

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 9 月 15 日 (15.09.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/188337 A1

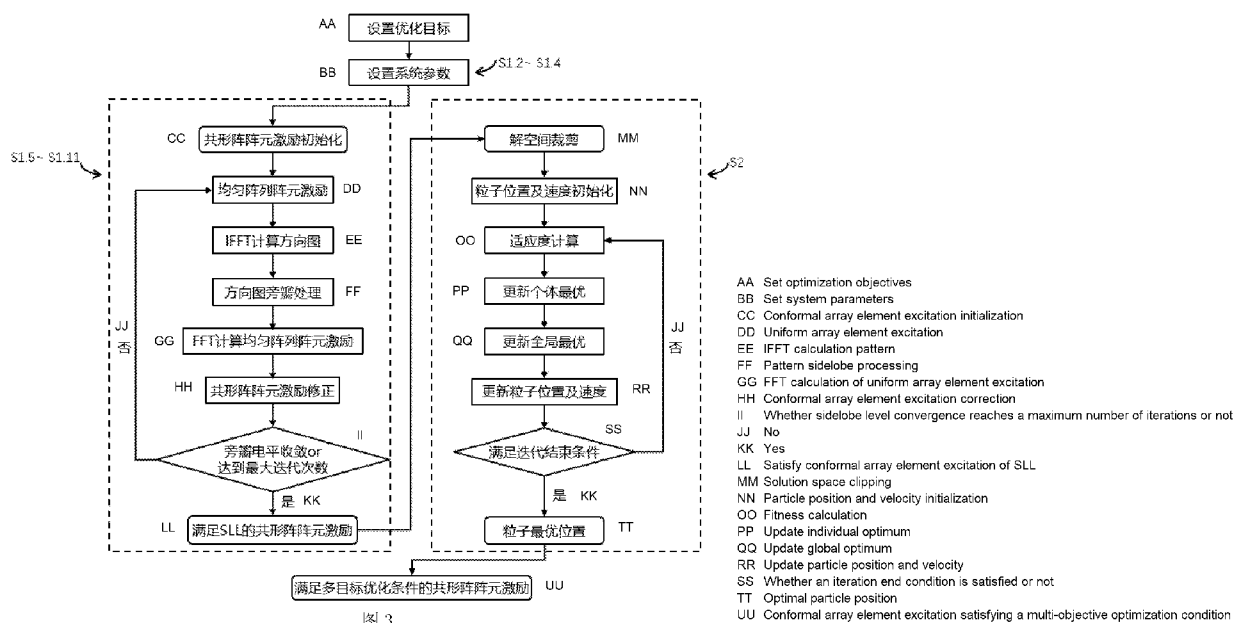
- (51) 国际专利分类号:
G06F 30/27 (2020.01) *H01Q 21/00* (2006.01)
G06N 3/00 (2006.01) *G01S 7/03* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2021/109108
- (22) 国际申请日: 2021 年 7 月 29 日 (29.07.2021)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202110251847.7 2021年3月8日 (08.03.2021) CN
- (71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。
- (72) 发明人: 宋春毅(SONG, Chunyi); 中国浙江省杭州市余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 王昕

(WANG, Xin); 中国浙江省杭州市余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 陈钦(CHEN, Qin); 中国浙江省杭州市余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 俞鼎柯(YU, Dingke); 中国浙江省杭州市余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 席玉章(XI, Yuzhang); 中国浙江省杭州市余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 方文巍(FANG, Wenwei); 中国浙江省杭州市余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 徐志伟(XU, Zhiwei); 中国浙江省杭州市余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 李欢(LI, Huan); 中国浙江省杭州市余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司(HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区古墩

(54) Title: CONFORMAL ARRAY PATTERN SYNTHESIS METHOD BASED ON SOLUTION SPACE CLIPPING PARTICLE SWARM ALGORITHM

(54) 发明名称: 一种基于解空间裁剪粒子群算法的共形阵方向图综合方法



(57) Abstract: Disclosed in the present invention is a conformal array pattern synthesis method based on a solution space clipping particle swarm algorithm. The method comprises: first, selecting a peak sidelobe level index in a plurality of optimization objectives, designing an iterative process based on an improved amplitude-phase projection method and a fast Fourier transform, and completing pattern single-objective synthesis under the dynamic range constraint of the array element excitation amplitude; and carrying out particle swarm algorithm solution space clipping on the basis of the conformal array element excitation obtained by the iteration, such that a particle swarm is subjected to small-range refined search, and finally, multi-objective synthesis of a conformal array pattern is realized, and the conformal array element excitation meeting the plurality of optimization objectives is obtained. According to the present invention, the solution space of the particle swarm algorithm is clipped by using the low-complexity fast Fourier transform method, the

路 701 号 紫 金 广 场 C 座 1506 室 / 贾 玉 霞,
Zhejiang 310013 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

algorithmic calculation amount is reduced, the local convergence problem of the particle swarm algorithm is effectively avoided, and the algorithm performance of the particle swarm algorithm for solving the conformal array pattern multi-objective synthesis problem is significantly improved.

(57) 摘要: 本发明公开了一种基于解空间裁剪粒子群算法的共形阵方向图综合方法, 该方法首先选取多优化目标中的峰值旁瓣电平指标, 设计了基于改进幅相投影法和快速傅里叶变换的迭代过程, 完成阵元激励幅度动态范围约束下的方向图单目标综合; 并基于上述迭代得到的共形阵阵元激励, 进行粒子群算法解空间裁剪, 使粒子群进行小范围的精细化搜索, 最终实现共形阵方向图的多目标综合, 得到满足多个优化目标的共形阵阵元激励。本发明使用低复杂度快速傅里叶变换方法对粒子群算法解空间进行裁剪, 降低算法计算量, 有效避免了粒子群算法的局部收敛问题, 显著提升了粒子群算法解决共形阵方向图多目标综合问题时的算法性能。

说明书

一种基于解空间裁剪粒子群算法的共形阵方向图综合方法

技术领域

本发明涉及阵列天线领域，尤其是涉及一种基于解空间裁剪粒子群算法的共形阵方向图综合方法。

背景技术

近年来，雷达系统迅猛发展，使用场景愈加广泛。作为雷达系统电磁收发装置的核心部分，阵列天线备受关注。在不同的使用场景下，针对不同的使用需求，阵列天线需要产生特定的远场方向图。如何通过对阵列天线阵元激励的综合来实现所需阵列方向图一直是研究的热点问题。在工程领域，在实现方向图综合问题时，也会面临诸多限制，阵元激励幅度的动态范围（Dynamic Range Ratio, DRR）就是一个重要的方面，较高的 DRR 会提高馈电网络的设计难度，增加阵列馈电网络的成本，因此，在综合得到期望阵列方向图的同时，将阵元激励的 DRR 限制在合理范围内十分重要。

共形阵列与载体相融合，二者具有相同的形状特点，这一特性使共形阵具有可用口径较大，宽角扫描等诸多优点。因此近年来有关共形阵列的相关技术研究也在逐渐升温，但与此同时，共形阵的方向图综合面临许多挑战。共形阵由于其形状特性，远场方向图无法分解为阵因子与阵元方向图的乘积形式，传统方法如切比雪夫综合，泰勒综合方法并不适用，FFT 算法由于只能用来优化阵因子，也面临失效的问题。另外，适用于共形阵的交替投影法也具有易陷入局部收敛等缺点。

由于在多参数，非线性目标函数的优化问题上的独特优势，以粒子群优化算法为代表的智能优化算法十分适用于共形阵的方向图综合问题。粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）由 J.Kennedy 和 R.C.Eberhart 等于 1995 年提出。PSO 算法简单，参数数目较少，较为容易实现。但由于粒子向量维度与待优化参数数目相同，因此当待优化参数数目较高时，解空间维度较高，算法收敛速度变慢，并且容易陷入局部收敛。因此，需要针对性地对 PSO 进行优化。现有的优化多集中于粒子更新机制改进，惯性权重改进以及与其他智能优化算法融合等方面。针对基本 PSO 的粒子初值在解空间随机生成这一方面的改进并未进行。

发明内容

本发明的目的在于针对上述已有技术并未考虑优化解空间的不足，基于方向图单目标优

化结果,使 PSO 算法的粒子在裁剪后的解空间作小范围精细化搜索,改善基本 PSO 算法初值随机给定造成的搜索速度慢和局部收敛等问题,提升算法性能,实现阵元激励动态范围限制下的共形方向图综合,得到满足多个优化目标的共形阵阵元激励

本发明的目的通过如下的技术方案来实现:

一种基于解空间裁剪粒子群算法的共形阵方向图综合方法,包括以下步骤:

S1: 将峰值旁瓣电平抑制指标 SLL 作为唯一指标,基于投影阵列与共形阵列之间的激励转换关系和投影阵列与均匀阵列阵元激励之间的最小二乘关系,实现共形阵列与均匀阵列之间的阵元激励转换,使用 IFFT 和 FFT 方法对方向图进行快速计算和处理,得到阵元激励幅度动态范围约束下的满足 SLL 的共形阵阵元激励;

S2: 根据 S1 得到的阵元激励,进行粒子群算法的解空间裁剪,并设计非线性更新的权重系数,保证充分的全局搜索,根据多个优化目标设计适应度函数,对共形阵方向图做进一步优化,得到阵元激励幅度动态范围约束下的满足多个优化目标的共形阵阵元激励。

进一步地,所述 S1 通过以下子步骤来实现:

S1.1: 根据设计指标设置优化目标,包括归一化远场方向图峰值旁瓣电平抑制指标 SLL、主波束第一零陷宽度最大值 $FNMW_e$ 、期望零陷位置 $NULL_{point_e}$ 与零陷深度 $NULL_{value_e}$;

S1.2: 设定阵元数 N, 阵元编号 1~N, 设定阵元工作中心频率 f , 计算得到波长 λ :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

其中, $c = 3 \times 10^8 m/s$, 为真空中电磁波速度;

设定阵元间距为 $\frac{\lambda}{2}$, 以阵列对称中心点所在切线方向为 x 轴方向, 以过该点法线方向为 y 轴方向, 建立全局直角坐标系, 并将各阵元在局部坐标系下的方向图函数 $f(\theta)$ 转换为全局坐标系下的方向图函数 $f_n(\theta)$, 计算得到共形阵列远场方向图 $F(\theta)$:

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n f_n(\theta) \cdot \exp(jk\vec{r}_n \cdot \vec{r}) \quad (2)$$

其中: A_n 为第 n 个阵元的激励; k 为波长数, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; $\vec{r}$ 为主波束指向的远场方向; $\vec{r}_n$ 为第 n 个阵元在全局坐标系下的位置矢量; j 表示虚数单位;

S1.3: 设定共形阵阵元激励幅度动态范围最大值为 drr , 将阵元激励 A_n 表示为:

$$A_n = I_n \cdot \exp(j\alpha_n) \quad (3)$$

其中, I_n 为第 n 个阵元激励的幅值, α_n 为第 n 个阵元激励的相位。计算得到 I_n 的取值范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$, $\alpha_n = k\vec{r}_n \cdot \vec{r}_0$, 其中 $\vec{r}_0$ 为主波束方向在全局坐标系下的位置矢量;

S1.4: 在 S1.3 所确定的幅值范围内, 随机初始化共形阵阵元激励;

S1.5: 设定主波束方向 $\theta_0 = 0^\circ$, 为全局坐标系 y 轴方向, 在主波束方向上对共形阵列进行投影, 得到投影阵列; 投影阵列阵元 x 轴方向坐标与对应共形阵列阵元相等, y 轴方向坐标为 0; 基于近似相等的峰值旁瓣电平关系, 投影阵列与共形阵列之间的激励转换关系通过下式计算:

$$I_{pn} = \frac{I_n |f_n(\theta_0)|}{|f(\theta_0)|} \quad (4)$$

其中, I_{pn} 为投影阵列第 n 个阵元的激励幅度; $|f_n(\theta_0)|$ 为共形阵列第 n 个阵元在主波束方向的阵元方向图幅度; $|f(\theta_0)|$ 为投影阵列中阵元方向图在主波束方向的幅度;

将投影阵列按照更小的间距进行插值, 将投影阵列转换为间距更小的均匀阵列, 每个投影阵列阵元通过以其为中心的一段均匀阵列阵元来表示; 基于投影阵列和均匀阵列的导向矢量矩阵之间存在的最小二乘关系, 得到投影阵列与均匀阵列之间的激励转换关系矩阵:

$$c = (E_e^H E_e)^{-1} E_e^H E_p \quad (5)$$

其中, E_p 为投影阵列导向矢量矩阵, E_e 为均匀阵列导向矢量矩阵, c 为满足该最小二乘关系的转换矩阵;

S1.6: 依照均匀阵列与阵因子之间的逆傅里叶变换计算得到阵因子, 与阵元方向图的乘积即为远场方向图;

S1.7: 按照峰值旁瓣电平抑制指标 SLL, 将超出该指标的方向图采样点数值修正为满足指标的数值;

S1.8: 将修正后的方向图除以阵元方向图得到阵因子, 并采用傅里叶变换得到均匀阵列激励数值;

S1.9: 对公式 (4) 和 (5) 进行逆运算, 得到共形阵阵元激励;

S1.10: 根据阵元幅度激励范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$ 对共形阵列阵元激励进行修正, 使其满足阵元激励幅度动态范围限制;

S1.11: 迭代进行 S1.5-S1.10, 如果共形阵阵元激励满足动态范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$ 并且方向图满足峰值旁瓣电平抑制指标, 迭代终止, 否则运行到设定的最大次数, 得到满足峰值旁瓣电平抑制指标 SLL 的共形阵阵元激励。

进一步地, 所述 S2 通过以下子步骤来实现:

S2.1: 基于 S1 得到的共形阵阵元激励和 S1.3 得到的阵元激励的幅值范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$, 将解空

间进行合理的裁剪,解空间的粒子每一维对应共形阵列中的一个阵元激励,确定第*i*维的解空间搜索范围如下:

$$X_i^L = \max\left(X_i^{init} - \sigma, \frac{1}{drr}\right) \quad (6)$$

$$X_i^U = \min(X_i^{init} + \sigma, 1) \quad (7)$$

其中, X_i^L 为粒子第*i*维搜索范围的下限, X_i^U 为第*i*维搜索范围的上限, X^{init} 为 S1 得到的共形阵阵元激励所组成的向量, 维数与共形阵阵元数相等, X_i^{init} 为 X^{init} 的第*i*维, σ 为解空间裁剪因子, 代表在 S1 得到的共形阵阵元激励附近所保留的解空间范围;

S2.2: 在裁剪后的解空间中进行粒子的位置及速度的随机初始化;

S2.3: 按照下式计算粒子适应度, 更新个体最优值和种群全局最优值

$$f = \mu_1 \cdot sll_{total} + \mu_2 \cdot \max((FNMW - FNMW_e), 0) + \mu_3 \cdot (10 \cdot |NULL_{point} - NULL_{point_e}| + |NULL_{value} - NULL_{value_e}|) \quad (8)$$

其中, sll_{total} 为方向图所有采样点数值中所有高于峰值旁瓣电平抑制指标 SLL 部分的加和; $FNMW$ 和 $FNMW_e$ 为第一零陷波束宽度的实际值与期望值; $NULL_{point}$ 和 $NULL_{point_e}$ 为零陷位置的实际值与期望值; $NULL_{value}$ 和 $NULL_{value_e}$ 为零陷数值的实际值与期望值; μ_1 、 μ_2 、 μ_3 为权重系数;

S2.4: 利用下式计算并更新粒子的速度和位置:

$$V_{id}^k = \omega V_{id}^{k-1} + c_1 r_1 (pbest_{id} - X_{id}^{k-1}) + c_2 r_2 (gbest_d - X_{id}^{k-1}) \quad (9)$$

$$X_{id}^k = X_{id}^{k-1} + V_{id}^k \quad (10)$$

其中, ω 为惯性权重系数; c_1 和 c_2 为加速因子; r_1 和 r_2 为 [0,1] 之间的满足均匀分布的随机数; $pbest_{id}$ 为个体最优值; $gbest_d$ 为全局最优值。 V_{id}^k 在第 *k* 次迭代中粒子的第*i*维的速度, X_{id}^k 为第 *k* 次迭代中粒子的第*i*维的位置;

S2.5: 为了在搜索中强调充分的全局搜索, 将 ω 根据下式进行非线性更新:

$$\omega = \left(1 - \left(\frac{k}{T}\right)^3\right) \cdot \omega_r + \omega_0 \quad (11)$$

其中, *k* 为当前迭代次数, *T* 为最大迭代次数, ω_r 为 ω 取值范围的放缩系数, ω_0 是 ω 取值范围的最小值;

S2.6: 如果迭代达到最大次数, 则运算终止, 否则跳转到 S2.3; 最终得到满足 S1.1 设置的优化目标的共形阵阵元激励。

本发明的有益效果如下：

本发明的基于解空间裁剪粒子群算法的共形阵方向图综合方法，聚焦研究基于 PSO 的共形阵列方向图综合技术，着眼于使用低复杂度的 FFT 算法得到单目标优化结果，并基于该结果对 PSO 算法的解空间进行裁剪，有效提升了算法的收敛速度并且避免了局部收敛问题，从而提升了 PSO 算法性能，能够实现共形阵列的多目标方向图优化，得到满足多优化目标的共形阵阵元激励。

附图说明

图 1 是共形阵列模型示意图。

图 2 是本发明实施例 S1 步骤的示意图。

图 3 是本发明实施例的算法流程图。

图 4 是本发明实施例的方向图综合方法、基本 PSO 方法优化后得到的远场方向图对比图。

图 5 是本发明实施例的方向图综合方法、基本 PSO 方法优化后得到的最优适应度值对比图。

图 6 是本发明实施得到的阵元激励幅度动态范围约束下的满足多目标优化的共形阵阵元激励分布图。

具体实施方式

下面根据附图和优选实施例详细描述本发明，本发明的目的和效果将变得更加明白，以下结合附图和实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

本发明的基于解空间裁剪粒子群算法的共形阵方向图综合方法，如图 1~图 3 所示，该方法包括以下步骤：

S1：将峰值旁瓣电平抑制指标 SLL 作为唯一指标，基于投影阵列与共形阵列之间的激励转换关系和投影阵列与均匀阵列阵元激励之间的最小二乘关系，实现共形阵列与均匀阵列之间的阵元激励转换，使用 IFFT 和 FFT 方法对方向图进行快速计算和处理，得到阵元激励幅度动态范围约束下的满足 SLL 的共形阵阵元激励；所述 S1 通过以下子步骤实现：

S1.1：根据设计指标设置优化目标，优化目标包括归一化远场方向图峰值旁瓣电平抑制指标 $SLL = -35\text{dB}$ 、主波束第一零陷宽度最大值 $FNMW_e = 10^\circ$ ，期望零陷位置 $NULL_{point_e} = \pm 30^\circ$ 与零陷深度 $NULL_{value_e} = -60\text{dB}$ ；

S1.2：设定阵元数 $N=41$ ，阵元编号 1~41，设定阵元工作中心频率 f ，计算得到波长 λ ：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

其中, $c = 3 \times 10^8 m/s$, 为真空中电磁波速度;

设定阵元间距为 $\frac{\lambda}{2}$, 以阵列对称中心点所在切线方向为 x 轴方向, 以过该点法线方向为 y 轴方向, 建立全局直角坐标系, 并将各阵元在局部坐标系下的方向图函数 $f(\theta)$ 转换为全局坐标系下的方向图函数 $f_n(\theta)$, 对于本实施例, $f_n(\theta) = f(\theta) * \cos(\theta)$ 。计算得到共形阵列远场方向图 $F(\theta)$:

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n f_n(\theta) \cdot \exp(jk\vec{r}_n \cdot \vec{r}) \quad (2)$$

其中: A_n 为第 n 个阵元的激励; k 为波长数, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; $\vec{r}$ 为主波束指向的远场方向; $\vec{r}_n$ 为第 n 个阵元在全局坐标系下的位置矢量; j 表示虚数单位;

S1.3: 设定共形阵列元激励幅度动态范围最大值为 $drr = 5$, 将阵元激励 A_n 表示为:

$$A_n = I_n \cdot \exp(j\alpha_n) \quad (3)$$

其中, I_n 为第 n 个阵元激励的幅值, α_n 为第 n 个阵元激励的相位。计算得到 I_n 的取值范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$, $\alpha_n = k\vec{r}_n \cdot \vec{r}_0$, 其中 $\vec{r}_0$ 为主波束方向在全局坐标系下的位置矢量, α_n 的计算公式可以使阵列远场方向图的指向满足主波束方向;

S1.4: 在 S1.3 所确定的幅值范围内, 随机初始化共形阵列元激励;

S1.5: 设定主波束方向 $\theta_0 = 0^\circ$, 为全局坐标系 y 轴方向, 在主波束方向上对共形阵列进行投影, 得到投影阵列; 如附图 2 所示, 投影阵列阵元 x 轴方向坐标与对应共形阵列阵元相等, y 轴方向坐标为 0; 基于近似相等的峰值旁瓣电平关系, 投影阵列与共形阵列之间的激励转换关系通过下式计算:

$$I_{pn} = \frac{I_n |f_n(\theta_0)|}{|f(\theta_0)|} \quad (4)$$

其中, I_{pn} 为投影阵列第 n 个阵元的激励幅度; $|f_n(\theta_0)|$ 为共形阵列第 n 个阵元在主波束方向的方向图幅度; $|f(\theta_0)|$ 为投影阵列中阵元方向图在主波束方向的幅度;

将投影阵列按照更小的间距进行插值, 将投影阵列转换为间距更小的均匀阵列, 每个投影阵列阵元通过以其为中心的一段均匀阵列阵元来表示; 方向图为阵元激励矩阵和导向矢量矩阵的乘积, 当投影阵列与均匀阵列的远场方向图相等时, 基于投影阵列和均匀阵列的导向矢量矩阵可建立最小二乘关系:

$$\min_c \|E_e c - E_p\|_2^2 \quad (5)$$

其中, E_p 为投影阵列导向矢量矩阵, E_e 为均匀阵列导向矢量矩阵, 基于上式的变式得到投影阵列与均匀阵列之间的激励转换关系矩阵 c :

$$c = (E_e^H E_e)^{-1} E_e^H E_p \quad (6)$$

其中, c 即为为满足该最小二乘关系的转换矩阵, E_e^H 代表 E_e 的共轭转置;

S1.6: 依照均匀阵列与阵因子之间的逆傅里叶变换计算得到阵因子, 与 S1.2 得到的阵元方向图的乘积即为远场方向图, 相较于传统方向图计算公式, 该方法使用快速傅里叶变换, 复杂度低, 计算较快, 对算法整体计算量影响较小, 使 S1 适合作为 S2 前置步骤。

S1.7: 按照峰值旁瓣电平抑制指标 SLL, 将超出该指标的方向图采样点数值修正为满足指标的数值, 即将方向图的旁瓣抑制在 SLL 以下;

S1.8: 将修正后的方向图除以阵元方向图得到阵因子, 并采用傅里叶变换得到均匀阵列激励数值;

S1.9: 对公式 (4) 和 (6) 进行逆运算, 得到共形阵阵元激励;

S1.10: 根据阵元幅度激励范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$ 对共形阵列阵元激励进行修正, 使其满足阵元激励幅度动态范围限制;

S1.11: 迭代进行 S1.5-S1.10, 如果共形阵阵元激励满足动态范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$ 并且方向图满足峰值旁瓣电平抑制指标, 迭代终止, 否则运行到设定的最大次数, 得到满足峰值旁瓣电平抑制指标 SLL 的共形阵阵元激励。

S2: 根据 S1 得到的阵元激励, 进行粒子群算法的解空间裁剪, 并设计非线性更新的权重系数, 保证充分的全局搜索, 根据多个优化目标设计适应度函数, 对共形阵方向图做进一步优化, 得到阵元激励幅度动态范围约束下的满足多个优化目标的共形阵阵元激励; 所述 S2 通过以下子步骤实现:

S2.1: 基于 S1 得到的共形阵阵元激励和 S1.3 得到的阵元激励的幅值范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$, 将解空间进行合理的裁剪, 解空间的粒子每一维对应共形阵列中的一个阵元激励, 确定第 i 维的解空间搜索范围如下:

$$X_i^L = \max\left(X_i^{init} - \sigma, \frac{1}{drr}\right) \quad (7)$$

$$X_i^U = \min(X_i^{init} + \sigma, 1) \quad (8)$$

其中, X_i^L 为粒子第 i 维搜索范围的下限, X_i^U 为第 i 维搜索范围的上限, X^{init} 为 S1 得到的共形阵阵元激励所组成的向量, 维数与共形阵阵元数相等, X_i^{init} 为 X^{init} 的第 i 维, σ 为解空间裁剪

因子,代表在 S1 得到的共形阵阵元激励附近所保留的解空间范围。该式从整体上确定了阵元激励幅度动态范围 $\left[\frac{1}{drr}, 1\right]$ 约束下的粒子搜索的解空间范围;

S2.2: 在裁剪后的解空间中进行粒子的位置及速度的随机初始化;

S2.3: 按照下式计算粒子适应度,更新个体最优值和种群全局最优值:

$$f = \mu_1 \cdot sll_{total} + \mu_2 \cdot \max((FNMW - FNMW_e), 0) + \mu_3 \cdot \left(10 \cdot \left|NULL_{point} - NULL_{point_e}\right| + \left|NULL_{value} - NULL_{value_e}\right|\right) \quad (9)$$

其中, sll_{total} 为方向图所有采样点数值中所有高于峰值旁瓣电平抑制指标 SLL 部分的加和; $FNMW$ 和 $FNMW_e$ 为第一零陷波束宽度的实际值与期望值; $NULL_{point}$ 和 $NULL_{point_e}$ 为零陷位置的实际值与期望值; $NULL_{value}$ 和 $NULL_{value_e}$ 为零陷数值的实际值与期望值; μ_1 、 μ_2 、 μ_3 为权重系数,用于调节搜索效果,对于本实施例, $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 0.5$, $\mu_3 = 0.4$;

S2.4: 利用下式计算并更新粒子的速度和位置

$$V_{id}^k = \omega V_{id}^{k-1} + c_1 r_1 (pbest_{id} - X_{id}^{k-1}) + c_2 r_2 (gbest_d - X_{id}^{k-1}) \quad (10)$$

$$X_{id}^k = X_{id}^{k-1} + V_{id}^{k-1} \quad (11)$$

其中, ω 为惯性权重系数; c_1 和 c_2 为加速因子; r_1 和 r_2 为[0,1]之间的满足均匀分布的随机数; $pbest_{id}$ 为个体最优值; $gbest_d$ 为全局最优值。 V_{id}^k 在第 k 次迭代中粒子的第 i 维的速度, X_{id}^k 为第 k 次迭代中粒子的第 i 维的位置;

S2.5: 由于已经对解空间进行了裁剪,因此粒子的搜索特点为小范围的精细搜索,较为强调解空间中的全局搜索。 ω 为调节全局搜索与局部搜索的权重系数,将 ω 根据下式进行非线性更新:

$$\omega = \left(1 - \left(\frac{k}{T}\right)^3\right) \cdot \omega_r + \omega_0 \quad (12)$$

其中, k 为当前迭代次数, T 为最大迭代次数, ω_r 为 ω 取值范围的放缩系数, ω_0 是 ω 取值范围的最小值, ω_r 和 ω_0 可以实现对 ω 取值范围的调节;

S2.6: 对于本实施例,最大迭代次数 T 为 500 代,如果迭代达到最大迭代次数,则运算终止,否则跳转到 S2.3;最终得到满足 S1.1 设置的优化目标的共形阵阵元激励。

图 4 和图 5 所展示的是,当共形阵阵元激励幅度动态范围动态 $drr = 5$,阵列方向图按照 S1.1 设置时,本发明的共形阵方向图综合方法、基本 PSO 算法优化后得到的远场方向图 and 最优适应度值对比图。从图 4 可以看出,本发明的方向图综合方法与基本 PSO 算法相比,可以将峰值旁瓣电平成功抑制在-35dB 以下,第一零陷主波束宽度限制在 10° 以内,并在期望的

位置生成期望的零陷深度。图 5 是 20 次独立实验后得到的最优适应度函数值的平均值随迭代此处变化的曲线，该曲线表明本发明的方向图综合方法可以搜索到更好的最优适应度值，即优化效果更好。图 6 是共形阵阵元激励分布，可以看出阵元激励范围是[0.2,1]，满足阵元激励幅度动态范围限制 $drr = 5$ 。

本领域普通技术人员可以理解，以上所述仅为发明的优选实例而已，并不用于限制发明，尽管参照前述实例对发明进行了详细的说明，对于本领域的技术人员来说，其依然可以对前述各实例记载的技术方案进行修改，或者对其中部分技术特征进行等同替换。凡在发明的精神和原则之内，所做的修改、等同替换等均应包含在发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1. 一种基于解空间裁剪粒子群算法的共形阵方向图综合方法，其特征在于，包括以下步骤：

S1：将峰值旁瓣电平抑制指标 SLL 作为唯一指标，基于投影阵列与共形阵列之间的激励转换关系和投影阵列与均匀阵列阵元激励之间的最小二乘关系，实现共形阵列与均匀阵列之间的阵元激励转换，使用 IFFT 和 FFT 方法对方向图进行快速计算和处理，得到阵元激励幅度动态范围约束下的满足 SLL 的共形阵阵元激励；

S2：根据 S1 得到的阵元激励，进行粒子群算法的解空间裁剪，并设计非线性更新的权重系数，保证充分的全局搜索，根据多个优化目标设计适应度函数，对共形阵方向图做进一步优化，得到阵元激励幅度动态范围约束下的满足多个优化目标的共形阵阵元激励；

所述 S1 通过以下子步骤来实现：

S1.1：根据设计指标设置优化目标，包括归一化远场方向图峰值旁瓣电平抑制指标 SLL、主波束第一零陷宽度最大值 $FNMW_e$ 、期望零陷位置 $NULL_{point_e}$ 与零陷深度 $NULL_{value_e}$ ；

S1.2：设定阵元数 N，阵元编号 1~N，设定阵元工作中心频率 f ，计算得到波长 λ ：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

其中， $c = 3 \times 10^8 m/s$ ，为真空中电磁波速度；

设定阵元间距为 $\frac{\lambda}{2}$ ，以阵列对称中心点所在切线方向为 x 轴方向，以过该点法线方向为 y 轴方向，建立全局直角坐标系，并将各阵元在局部坐标系下的方向图函数 $f(\theta)$ 转换为全局坐标系下的方向图函数 $f_n(\theta)$ ，计算得到共形阵列远场方向图 $F(\theta)$ ：

$$F(\theta) = \sum_1^N A_n f_n(\theta) \cdot \exp(jk\vec{r}_n \cdot \vec{r}) \quad (2)$$

其中： A_n 为第 n 个阵元的激励； k 为波数， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ； $\vec{r}$ 为主波束指向的远场方向； $\vec{r}_n$ 为第 n 个阵元在全局坐标系下的位置矢量； j 表示虚数单位；

S1.3：设定共形阵阵元激励幅度动态范围最大值为 drr ，将阵元激励 A_n 表示为：

$$A_n = I_n \cdot \exp(j\alpha_n) \quad (3)$$

其中， I_n 为第 n 个阵元激励的幅值， α_n 为第 n 个阵元激励的相位；计算得到 I_n 的取值范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$ ， $\alpha_n = k\vec{r}_n \cdot \vec{r}_0$ ，其中 $\vec{r}_0$ 为主波束方向在全局坐标系下的位置矢量；

S1.4：在 S1.3 所确定的幅值范围内，随机初始化共形阵阵元激励；

S1.5: 设定主波束方向 $\theta_0 = 0^\circ$, 为全局坐标系 y 轴方向, 在主波束方向上对共形阵列进行投影, 得到投影阵列; 投影阵列阵元 x 轴方向坐标与对应共形阵列阵元相等, y 轴方向坐标为 0; 基于近似相等的峰值旁瓣电平关系, 投影阵列与共形阵列之间的激励转换关系通过下式计算:

$$I_{pn} = \frac{I_n \cdot |f_n(\theta_0)|}{|f(\theta_0)|} \quad (4)$$

其中, I_{pn} 为投影阵列第 n 个阵元的激励幅度; $|f_n(\theta_0)|$ 为共形阵列第 n 个阵元在主波束方向的阵元方向图幅度; $|f(\theta_0)|$ 为投影阵列中阵元方向图在主波束方向的幅度;

将投影阵列按照更小的间距进行插值, 将投影阵列转换为间距更小的均匀阵列, 每个投影阵列阵元通过以其为中心的一段均匀阵列阵元来表示; 基于投影阵列和均匀阵列的导向矢量矩阵之间存在的最小二乘关系, 得到投影阵列与均匀阵列之间的激励转换关系矩阵:

$$c = (E_e^H E_e)^{-1} E_e^H E_p \quad (5)$$

其中, E_p 为投影阵列导向矢量矩阵, E_e 为均匀阵列导向矢量矩阵, c 为满足该最小二乘关系的转换矩阵;

S1.6: 依照均匀阵列与阵因子之间的逆傅里叶变换计算得到阵因子, 与阵元方向图的乘积即为远场方向图;

S1.7: 按照峰值旁瓣电平抑制指标 SLL, 将超出该指标的方向图采样点数值修正为满足指标的数值;

S1.8: 将修正后的方向图除以阵元方向图得到阵因子, 并采用傅里叶变换得到均匀阵列激励数值;

S1.9: 对公式 (4) 和 (5) 进行逆运算, 得到共形阵阵元激励;

S1.10: 根据阵元幅度激励范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$ 对共形阵列阵元激励进行修正, 使其满足阵元激励幅度动态范围限制;

S1.11: 迭代进行 S1.5-S1.10, 如果共形阵阵元激励满足动态范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$ 并且方向图满足峰值旁瓣电平抑制指标, 迭代终止, 否则运行到设定的最大次数, 得到满足峰值旁瓣电平抑制指标 SLL 的共形阵阵元激励。

2. 根据权利要求 1 所述的基于解空间裁剪粒子群算法的共形阵方向图综合方法, 其特征在于, 所述 S2 通过以下子步骤来实现:

S2.1: 基于 S1 得到的共形阵阵元激励和 S1.3 得到的阵元激励的幅值范围 $[\frac{1}{drr}, 1]$, 将解空

间进行合理的裁剪,解空间的粒子每一维对应共形阵列中的一个阵元激励,确定第*i*维的解空间搜索范围如下:

$$X_i^L = \max\left(X_i^{init} - \sigma, \frac{1}{drr}\right) \quad (6)$$

$$X_i^U = \min(X_i^{init} + \sigma, 1) \quad (7)$$

其中, X_i^L 为粒子第*i*维搜索范围的下限, X_i^U 为第*i*维搜索范围的上限, X^{init} 为 S1 得到的共形阵阵元激励所组成的向量, 维数与共形阵阵元数相等, X_i^{init} 为 X^{init} 的第*i*维, σ 为解空间裁剪因子, 代表在 S1 得到的共形阵阵元激励附近所保留的解空间范围;

S2.2: 在裁剪后的解空间中进行粒子的位置及速度的随机初始化;

S2.3: 按照下式计算粒子适应度, 更新个体最优值和种群全局最优值

$$f = \mu_1 \cdot sll_{total} + \mu_2 \cdot \max((FNMW - FNMW_e), 0) + \mu_3 \cdot \left(10 \cdot |NULL_{point} - NULL_{point_e}| + |NULL_{value} - NULL_{value_e}|\right) \quad (8)$$

其中, sll_{total} 为方向图所有采样点数值中所有高于峰值旁瓣电平抑制指标 SLL 部分的加和; $FNMW$ 和 $FNMW_e$ 为第一零陷波束宽度的实际值与期望值; $NULL_{point}$ 和 $NULL_{point_e}$ 为零陷位置的数值与期望值; $NULL_{value}$ 和 $NULL_{value_e}$ 为零陷数值的实际值与期望值; μ_1 、 μ_2 、 μ_3 为权重系数;

S2.4: 利用下式计算并更新粒子的速度和位置:

$$V_{id}^k = \omega V_{id}^{k-1} + c_1 r_1 (pbest_{id} - X_{id}^{k-1}) + c_2 r_2 (gbest_d - X_{id}^{k-1}) \quad (9)$$

$$X_{id}^k = X_{id}^{k-1} + V_{id}^{k-1} \quad (10)$$

其中, ω 为惯性权重系数; c_1 和 c_2 为加速因子; r_1 和 r_2 为 [0,1] 之间的满足均匀分布的随机数; $pbest_{id}$ 为个体最优值; $gbest_d$ 为全局最优值; V_{id}^k 在第 *k* 次迭代中粒子的第*i*维的速度, X_{id}^k 为第 *k* 次迭代中粒子的第*i*维的位置;

S2.5: 为了在搜索中强调充分的全局搜索, 将 ω 根据下式进行非线性更新:

$$\omega = \left(1 - \left(\frac{k}{T}\right)^3\right) \cdot \omega_r + \omega_0 \quad (11)$$

其中, *k* 为当前迭代次数, *T* 为最大迭代次数, ω_r 为 ω 取值范围的放缩系数, ω_0 是 ω 取值范围的最小值;

S2.6: 如果迭代达到最大次数, 则运算终止, 否则跳转到 S2.3; 最终得到满足 S1.1 设置的优化目标的共形阵阵元激励。

说明书附图

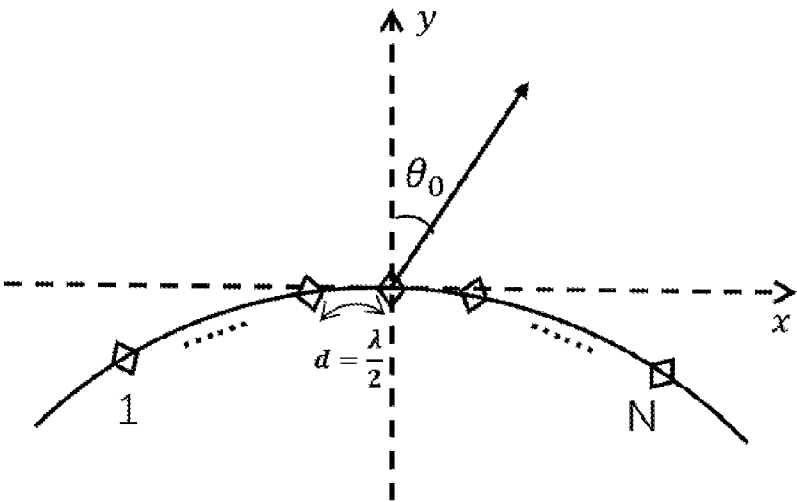


图 1

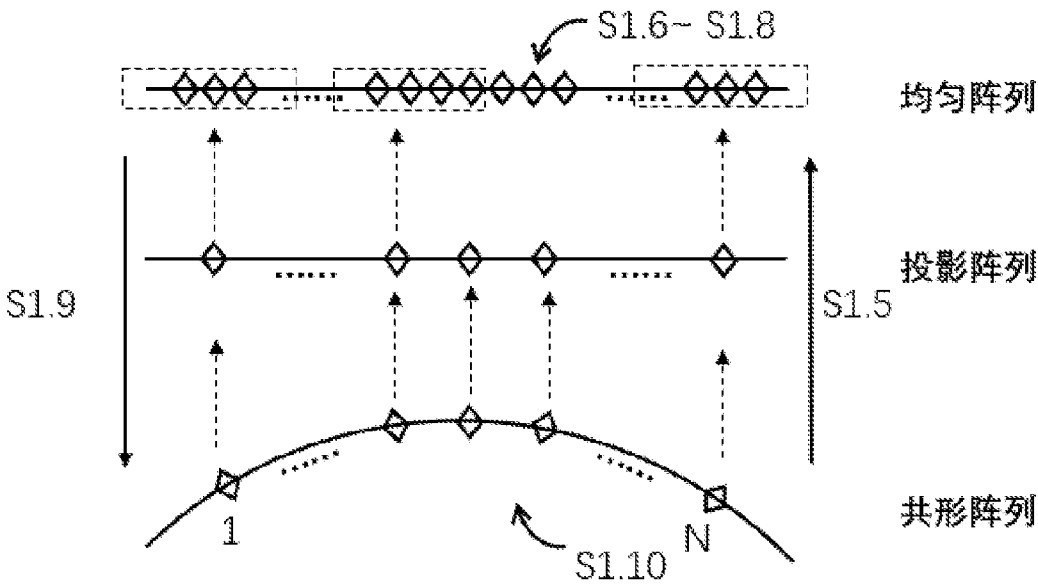


图 2

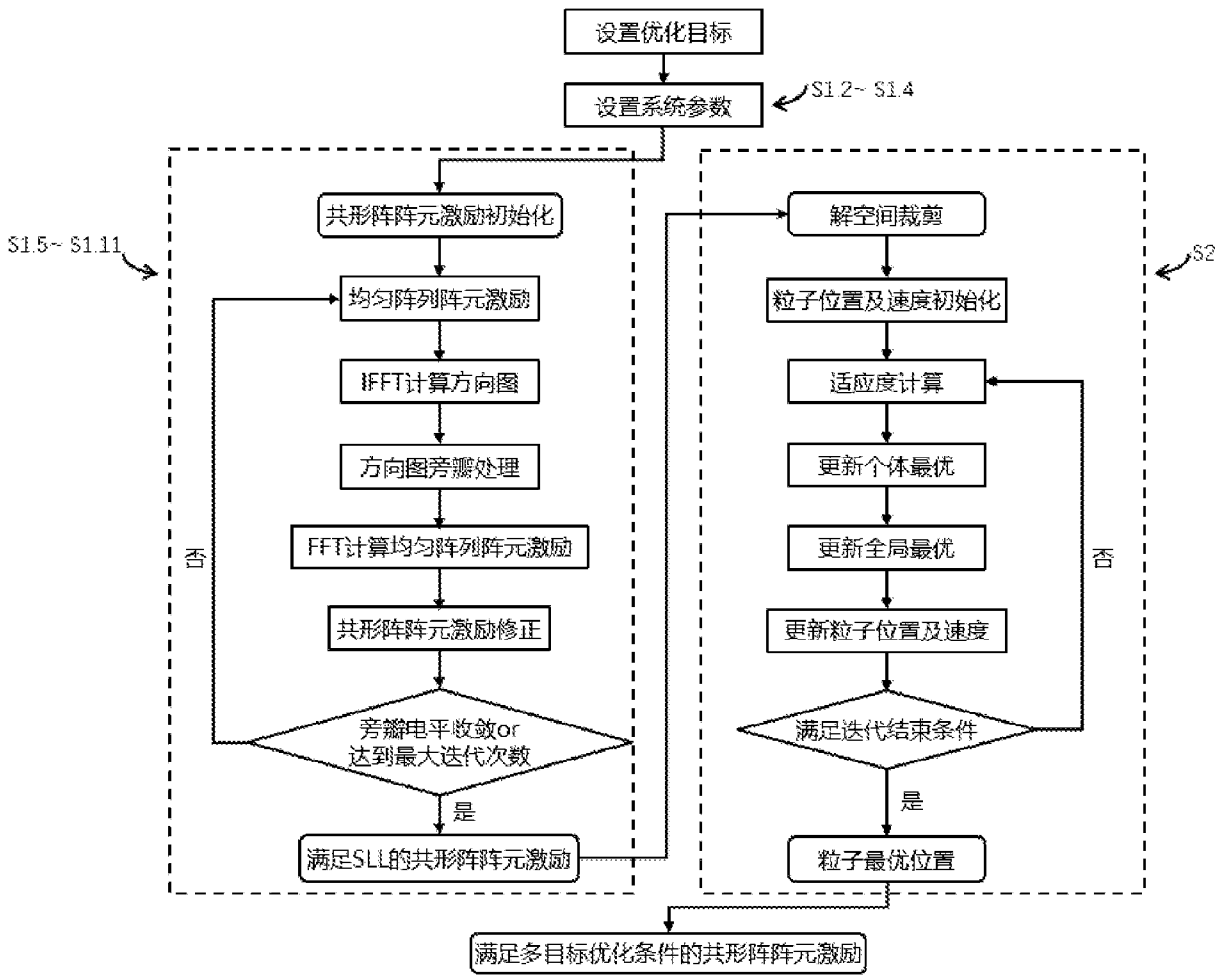


图 3

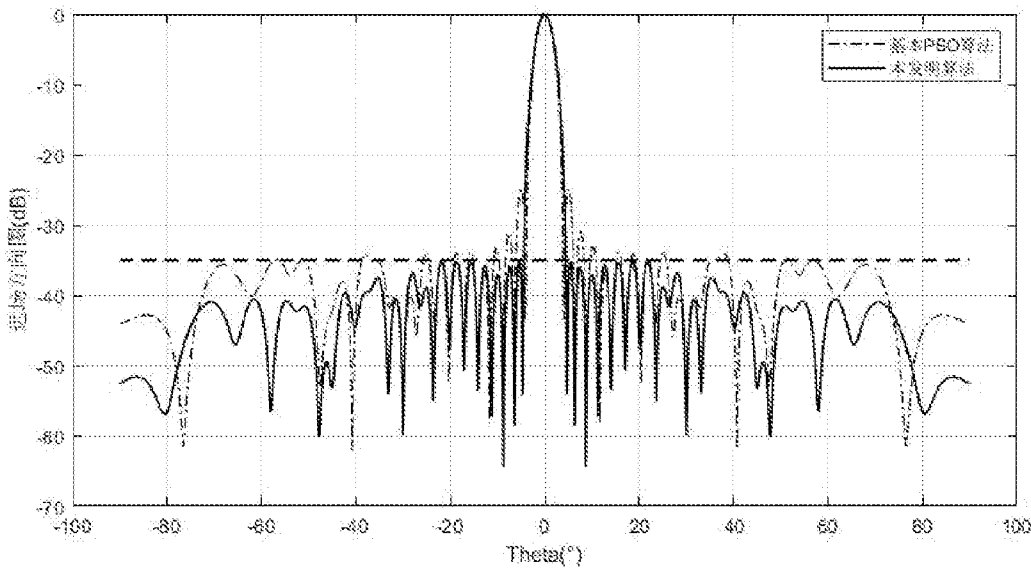


图 4

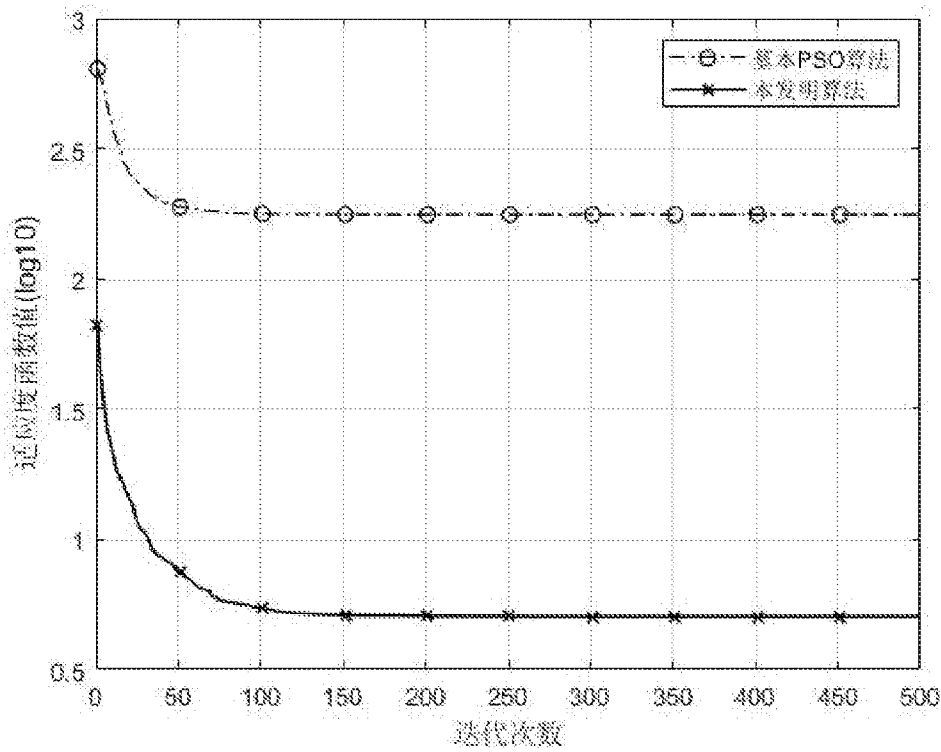


图 5

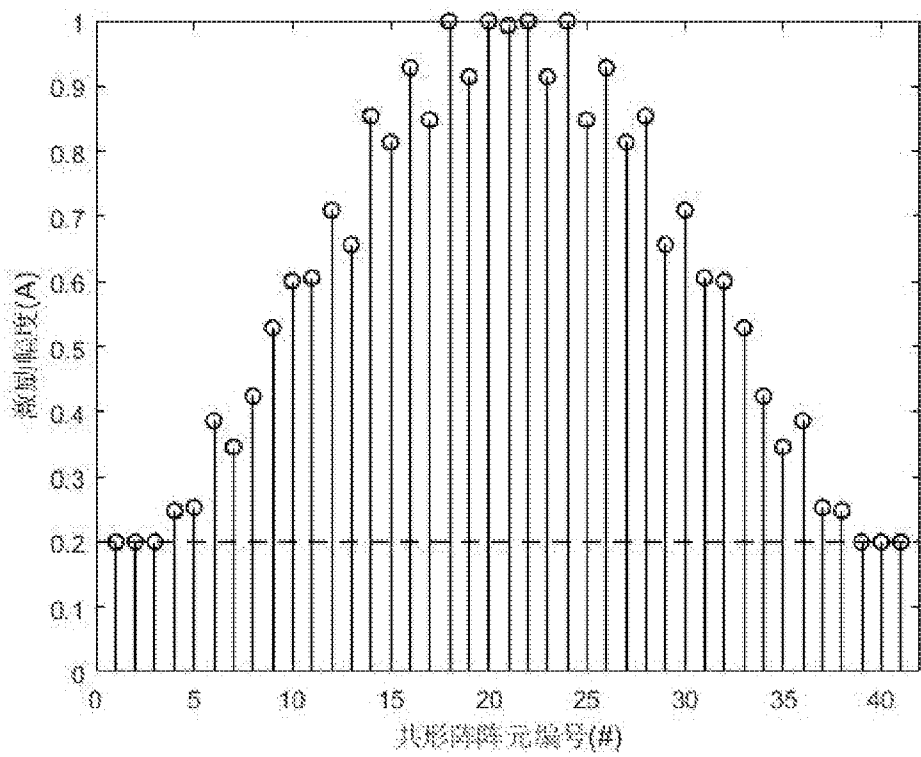


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/109108

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 30/27(2020.01)i; G06N 3/00(2006.01)i; H01Q 21/00(2006.01)i; G01S 7/03(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F G06N H01Q G01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; CNKI; SIPOABS; DWPI; USTXT; WOTXT; EPTXT: 浙江大学, 共形阵, 方向图, 阵元激励, 粒子群, 解空间, 裁剪, 权重, 优化, 目标, conformal array, directional diagram, array element excitation, particle swarm, PSO, solution space, cutting, weight, optimize, object, target, aim

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 113033080 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 25 June 2021 (2021-06-25) description, paragraphs [0005]-[0105], figures 1-6, and claims 1-3	1, 2
A	CN 104393414 A (XIDIAN UNIVERSITY) 04 March 2015 (2015-03-04) description, paragraphs [0004]-[0132], and figures 1-11	1, 2
A	CN 106126836 A (XIDIAN UNIVERSITY et al.) 16 November 2016 (2016-11-16) entire document	1, 2
A	CN 109813967 A (GENERAL TEST SYSTEMS INC.) 28 May 2019 (2019-05-28) entire document	1, 2

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

29 October 2021

Date of mailing of the international search report

17 November 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Authorized officer

Facsimile No. (86-10)62019451

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/109108

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	113033080	A	25 June 2021	None			
CN	104393414	A	04 March 2015	CN	104393414	B	19 April 2017
CN	106126836	A	16 November 2016	CN	106126836	B	10 May 2019
CN	109813967	A	28 May 2019	US	2019158198	A1	23 May 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/109108

A. 主题的分类

G06F 30/27(2020.01)i; G06N 3/00(2006.01)i; H01Q 21/00(2006.01)i; G01S 7/03(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06F G06N H01Q G01S

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS;CNTXT;CNKI;SIPOABS;DWPI;USTXT;WOTXT;EPTXT: 浙江大学, 共形阵, 方向图, 阵元激励, 粒子群, 解空间, 裁剪, 权重, 优化, 目标, conformal array, directional diagram, array element excitation, particle swarm, PSO, solution space, cutting, weight, optimize, object, target, aim

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 113033080 A (浙江大学) 2021年 6月 25日 (2021 - 06 - 25) 说明书第[0005]-[0105]段、图1-6、权利要求第1-3项	1、2
A	CN 104393414 A (西安电子科技大学) 2015年 3月 4日 (2015 - 03 - 04) 说明书第[0004]-[0132]段、图1-11	1、2
A	CN 106126836 A (西安电子科技大学 等) 2016年 11月 16日 (2016 - 11 - 16) 全文	1、2
A	CN 109813967 A (深圳市通用测试系统有限公司) 2019年 5月 28日 (2019 - 05 - 28) 全文	1、2

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2021年 10月 29日

国际检索报告邮寄日期

2021年 11月 17日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

王爽

电话号码 (86-512)88995745

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/109108

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	113033080	A	2021年 6月 25日	无			
CN	104393414	A	2015年 3月 4日	CN	104393414	B	2017年 4月 19日
CN	106126836	A	2016年 11月 16日	CN	106126836	B	2019年 5月 10日
CN	109813967	A	2019年 5月 28日	US	2019158198	A1	2019年 5月 23日