

深空大规模天线阵布局优化方法研究

史学书¹, 王元钦^{1,2}

(1. 装备指挥技术学院, 怀柔 101416; 2. 哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 由大量廉价的小型反射面天线组成阵列对航天器进行跟踪通信是未来深空测控网发展的一条新思路。提出一种改进的遗传算法对大规模小天线阵列地理布局进行优化, 提高天线阵列的测控性能。首先分析了布局优化的约束条件, 然后以最小化旁瓣电平为目标, 建立了优化模型。分析了 Kogan 梯度算法和常规遗传算法的局限性, 最后给出了改进遗传算法的优化流程。仿真结果表明, 改进的遗传算法不但具有高的优化效率, 还可应用于阵列布局的多目标优化。

关键词: 深空通信; 天线阵; 布局优化; 最小化旁瓣

中图分类号: V476; TN820.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2010)02-0478-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.02.027

0 引言

为了获得更高的探测灵敏度, 用多个天线组成阵列对航天器进行跟踪通信, 已经成为深空测控的发展方向。同时随着以 ATA 为代表的小口径(6~12m)天线阵列的组网并成功干涉成图^[1~2], 采用大量小天线而不是若干个大天线进行孔径综合, 显示了巨大的优势。与单个大口径天线相比, 大规模小天线阵的建设成本只是其一小部分, 同时通过后续天线数量的增补可以满足未来深空通信容量和航天器数量增长的要求。目前 JPL 已经进行了上行和下行大规模小天线组阵的可行性研究工作, 并计划把大规模小天线阵列作为 NASA 深空网现有 70m 天线的替代方案之一^[3~5]。建造大规模小天线阵需要考虑的一个重要问题是如何优化天线单元的地理布局。与现有射电天文干涉阵列布局需要考虑 UV 覆盖特性不同, 深空阵列布局更关注合成波束的旁瓣是否最小, 以及跟踪不同航天器和干扰对消的能力。

论文首先对阵列布局的约束条件进行了分析, 给出了天线阵瞬时合成波束方向图的计算方法, 以最小化旁瓣电平为目标, 建立了布局优化的目标函数和优化模型。基于优化模型, 讨论了两种布局优化方法: Kogan 梯度算法^[6] 和遗传算法。针对 Kogan 梯度法和常规遗传算法的局限性, 提出了一

种适用于深空阵列布局的改进遗传算法(IGA)。IGA 采用了混合编码方式来显性表征阵列布局的拓扑特性, 进而提高算法的搜索效率; 同时采用并行遗传操作把种群分为若干子种群进行独立进化, 并在子种群间进行隔代迁移操作增强最优解的搜索能力; 在 IGA 的精英保留策略中加入了 Kogan 梯度搜索算子, 加快算法的收敛速度。最后论文用 4 个仿真实例分析了深空天线阵布局优化的拓点, 从多个角度证明了 IGA 应用于大规模天线阵布局优化的优越性。

1 天线阵布局约束条件

由于深空接收信号十分微弱, 阵列地理布局应产生低旁瓣的瞬时综合波束以减少临近天体的干扰增强接收灵敏度。除此之外, 针对深空测控的特点还应对天线阵的布局给出如下约束条件^[7]:

(1) 布局应紧凑

天线阵系统的信号合成损失主要由天线单元间的相位对齐误差决定。天线间距越小, 由大气引起的相位漂移误差越小, 其接收信号相位的相关度越高, 合成性能也越好。

(2) 避免遮挡

相邻天线单元的遮挡由天线直径、天线间的最小距离和最小跟踪仰角决定。不产生遮挡的最小仰

角如果为 α , 则天线间距必须大于 $D/\sin(\alpha)$ 。

(3) 灵活划分和改变子阵布局

不同的深空测控任务需要不同数量的天线单元组成子阵列, 子阵列之间应有较长的基线使系统具有较高的角分辨率。同时布局还要考虑地形条件和铺缆建设等问题。

2 瞬时合成波束方向图计算

如果所选天线阵布局对应的方向图旁瓣较大, 则背景噪声干扰对深空接收信号的影响会增大, 因此布局首先以最小化旁瓣为目标进行优化。平面阵列的方向图可表示为:

$$E(u, v) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_k e^{-j\pi(u x_m + v y_n)} \quad (1)$$

式中, a_k 表示天线的幅度加权值, 深空阵列波束合成应使用等幅度加权以得到高的信号接收灵敏度, 故取 $a_k = 1$ 。 u 和 v 是波束的方向参数。采用地心赤道坐标系进行分析, 阵列平面在坐标系中的位置如图 1 所示。其中 α 是波束矢量 \vec{e} 指向观测源时偏离阵面法线 X 的赤经角, δ 是 \vec{e} 相对于赤道平面的赤纬角。不妨设 uv 阵列平面的坐标中心位于赤道, 令 u 指向正东方向, v 指向正北方向, 波束矢量在阵列平面的投影坐标可以表示:

$$v = \sin(\delta), u = \cos(\delta)\sin(\alpha) \quad (2)$$

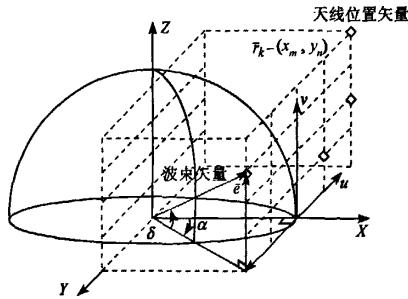


图 1 阵列平面与地心赤道参考坐标系示意图

Fig. 1 The geometry of array configuration in spherical coordinates

参考图 1, 记 $r_k = (x_m, y_n)$ 为第 k 个天线在 uv 平面上的位置矢量, 以波长计量, 天线阵的瞬时合成功率记为 $P(\vec{e})$, 其可以表示为任意两个天线的位置矢量所构成基线在波束矢量方向上的投影集合。

$$\begin{aligned} P(\vec{e}) &\approx \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N e^{(-j2\pi[(\vec{r}_k - \vec{r}_n) \cdot \vec{e}])} \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{(-j2\pi[\vec{r}_k \cdot \vec{e}])} \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{(j2\pi[\vec{r}_n \cdot \vec{e}])} \\ &= \frac{1}{N^2} |E(\vec{e})|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

上式中 \vec{e} 是指向观测源的单位方向向量, N 为天线的个数。带入观测源的赤经、赤纬以及天线的位置坐标参数, $E(\vec{e})$ 可表示为:

$$\begin{aligned} E(\vec{e}) &= \sum_{k=1}^N e^{(-j2\pi[\vec{r}_k \cdot \vec{e}])} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{-j2\pi(u x_m + v y_n)} \\ &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{-j2\pi(\cos(\delta)\sin(\alpha)x_m + \sin(\delta)y_n)} \end{aligned} \quad (4)$$

以上的分析假设天线阵位于赤道, 天线指向中天位置, 实际应用中任何纬度和指向角的瞬时合成方向图都可以转化为公式 3 的形式进行分析。

3 布局优化算法

如果天线最小间距设定为 d_{min} , 最大布局面积为 $L \times L$, 则为了使合成波束旁瓣最小, 布局最优化数学模型可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left\{ \max \left| \frac{P(\alpha, \delta)}{P_{max}} \right| \right\} \\ \text{s.t.} \quad -L \leq x_i \leq L, -L \leq y_i \leq L \\ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq d_{min} \\ i, j \in [1, \dots, N], i \neq j \end{array} \right. \quad (5)$$

P_{max} 是主瓣峰值, (α, δ) 的取值范围为合成波束内除主瓣以外的区间, 天线数记为 N 。实际优化的目标为根据模型得到近似最优解或工程满意解。下面给出两种针对大规模天线阵进行波束优化的方法: Kogan 梯度算法和遗传算法。

3.1 Kogan 梯度算法

ALMA 和 JPL 模型阵(由 100 个天线组成)在布局设计时, 就采用了 Kogan 提出的梯度搜索算法^[6,8]进行最小旁瓣优化。Kogan 梯度算法从任意初始天线阵拓扑开始, 计算其合成波束, 通过在最小梯度方向反复迭代, 直至最大旁瓣降低至可接受的水平。若天线指向适量为 \vec{e} , 单个天线搜索方向与 x 轴夹角为 β , $G \in (0.0001, 0.1)$ 。根据梯度下降原理, 第 n 个天线应在 x, y 方向分别移动:

$$\begin{aligned} dx(n) &= -GdP_{\vec{r}_n} \cdot \cos\beta \\ dy(n) &= -GdP_{\vec{r}_n} \cdot \sin\beta \quad n \in [1, \dots, N] \end{aligned} \quad (6)$$

$$dP_{\vec{r}_n}(\vec{e}) = \frac{4\pi(\vec{e} \cdot \Delta\vec{r}_n)}{N^2} \sum_{k=1}^N \sin 2\pi(\vec{r}_k - \vec{r}_n) \cdot \vec{e} \quad (7)$$

其中, G 是尺度调整因子, $dP_{\vec{r}_n}(\vec{e})$ 是合成波束对第 n 个单元天线位移的微分, 即当第 n 面天线移动 $\Delta\vec{r}_n$ 时, 在方向 \vec{e} 处所对应幅度的改变量。

梯度搜索算法首先从给定的初始种子布局开始进行搜索, 最后找到局部的最优解, 所以依赖于起始点的选择和初始假设。算法需要反复在各个天线单元的周围进行最小梯度搜索迭代, 在搜索过程中适当控制尺度因子 G 可以提高搜索效率。Kogan 梯度算法在开始迭代时采用大尺度 G 进行随机搜索, 扩大局部最优点的搜索范围, 在后期采用小尺度 G , 提高搜索精度。

3.2 遗传算法

与梯度算法相比, 遗传算法能够进行概率意义上的全局搜索, 非常适合处理目标函数存在多个局部极值点的优化问题, 广泛应用于一维线阵、二维稀疏/稀布阵的波束综合^[9-10]。遗传算法的优化效果主要由编码操作以及选择、交叉、变异三个进化算子决定^[11], 具体针对深空天线阵的布局问题, 采用常规遗传算法会遇到如下问题:

(1) 染色体编码方式的选择

布局优化设计有较高的精度要求, 如果采用二进制编码, 当天线数目增多时, 单个染色体可能需要上千个基因位, 算法的进化效率非常低。如果采用实数编码, 虽然可以压缩染色体的长度, 但与二进制编码方式相比其基因信息呈隐性, 不能满足遗传算法对基因材料多样性的要求, 大大弱化了交叉算子的作用, 从而影响遗传算法的进化速度。

(2) 遗传算法的计算效率

阵列优化时依据最大相对旁瓣构造适应度函数, 染色体的适应度函数定义为:

$$Fitness = \max \left| \frac{P(\vec{e})}{P_{\max}} \right| \quad (8)$$

由公式 4 和 8 可知适应度函数的计算精度由 (α, δ) 在波束内被采样的点数决定, 点数越多精度越高, 但采样点数太多, 算法的进化速度会急剧下降。再则, 遗传算法的全局优化特性依赖于群体搜索, 需要对

每一个个体进行适应度评估, 需要大量计算时间。设群体规模为 n , 一次迭代过程中选择算子、交叉算子、变异算子的计算量分别设为 T_s 、 T_c 、 T_m , 个体适应度评估的计算量为 T_f , 其它操作的计算量为 T_{er} , 则一次迭代的总计算量 To 为,

$$To = T_s + T_c + T_m + T_f + T_{er} \quad (9)$$

对于由 N 个天线组成的阵列, T_f 的计算量非常大, 远远超过了选择、交叉和变异算子的计算量。所以 m 代遗传进化需要的计算量为,

$$T = m \cdot To \approx m \cdot n \cdot T_f \quad (10)$$

根据公式(10), 要减少计算量有三条途径: 一是减少计算适应度的时间; 二是减少 n , 即减少群体规模; 三是并行化。

(3) 遗传算法的收敛速度

由于群体规模的限制, 在选择操作时具有较大的选择误差, 难以做到最优选择。所以针对深空阵列优化这样的小种群进化需要采取合适的精英保留策略(Elitism), 保证在进化过程中, 某一代最优个体的基因既不会由于统计误差而丢失, 也不会被交叉和变异操作所破坏。同时要避免引入 Elitism 算子后收敛到不理想的局部最优解的情况。

针对以上问题对遗传算法进行如下改进:

(1) 染色体采用混合编码

采用常规的实数编码时, 通常把天线的位置矢量直接作为染色体的基因 $gene_i = \{x_i, y_i\}$, 这样阵列布局对应的染色体 $Chrom(k)$ 可表示为,

$$Chrom(k) = gene_1(k), gene_2(k), \dots, gene_N(k) \quad (11)$$

如果简单采用公式(11)的染色体编码方式, 在交叉产生子代染色体时, 由于父代染色体的对位基因并不具有表征其布局拓扑的显性遗传特性, 故两个染色体直接交叉生成的子代染色体并没有遗传父代染色体的特性。为了让基因具有表征阵列布局拓扑的特性, 在染色体中加入天线位置编码参数 s_i , 用来表示第 i 个天线在布局平面的相对编码位置。编码可以采用直角坐标或极坐标, 如果采用直角坐标, 则第 i 个天线的位置矢量变为,

$$\{x_i, y_i\} = \{[f(s_i) + \Delta x_i], [g(s_i) + \Delta y_i]\} \quad (12)$$

其中 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 为天线相对位置坐标, $\Delta x_N, \Delta y_N$ 采用实数进行编码, $f(s_i), g(s_i)$ 为编码坐标转换函数。最后单个天线对应的染色体基因表示为: $gene(i) = \{s(i), \Delta x(i), \Delta y(i)\}$ 。这样经过改进

后,基因信息便呈现了一定的显性,同时又保持了实数编码以任意高精度逼近最优解的优点。再则,遗传算法本质上是一种无约束问题的优化方法,约束条件的加入使得交叉算子的作用效能大为下降。因为当交叉算子作用于代表可行解的个体时,产生的新个体很可能不再代表可行解。而位置编码的引入使得单元天线间具有隐含的距离约束,可以方便地在遗传操作过程中处理约束条件,最大限度在可行域范围内进行搜索,大幅提高了搜索效率。

(2) 提高算法计算效率

适应度评价时, $E(\vec{e})$ 的二维计算是算法效率提高的瓶颈所在。利用 $E(\vec{e})$ 的对称性, 计算量可以减少一半, 同时为了减少 $\vec{e}(\alpha, \delta)$ 的采样点数, 可以只计算合成波束几条切线处的 $E(\vec{e})$ 值, 寻找其最大旁瓣。

(3) 提高收敛速度

随着天线数的增加, 由于阵列的超稀布特性, 解空间将呈指数规律增长^[12], 即使初始种群由几千个染色体组成, 相对于解空间来说种群规模还是太小。所以生成初始群体时, 尽量使个体互不相同, 使算法从迭代开始就拥有相对丰富的基因材料。同时为了进一步提高小种群进化收敛速度, 采用并行遗传算法把种群分为若干子种群, 并在进化的过程中在子种群间进行隔代迁移操作。另外在迭代初期, 在子代群体中应用小生境技术^[13], 把天线位置基因 s_i 作为适应度共享函数的参数, 使个体之间保持一定的距离, 增强最优解的搜索能力。

在实际操作中由于计算精度、地形、天线位置坐标误差、天线标校等条件限制, 布局优化只要求得到工程满意解。基于以上分析, 在 Elitism 操作中加入梯度搜索算子, 加快算法的收敛速度, 具体为: 如果某一代群体中有个别个体的适应度特别高, 则把这个个体储存起来进行小尺度梯度搜索, 经过若干代后再把这个个体插入种群中进行遗传进化。

综合以上分析, 给出经过改进后的遗传算法(IGA)的流程框图, 如图 2 所示。

4 仿真实例分析

(1) 规则布局对应的合成波束

仿真时天线阵布局参数设为^[14]: 布局面积

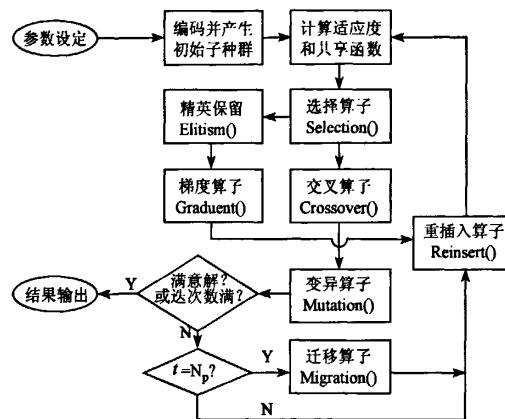


图 2 改进遗传算法的优化流程

Fig. 2 Flowchart of IGA for arrays synthesis

400 m × 400 m, 天线最小间距 30 m, 天线阵元数 48, 工作频率 32 GHz, 天线直径 12 m, 单个天线主波束 3 dB 宽度约为 0.058°。

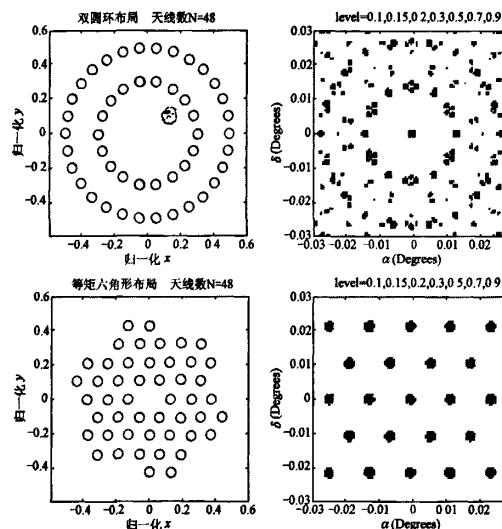


图 3 两种规则阵列布局及其瞬时合成波束等高线投影图

Fig. 3 Two kinds of regular layout and corresponding contour plot of instantaneous synthesized beams

图 3 给出 2 种规则阵列布局的瞬时合成波束图, 其中双圆环阵列内外半径分别为 120 m 和 200 m, 瞬时合成波束最高旁瓣幅度是 0.35(合成波束主瓣幅度设为 1)。等距离六角形布局天线间距为 50 m, 其瞬时合成波束由于布局的规则性产生了多个幅度为 1 的栅瓣波束。

目前已建的射电天线阵列大多呈规则型布阵如

T 型阵、Y 型阵、环形阵和螺旋阵。而根据 Parseval 定理, 波束的旁瓣最小化可以通过均匀采样 $u-v$ 平面得到^[15], 因此目前正在建的 ATA 和 ALMA 天线阵都趋近于不规则布阵。

(2) Kogan 梯度算法优化结果

设置初始种子布局为规则双圆环阵列, 布局参数同上。采用迭代次数作为终止条件, 大尺度迭代 300 次和小尺度迭代 500 次。进行 10 次独立随机的仿真实验, 给出旁瓣优化结果最差和最好的两次实验的收敛曲线, 如图 4 所示。

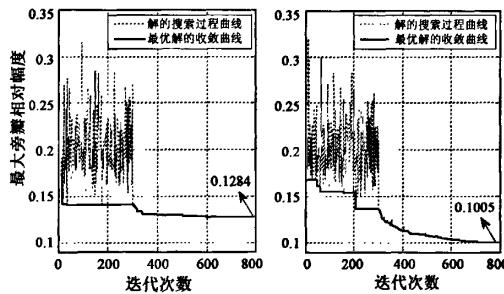


图 4 Kogan 梯度算法收敛曲线

Fig.4 The worst and best maximum sidelobe level with iterations of Kogan based synthesis

在仿真实验中, 梯度算法最终收敛于某局部最小值, 但依赖于大尺度的随机搜索, 小尺度搜索只能在大尺度搜索的基础上找到附近的极小点, 而这个极值点往往与工程满意解有一定差距, 所以与遗传算法的全局收敛能力相比, Kogan 梯度算法搜索效率较低。

(3) IGA 算法优化结果

下面利用本文提出的改进遗传算法进行布局优化仿真, 设置初始种群规模为 8×20 , 其中子种群数为 8, 由于染色体采用了实数编码加符号编码的混合编码方式, 所以交叉算子和变异算子必须针对符号编码基因位和实数编码基因位分别操作。符号编码基因位不进行交叉运算只进行变异运算, 变异概率为 0.01; 实数编码基因位交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.1; 子种群间的迁移率为 0.1, 精英保留率为 0.01。

仿真时采用遗传代数作为终止条件来考查算法的收敛特性, 进行 10 次独立随机的仿真实验, 给出其中最差和最好样本的种群收敛结果, 如图 5 所示。与 Kogan 梯度算法相比, IGA 具有更稳健的收敛特

性和低的旁瓣优化结果。

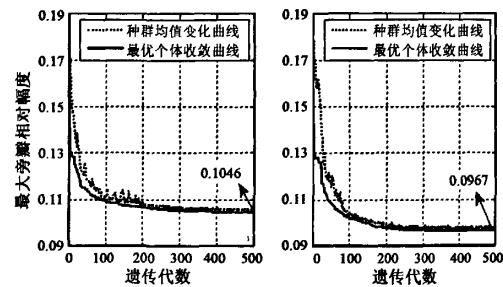


图 5 改进遗传算法收敛曲线

Fig.5 The worst and best maximum sidelobe level with iterations of IGA based synthesis

图 6 为基于所给参数, 采用 IGA 得到的最优布局和其瞬时合成波束等高线投影图。

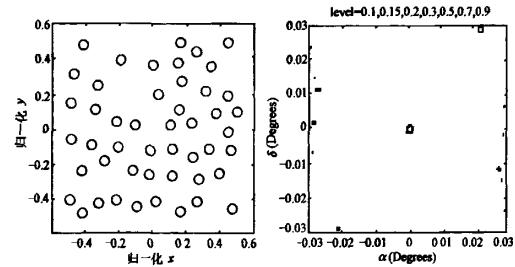


图 6 采用 IGA 得到的最优布局及其瞬时合成波束图

Fig.6 One possible optimal configuration of 48 antennas and corresponding contour plot of instantaneous synthesized beams based on IGA

下面对 Kogan 梯度算法和 IGA 的计算效率进行分析。实验仿真环境为 Matlab, CPU 为 Intel E2180, 内存为 1GB。Kogan 算法操作对象只有 1 个布局个体, 计算量由适应度计算时间 T_f 、梯度计算时间 T_g 和约束处理时间决定, 经统计 $T_f \approx 0.4$ s, $T_g \approx 0.003$ s, 采用大尺度 G 进行迭代时, 一次约束处理时间最大可以达到 1–60s, 采用小尺度 G 时, 约束处理时间可以忽略不计。进行 300 次大尺度迭代和 500 次小尺度迭代后, 梯度算法需要的计算时间约为 3.2 个小时。IGA 的计算量参考公式(10), 种群规模为 8×20 时, 进行 500 次遗传迭代需要时间约为 9 个小时。

所以影响 Kogan 算法效率的主要因素为大尺度搜索过程中对约束条件的处理, 以及局部最优值的搜索效果。而遗传算法的运算时间主要由种群规模决定, 为了达到好的进化结果希望种群规模越大越

好。本文采用了混合编码方式和并行遗传操作以及具有梯度搜索功能的精英保留策略,可以在较小的种群规模下,使种群快速进化到满意解。

(4) 布局面积约束对波束优化的影响

当天线数目固定时,阵元的最小间距和最大布局面积约束,直接决定了瞬时合成波束的旁瓣电平以及主瓣宽度的边界范围。为了减小天线间的相互遮挡,阵元最小间距设为固定,而布局面积具有很大的灵活性。确定最大布局面积需要综合考虑天线数目、测角分辨率要求、相位漂移约束、建设成本、地形等条件。下面利用 IGA 给出不同布局面积条件下,旁瓣幅度的优化结果以及对应的主瓣宽度。仿真设置初始种群规模为 8×50 ,天线最小间距 40 m,天线阵元数 60,其它参数同上不变。

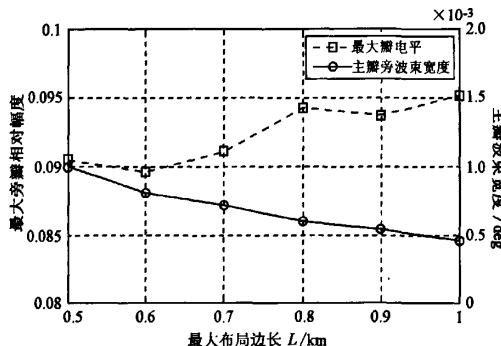


图 7 不同布局面积约束时最优旁瓣幅度及其主瓣宽度

Fig.7 Maximum sidelobe level and 3-dB beamwidth of mainlobe of 60 antennas with different upper limit of optimization area based on IGA

随着布局面积的增大,解空间按指数规律增大。由图 7 可知,布局面积越小,越容易收敛于较低的旁瓣电平;布局面积越大,收敛于低旁瓣越困难。但主瓣宽度随着布局面积的增大而明显减小。

另外布局面积越小,潜在的铺缆建设成本越低。图 8 给出了布局面积为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 和 $700 \text{ m} \times 700 \text{ m}$ 的约束条件下,相应最优布局的光缆铺设长度(线缆长度基于最小生成树算法^[16]进行计算),经计算光缆的铺设长度可以节省 1 km 左右。综上分析,在满足主瓣波束宽度要求下,应在较小的布局面积内进行最小旁瓣优化,必要时可以在 IGA 的基础上进行多目标布局优化。

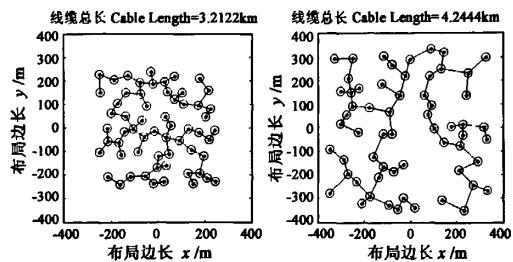


图 8 不同布局面积约束时最优布局的线缆长度

Fig.8 Cable length of optimized configuration in different upper limit of optimization area based on IGA

5 结论

本文对深空大规模天线阵布局优化方法进行了深入探讨,推导了以最小化旁瓣为目标的布局优化模型,针对 Kogan 梯度法和常规遗传算法应用于天线阵布局的局限性,提出了一种改进的遗传算法。最后通过对天线阵布局的实例仿真得到以下结论:(1)阵列规则布局会产生大的旁瓣电平,所以不是深空阵列布局的可选方案。(2)Kogan 梯度算法在布局优化时具有很大的随机性,其收敛到的局部最优解可能并不是工程满意解,故需要多次反复搜索,其效率较低;而 IGA 具有稳健的收敛特性,其收敛精度主要取决于算法可以承受的计算量。(3)IGA 还可以处理主瓣宽度、铺缆建设成本等多目标优化问题,在深空大规模天线阵布局优化中具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] SETI Institute. Allen Telescope Array Begins Scientific Observations [EB/OL]. <http://www.seti.org/ata/Allen%20Telescope%20Array.htm>, 2008.
- [2] Bock D. 350-antenna sample configurations for the allen telescope array[R]. ATA memo 21, Radio Astronomy Laboratory, University of California at Berkeley, 2001.
- [3] Jamnejad V, Cwik T, Resch G. Cost and reliability study for a large array of small reflector antennas for JPL/NASA deep space network [C]. IEEE Aerospace Conference, 1993: 121–132.
- [4] Jamnejad V. Array antennas for JPL/NASA deep space network[C]. IEEE Aerospace Conference, 2002, 2: 911–921.
- [5] Kamal S. Phased array of large reflectors for deep-space communication[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1): 251–261.

- [6] Kogan L. Optimizing an large array configuration to minimize the sideLobes[J]. IEEE Trans. Antennas Propagation, 2000, 48(7): 1075 – 1078.
- [7] Jones D L. Geometric configurations for large spacecraft-tracking arrays[C]. IEEE Aerospace Conference, 2003, 2: 997 – 1002.
- [8] Kogan L. Optimization of an array configuration minimizing side lobes [R]. MMA Memo 171, National Radio Astronomy Observatory, 1997.
- [9] Dhanesh G K, Mohamed H, Anders R. Synthesis of uniform amplitude unequally spaced antenna arrays using the differential evolution algorithm[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2003, 51(9):2210 – 2217.
- [10] Ares-Pena F J. Genetic algorithm in the design and optimization of antenna array pattern[J]. IEEE Transaction on Antenna and Propagation, 1999, 47(3):506 – 510.
- [11] Rahmat-Samii Y, Michielssen E. Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms[M]. New York: Wiley-Interscience, 1999.
- [12] Keto E. The shapes of cross correlation interferometers[J]. Astrophys. Journal, 1997, 475: 843 – 852.
- [13] 王小平, 曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 74 – 76. [WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Theory, Application and Soft Actualization of Genetic Algorithm[M]. Xi An: Xi An JiaoTong University Press, 2002.]
- [14] Gatti M S. A phased array antenna for deep space communications [C]. IEEE Aerospace Conference, 2008, 1: 1404 – 1412.
- [15] Cornwell T J. A novel principle for optimization of the instantaneous fourier plane coverage of correlation arrays[J]. IEEE Trans., Antennas Propagation, 1988, 36(1):1165 – 1167.
- [16] Cherkassky B V, Goldberg A V, Radzik T. Shortest paths algorithms: theory and experimental evaluation[J]. Mathematical Programming, 1996, 73(2):129 – 174.

作者简介:史学书(1980 –),男,博士研究生,研究方向为深空通信、航天器测控、飞行器实时操作系统和超宽带信号处理系统设计。

通信地址:北京怀柔 3380 信箱 171 号 (101416)

电话:(010)66364219

E-mail:atel@126.com

Research of Optimizing Algorithm for Deep Space Large Arrays Geometric Configuration

SHI Xue-shu¹, WANG Yuan-qin^{1,2}

(1. Academy of Equipment, Command & Technology of PLA, Beijing 101416, China;

2. Institute of Ultra-precision Optical & Electronic Instrument Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Spacecraft tracking and telemetry reception using large arrays composed of numerous small inexpensive reflector antennas is becoming a new choice in future deep-space network development. An improved genetic algorithm for large array geometric configurations optimization is proposed to improve array performance. Firstly, constraints of array configuration are analyzed, and then an optimization model minimizing sidelobe of array for a given tracking direction is build. After discussing the limitation of Kogan gradient algorithm and conventional genetic algorithms, improved genetic algorithm programming framework is given. The simulation results show that improved genetic algorithm not only got higher optimization efficiency, but also suitable for multi-objective array configurations optimization.

Key words: Deep-Space communication; Array antennas; Configuration optimizing; Side-lobes minimizing

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>