立则接受新阵，并更新 $\boldsymbol{X}_0$、f_0，否则返回到 2）。

4）降温，$T=\alpha T_0$。

5）判断是否达到最低温度 T_{e}，是则结束，输出优化阵列位置 $\boldsymbol{X}_0$ 及其退化因子 f_0，否则回到 2）继续迭代。

结合式(12)优化模型，利用 SA 算法优化，初始温度 $T_0=500$ K，降温比率 $\alpha=0.95$，最低温度 $T_{\text{e}}=1\times10^{-8}$ K，给定 50 阵元得到的优化结果如图 5 所示。



（a）模拟退火算法退化因子优化阵　　（b）对应的*uv*分布

图 5　模拟退火算法退化因子优化阵及对应的 *uv* 分布

Fig.5　Degradation factor optimized array by SA algorithm and corresponding *uv* coverage

给定 50 阵元情况下，优化的阵列退化因子为 16.355 8，其有效采样点数为 739。其收敛情况如图 6 所示。

4.2　灵敏度仿真

从可见度的相关性出发，利用可见度误差与亮温图像误差间的传递关系，仿真得到二维场景亮温图像

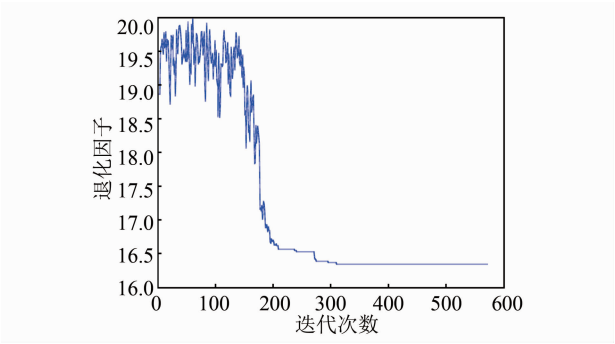


图 6 模拟退火算法收敛图

Fig.6 Convergence of fitness values using SA algorithm

的标准差，以此表征不同方向上的亮温分辨能力，并采用其均方根表示系统的亮温平均灵敏度。实验仿真优化退化因子后的 CLA 和随机排布 CLA 的灵敏度，对比 2 个 CLA 的灵敏度改善程度和退化因子改善程度可知，改善退化因子可有效优化灵敏度。

仿真实验中给定的 CLA 设计中阵元数为 50。退化因子最优阵（见图 5）和一个无空洞随机阵（见图 7）中阵列退化因子分别为 16.355 8 和 19.412 0。

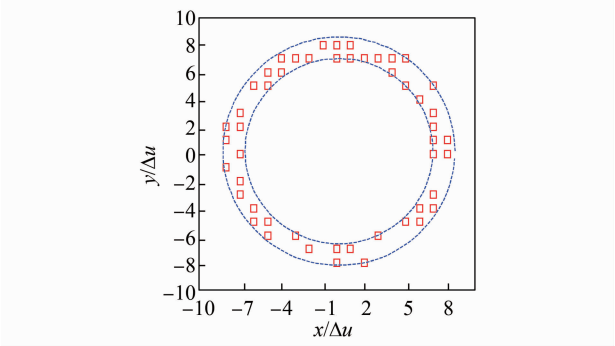


图 7 50 阵元无空洞的随机阵列排布

Fig.7 A 50-element random array without holes

对给定场景的灵敏度仿真，并利用图像的标准差衡量，仿真中阵元接收机系统参数如表 1 所示。

表 1 阵元接收机系统参数

Tab.1 System parameters of array receiver

参数	对应值
频率/GHz	36.5
带宽/MHz	500
积分时间/s	1
接收机的等效噪声温度/K	500

仿真中不考虑单元天线方向图特性、通道的去相关效应及其他误差，仿真原始场景如图 8(a)所示。设计得到的 CLA 的 uv 分布为均匀的矩形栅格，将得到的所有采样点扩展到矩形区域，将矩形区域中未采样到的点作补零处理。理想条件下，亮温与可见度函数满足傅里叶变换关系，可利用矩形区域的均匀栅格上的可见度离散傅里叶逆变换得到其反演亮温，反演结果如图 8(b)所示。

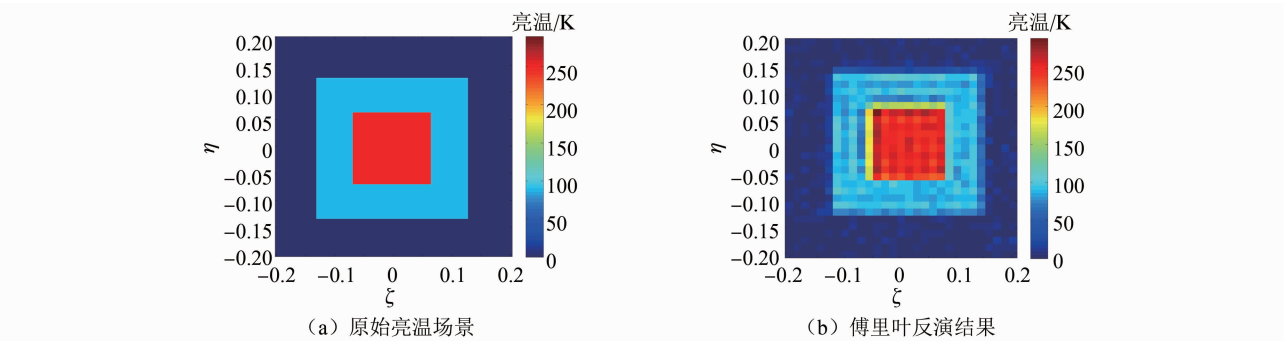
考虑可见度的相关性和基线的冗余平均，2 个阵列的反演图像标准差[16]（仿真得到的灵敏度）如图 9 所示。

由图 9 可看出，图中每个像素的标准差不同，且其与原始亮温图像轮廓相近，系统亮温平均灵敏度可表示为

$$\Delta T_{\text{avg}}=\sqrt{\frac{1}{N_{\text{v}}}\sum_{m=-P}^{P}\sum_{n=-Q}^{Q}\langle|\Delta T_{mn}|^2\rangle} \tag{13}$$

式中：$\langle|\Delta T_{mn}|^2\rangle$为图像中某一像素亮温的方差。

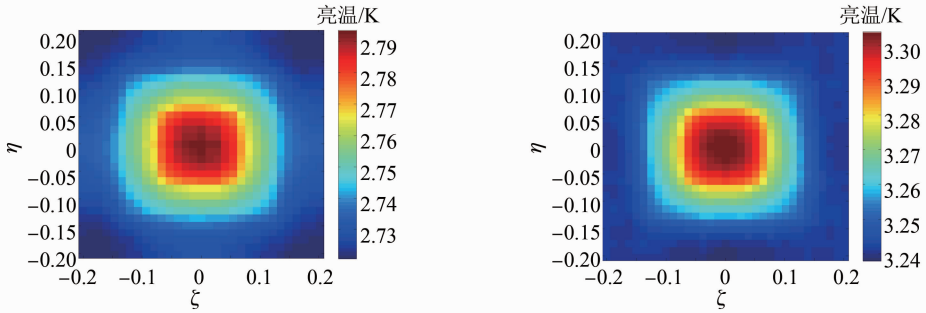
仿真实验中，退化因子最优阵的亮温平均灵敏度 $\Delta T_{\text{avg}}=2.741\ 9$，随机阵列的亮温平均灵敏度 $\Delta T_{\text{avg}}=3.254\ 6$。



（a）原始亮温场景　　（b）傅里叶反演结果

图 8 原始亮温场景和离散傅里叶变换反演结果

Fig.8 Original scene of brightness temperature and IDFT inversion results



（a）退化因子最优阵列　　（b）50阵元随机无空洞阵列

图 9　反演图像中每个像素的标准差

Fig.9　Standard deviation of each pixel of inversed images

通过以上仿真可得，经过退化因子优化后的阵列的亮温灵敏度的改善百分比为

$$P_{\Delta T}=\frac{\Delta T^{\mathrm{r}}_{\mathrm{avg}}-\Delta T^{\mathrm{m}}_{\mathrm{avg}}}{\Delta T^{\mathrm{r}}_{\mathrm{avg}}}\times 100\%=15.75\% \quad (14)$$

其退化因子的改善程度可表示为

$$P_f=\frac{f^{\mathrm{r}}-f^{\mathrm{m}}}{f^{\mathrm{r}}}\times 100\%=15.74\% \quad (15)$$

式(14)和式(15)中上标 r 表示退化因子优化之前，上标 m 表示优化之后。

由此可见，在 CLA 的设计中，在满足无空洞前提下，优化基线的冗余分布，可达到最优灵敏度，即改善阵列的退化因子可改善阵列的灵敏度。

5　结束语

针对原始 CLA 网格与圆环外环相切导致可布阵点位并非最优的问题，提出圆心松弛的圆环格点优化方法，在不增加布阵范围的前提下，有效增大了布阵自由度，从而为进一步优化阵列性能提供了基础，仿真验证了圆心松弛的 CLA 能构造更均匀和灵敏度更优化的 uv 采样分布的结论。结合成像无混叠视场范围和空间分辨率约束，在原 CLA 的基础上，改进网格大小和内外圆半径差，提出广义的 CLA 设计方法，能更灵活满足应用对阵列性能的指标要求，设计出的阵列比原 CLA 更具有工程实际意义。进一步结合阵元总数约束，提出平均灵敏度最优的广义 CLA 优化方法，仿真表明：优化后的阵列排布具有更高的亮温灵敏度。本文的阵列优化设计中未考虑实际单元天线的几何尺寸及其对阵列性能的影响，实际天线具有一定的尺寸，在约束的圆环区域中需要一定的空间位置来放置，未来工作可将天线物理尺寸纳入布阵约束条件，进一步优化设计。

参考文献

[1] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave remote sensing fundamentals and radiometry [M]. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1981.

[2] PERGANDE A N. History and challenges of passive millimeter wave imaging[C]// Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology VI. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8900: 890006.

[3] CORBELLA I, TORRES F, DUFFO N, et al. MIRAS calibration and performance: results from the SMOS in-orbit commissioning phase [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3147-3155.

[4] 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.

[5] ZHU D, HU F, HE F, et al. A novel optimal design of antenna array in aperture synthesis radiometers[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1227-1230.

[6] LAMBRIGTSEN B, TANNER A, GAIER T, et al. Prototyping a new Earth observing sensor- GeoSTAR [C]// IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2007.

[7] 薛永，苗俊刚，万国龙. 8 mm 波段二维综合孔径微波辐射计(BHU-2D)[J]. 北京航空航天大学学报，2008, 34(9): 1020-1023.

[8] JIAN D, RONGHUA S, YING G, et al. Circular antenna array design method based on quantum particle swarm optimization for aperture synthesis radiome-

ters[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(2): 233-240.

[9] CHENG Z, HAO L, JI W, et al. Imaging analysis and first results of the geostationary interferometric microwave sounder demonstrator[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(1): 207-218.

[10] 张成. 干涉式成像微波辐射计遥感图像的模拟与成像分析[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2007.

[11] JANG C H, HU F, HE F, et al. A novel circular array structure and particle swarm optimization in aperture synthesis radiometers[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1758-1761.

[12] ZURITA A M, CORBELLA I, MARTÍN-NEIRA M, et al. Towards a SMOS operational mission: SMOSOps-hexagonal[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2013, 6(3): 1769-1780.

[13] ZHU D, HU F, LANG L, et al. Multi-objective optimization of circular lattice arrays in aperture synthesis radiometers[C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, Puerto Rico, 2016: 583-584.

[14] 陈柯. 综合孔径微波辐射成像系统关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2010.

[15] DONG J, LI Q, SHI R, et al. The placement of antenna elements in aperture synthesis microwave radiometers for optimum radiometric sensitivity[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(11): 4103-4114.

[16] BARA J, CAMPS A, TORRES F, et al. The correlation of visibility noise and its impact on the radiometric resolution of an aperture synthesis radiometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2423-2426.