

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.01.008

引用格式:王鹏毅,夏双志.一种大规模发射阵列的稀布方法[J].电讯技术,2016,56(1):44-49.[WANG Pengyi,XIA Shuangzhi.Sparsely optimizing large scale transmitted array[J].Telecommunication Engineering,2016,56(1):44-49.]

一种大规模发射阵列的稀布方法*

王鹏毅,夏双志**

(中国电子科技集团公司第五十四研究所,石家庄 050081)

摘要:为了提高大规模发射阵列的优化效率和降低大规模发射阵列的散热压力,提出了一种基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀布阵方法。首先给出了大规模发射阵列基本子阵结构的确定原则,接着建立基于基本子阵结构的优化模型,之后交替迭代地对基本子阵结构的中心位置进行优化,在优化过程中各基本子阵结构的中心位置的移动总是使得发射阵列方向图函数的最大旁瓣最小。仿真实验表明,提出的大规模发射阵列稀布阵方法能够较快地收敛到较优的结果。

关键词:相控阵天线;稀布阵;大规模发射阵列;子阵结构;交替迭代

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)01-0044-06

Sparsely Optimizing Large Scale Transmitted Array

WANG Pengyi,XIA Shuangzhi

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation(CETC),Shijiazhuang 050081,China)

Abstract:In order to improve the efficiency of optimizing the configuration of large scale transmitted array and reduce its heat dissipation pressure,a method for sparsely optimizing large scale transmitted array configuration based on subarray and alternate iteration is proposed. Firstly,the fundamental principle of the subarray configuration for sparsely optimizing large scale transmitted array is presented. And then,the optimization model is constituted based on subarray. Finally,the positions of subarray elements are optimized in the form of alternate iteration with the proposed optimization method and the final movement of each subarray results in the minimization of the maximal sidelobe of the beamforming pattern of the large scale transmitted array in the optimization process. The computer simulation shows that the proposed optimization method can fast converge toward good result.

Key words:phased array antenna;sparse array;large scale transmitted array;subarray configuration;alternate iteration

1 引言

相控阵天线具有波束指向和波束形状快速变化的能力,且易于形成多个波束,可在空间实现信号合成,这些特点使得其可实现多种功能,在单部发射机功率受限制条件下,也能获得所要求的特大功率,为推远系统作用距离、提高系统测量精度和观测包括

隐身目标在内的各种低可观测目标提供了技术潜力^[1-3]。在探测远距离低可观测目标情况下,系统需要大规模发射阵列从而实现所要求的特大功率。对于规则布阵,为了避免栅瓣,阵元间距受最大扫描角度的限制^[3]。当系统工作在 L 频段或更高频率频段时,对于大规模规则布阵的发射阵列,为了避免

* 收稿日期:2015-08-25;修回日期:2016-01-11 Received date:2015-08-25;Revised date:2016-01-11

** 通信作者:hbxszd2000@163.com Corresponding author:hbxszd2000@163.com

栅瓣,需按照数厘米或十几厘米的间距进行布阵,布阵太过密集,阵列的散热将会是一个很大的问题,需要在大规模发射阵列设计时谨慎考虑^[1-3]。另外,对于大规模发射阵列,希望获得较窄的主瓣波束,避免在扫描时出现栅瓣,并保证尽可能低的旁瓣^[4]。

稀布阵技术能够通过稀布阵元增大孔径以获得较窄的主瓣波束宽度,且不出现栅瓣,并能够通过布阵优化技术减小旁瓣^[5-10]。对于大规模发射阵列,综合考虑散热、较窄主瓣波束宽度、扫描范围内无栅瓣和较低的旁瓣等问题,稀布阵技术一种非常有效的布阵技术。对于稀布阵,由于目标函数的高度非线性,很难得到闭式解^[4,10]。文献[5]对比了粒子群算法和遗传算法进行稀布阵的优缺点。文献[6]利用遗传算法和模拟退火对不等间距稀布阵进行综合设计,给出了 200 阵元线阵和 40×20 阵元面阵的优化结果。文献[7]采用一种遗传算法与带极值扰动的简化粒子群优化算法的混合算法进行稀布阵优化。文献[8]提出了一种新的编码方法表示阵元位置,采用遗传算法进行稀布阵优化。文献[9]利用免疫算法优化矩形平面稀疏阵列最大相对旁瓣电平,减少了计算量,提高了运算速度。文献[10]为了提高深空大规模天线阵布局优化的效率,提出了一种基于交替迭代的深空天线阵布局优化算法。当采用遗传算法、粒子群算法和免疫算法等对稀布阵进行优化时,需要在大量个体的多次进化中搜索较优结果,该类算法通常只适用于阵列规模较小,待优化的变量数目不多的情况,不适用于大规模阵列的稀布阵优化^[5-9]。对于大规模阵列的稀布阵优化,待优化变量的维数非常大,基于交替迭代的深空天线阵布局优化算法尽管提高了布局优化效率,但仍然不能直接用来进行大规模阵列的稀布阵优化^[10]。

针对上述文献研究存在的问题,本文提出一种基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀布阵方法,首先给出基本子阵结构的确定原则,接着建立基于基本子阵结构的优化模型;为了提高优化效率,在基本子阵结构基础上,交替迭代地对各基本子阵结构中心位置进行优化,为了达到较好的优化结果,在各基本子阵结构中心位置的移动中加入相比于当前尺度因子的随机扰动和随机地选取交替迭代的基本子阵结构序号。仿真结果表明了本文方法的有效性。

2 大规模发射阵列优化模型

2.1 方向图函数

不失一般性,设定天线布置在 YOZ 平面上,发射阵列方向图函数可以表示为

$$P(\theta, \varphi, \mathbf{e}_e) = \sum_{n=1}^N \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{\lambda}(\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{e} - \mathbf{r}_n \cdot \mathbf{e}_e)\right)\right)。(1)$$

式中: \mathbf{r}_n 表示第 n 个天线阵元的位置矢量,位置矢量 \mathbf{r}_n 的坐标可以表示为 $(0, y_n, z_n)$, y_n 和 z_n 表示第 n 个天线阵元在 Y 轴和 Z 轴的坐标; N 为发射阵列天线阵元数目; \mathbf{e}_e 表示期望波束指向方向的单位矢量; θ 表示来波方向的俯仰角; φ 表示来波方向的方位角; $P(\theta, \varphi, \mathbf{e}_e)$ 表示期望波束指向方向为 \mathbf{e}_e 、来波方向俯仰角为 θ 、方位角为 φ 时的发射阵列方向图函数; \mathbf{e} 表示来波方向单位矢量。

由方向图乘积原理可将式(1)以基本子阵结构的形式表示^[3]:

$$P(\theta, \varphi, \mathbf{e}_e) = \left(\sum_{n=1}^{N_s} \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{\lambda}(\mathbf{S}_n \cdot \mathbf{e} - \mathbf{S}_n \cdot \mathbf{e}_e)\right)\right) \right) \cdot \left(\sum_{n=1}^P \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{\lambda}(\mathbf{s}_n \cdot \mathbf{e} - \mathbf{s}_n \cdot \mathbf{e}_e)\right)\right) \right)。(2)$$

式中: N_s 表示基本子阵结构的阵列元数目; \mathbf{S}_n 表示基本子阵结构中第 n 个天线阵元相对于基本子阵结构中心的位置矢量; P 表示基本子阵结构的数目; \mathbf{s}_n 表示第 n 个基本子阵结构中心的位置矢量; P, N_s 和 N 之间满足关系 $P \cdot N_s = N$ 。

2.2 基本子阵结构

为了对大规模发射阵列进行稀布阵优化,需要根据基本子阵结构确定原则确定基本子阵结构。

确定基本子阵结构没有通用的原则,结合实际工程经验,建议按照如下原则确定基本子阵结构:

- (1) 根据系统需求初步确定大规模发射阵列规模;
 - (2) 根据系统需求初步确定平面阵二维尺寸;
 - (3) 根据天线阵元实际类型、尺寸以及各阵元下功放尺寸确定基本子阵结构中天线阵元二维间距和布阵形式;
 - (4) 基本子阵结构建议采用较规则的布阵形式(如交错布阵或二维等间距布阵等);
 - (5) 基本子阵结构中天线阵元间距可以适当加大(如按照 0.6 ~ 0.8 倍波长间距布置天线阵元)。
- 在确定基本子阵结构后,式(2)中的基本子阵结构的方向图函数 $P_s(\theta, \varphi, \mathbf{e}_e)$ 可以表示为

$$P_s(\theta, \varphi, \mathbf{e}_e) = \sum_{n=1}^{N_s} \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{\lambda}(\mathbf{S}_n \cdot \mathbf{e} - \mathbf{S}_n \cdot \mathbf{e}_e)\right)\right), \quad (3)$$

进一步,式(2)可以表示为

$$P(\theta, \varphi, \mathbf{e}_e) = P_s(\theta, \varphi, \mathbf{e}_e) \cdot \left(\sum_{n=1}^P \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{\lambda}(\mathbf{s}_n \cdot \mathbf{e} - \mathbf{s}_n \cdot \mathbf{e}_e)\right)\right)\right). \quad (4)$$

2.3 优化模型

对于大规模发射阵列稀布阵,优化目标是所有扫描方向的旁瓣最大值最小,在此将主瓣外的栅瓣也作为旁瓣进行统一处理,由此,优化模型可以表示为^[4,10]

$$\left\{ \begin{array}{l} \min\left(\max\left(\frac{P(\theta, \varphi, \mathbf{e}_e)}{P_{\max}}\right)\right) \\ \text{s. t.} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{s}_n \in \Theta, n \in [1, 2, \dots, P] \\ L_{y\min} \leq |s_i(2) - s_j(2)| \leq L_{y\max} \\ L_{z\min} \leq |s_i(3) - s_j(3)| \leq L_{z\max} \\ i, j \in [1, 2, \dots, P], i \neq j \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: P_{\max} 表示发射阵列方向图函数的主瓣峰值; \mathbf{s}_n 表示第 n 个基本子阵结构中心的位置矢量, $s_n(2)$ 和 $s_n(3)$ 分别表示该位置矢量在 Y 轴和 Z 轴上的投影; (θ, φ) 的取值范围为主瓣外的其他所有来波方向; \mathbf{e}_e 的取值范围为扫描范围; Θ 表示布局范围; $L_{y\min}$ 和 $L_{y\max}$ 分别表示基本子阵结构间 Y 方向的最小间距和最大间距; $L_{z\min}$ 和 $L_{z\max}$ 分别表示基本子阵结构间 Z 方向的最小间距和最大间距。 $L_{y\min}$ 通常设置为基本子阵结构 Y 方向的尺寸, $L_{z\min}$ 通常设置为基本子阵结构 Z 方向的尺寸。为了便于大规模发射阵列散热, $L_{y\max}$ 和 $L_{z\max}$ 大于基本子阵结构的 Y 方向尺寸和 Z 方向尺寸。

式(5)所示的基于基本子阵结构的大规模发射阵列稀布阵优化问题可以描述为在布局范围 Θ 内找一组满足约束条件的基本子阵结构中心位置取值使得发射阵列所有扫描方向方向图函数主瓣范围外的最大旁瓣最小。从式(5)中可以看出,基于基本子阵结构的大规模发射阵列稀布阵优化问题高度非线性,自由度个数为 $2P-2$,很难得到大规模发射阵列稀布阵优化的闭式解。

3 基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀布阵方法

为了对大规模发射阵列稀布阵优化,首先根据

基本子阵结构原则确定基本子阵结构,接着建立基于基本子阵结构的优化模型,之后为了提高优化效率,在基本子阵结构基础上,交替迭代地对各基本子阵结构中心位置进行优化。

为了提高大规模发射阵列稀布阵优化的效率,提出的优化方法交替迭代地对各基本子阵结构中心位置进行优化,各基本子阵结构中心位置最终的移动总是使得在当前尺度因子情况下发射阵列方向图函数最大旁瓣最小,由此提出的大规模发射阵列稀布阵优化方法能够收敛到较优结果^[10]。

基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀布阵方法优化流程如图 1 所示。

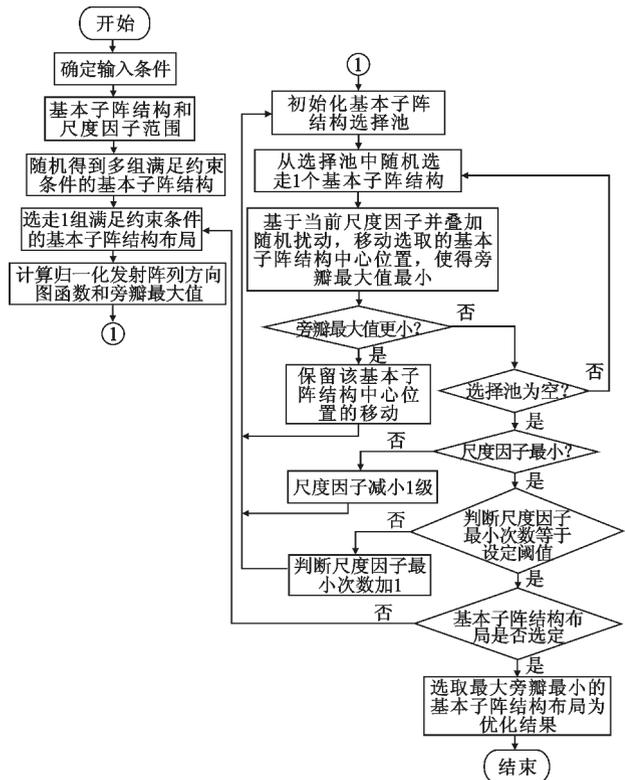


图 1 大规模发射阵列稀布阵方法流程图
Fig. 1 Flow chart of sparsely optimizing large scale transmitted array

图 1 中,基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀布阵方法的步骤描述如下:

- (1) 确定系统规模,根据基本子阵结构原则确定基本子阵结构,并确定基本子阵结构数目和基本子阵结构的大致排列方式;
- (2) 建立式(2)和式(5)所示的基于基本子阵结构的优化模型;

(3) 根据基本子阵结构确定尺度因子范围,尺度因子主要用来描述在优化过程中基本子阵结构中心位置坐标的最大移动量,尺度因子范围建议根据基本子阵结构的尺寸设置 3~5 档;

(4) 随机选取多组满足约束条件的基本子阵结构布局;

(5) 选走 1 组满足约束条件的基本子阵结构布局;

(6) 计算归一化天线阵合成波束方向图函数,计算旁瓣最大值;

(7) 初始化基本子阵结构选择池;

(8) 从选择池中随机选走 1 个基本子阵结构;

(9) 基于当前尺度因子并叠加随机扰动,移动选取的基本子阵结构中心位置使得旁瓣最大值最小;

(10) 如果旁瓣最大值更小,则保留移动的位置并转至步骤 7,否则,转至步骤 11;

(11) 如果选择池不为空,转至步骤 8,否则转至步骤 12;

(12) 如果尺度因子为最后 1 个,转至步骤 13,否则,尺度因子减小 1 级,转至步骤 7;

(13) 如果判断尺度因子最小次数大于设定阈值,则转至步骤 14,否则,判断尺度因子最小次数加 1,转至步骤 7;

(14) 如果判断步骤 4 中的多组满足约束条件的基本子阵结构布局已经选完,则选取合成波束方向图函数最大旁瓣最小的基本子阵结构布局作为优化结果,优化过程结束,否则,转至步骤 5。

从图 1 中可以看出,基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀布阵方法交替迭代地对各基本子阵结构中心位置进行优化,各基本子阵结构中心位置的移动总是使得在当前尺度因子情况下发射阵列方向图最大旁瓣最小;为了达到更好的优化结果,基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀布阵方法在各基本子阵结构中心位置移动时加入随机扰动和随机地选取需要迭代计算的基本子阵结构序号^[10]。

4 数值分析仿真

本节进行数值仿真对基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀布阵方法的性能进行分析。

考虑 L 频段,射频频率为 1.5 GHz,波长为 20 cm,根据系统需求初步确定大规模发射阵列需要

约 16 000 个阵元,大规模发射阵列按照近似方阵布局;经分析,基本子阵结构可由 16 列、每列 10 个阵元共 160 个阵元组成,每列相邻两个阵元间阵元间距为 0.8 倍波长(160 mm),两列之间的间距为 0.6 倍波长(120 mm),相邻两列阵元交错排列,如图 2 所示,图中每一个点表示一个天线阵元。

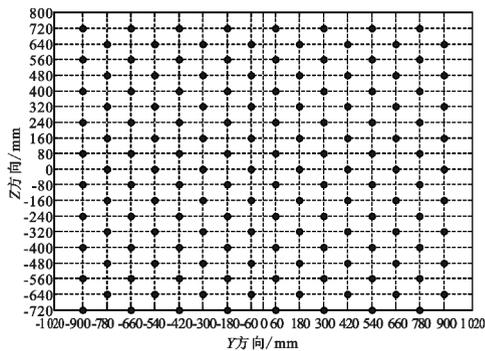


图 2 交错排列的基本子阵结构

Fig. 2 Configuration of subarray

基本子阵结构间 Y 方向最小间距和最大间距设置为 1 920 mm 和 2 688 mm,基本子阵结构间 Z 方向最小间距和最大间距设置为 1 600 mm 和 2 400 mm;16 000 个发射阵列包括 10 行 10 列共 100 个基本子阵结构;二维角度的扫描范围分别为 $\pm 60^\circ$ 度和 $\pm 40^\circ$ 。按照式(5)所示的大规模发射阵列稀布阵优化模型,采用基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀布阵方法进行优化,优化曲线如图 3 所示。优化后在扫描范围内最大旁瓣(栅瓣按照旁瓣进行考虑)约为 -13.5 dB,优化后 100 个基本子阵结构的布局如图 4 所示,图中的每个点表示一个基本子阵结构。该稀布阵优化后的大规模发射阵列法线方向的方向图函数如图 5 所示。

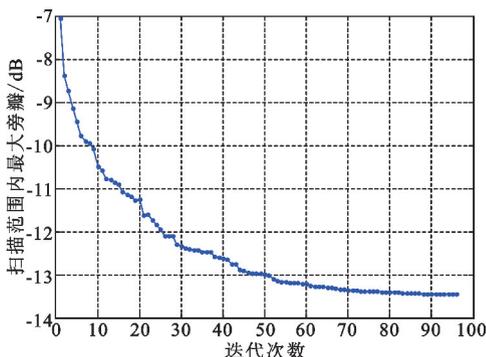


图 3 优化曲线

Fig. 3 Curve of optimization

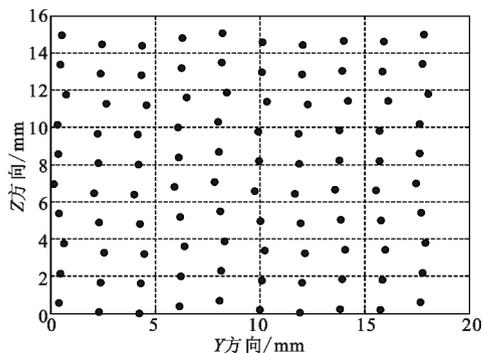


图4 优化后的基本子阵结构布局
Fig. 4 Result of optimizing subarrays

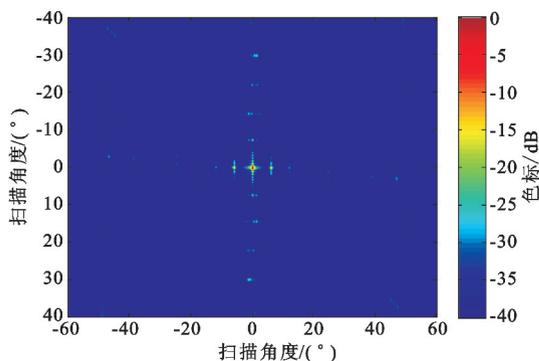


图5 法线方向的方向图函数
Fig. 5 Beamforming pattern of large scale array

为了对比基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀疏方法的优化性能,下面利用遗传算法对大规模发射阵列进行优化。若直接将16 000个阵元的位置作为优化变量,则待优化的变量维数太高,下面也采用子阵结构利用遗传算法进行优化。遗传算法相关参数设置为种群个体数目500,变量维数为200,变量的二进制位数为20,代沟为0.9。利用遗传算法进行优化,优化曲线如图6所示。

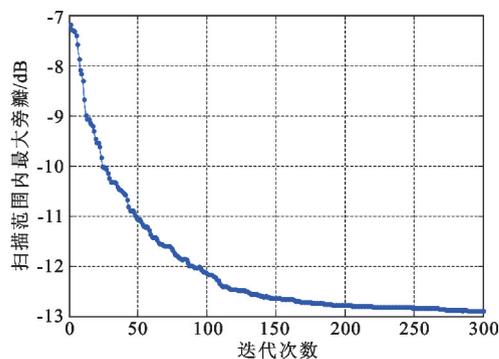


图6 遗传算法优化曲线
Fig. 6 Curve of optimization by genetic algorithm

从图3和图4中可以看出,对于由16 000个阵

元组成的大规模发射阵列,约迭代优化数十次能达到较优的结果;基本子阵结构间的间距较大,便于大规模发射阵列散热;且在扫描范围内没有栅瓣,最大旁瓣约为-13.5 dB。经统计,采用遗传算法优化时单次迭代所需的时间约为本文优化方法单次迭代所需时间的1.13倍。对比图3和图6可知,采用遗传算法优化时,收敛速度慢,且优化结果不及基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀疏阵方法。由此可以看出,基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀疏阵方法能够较快地收敛到较优的结果。

5 结束语

大规模发射阵列稀疏阵有助于降低系统散热压力,得到较窄主瓣波束宽度,使得扫描范围内无栅瓣和得到较低的旁瓣。本文提出的基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀疏阵方法根据基本子阵结构的确定原则,建立基于基本子阵结构的优化模型,并确定模型相关参数;在基本子阵结构基础上,基于建立的优化模型,交替迭代地对各基本子阵中心位置进行优化。仿真结果表明,与遗传算法相比,基于子阵和交替迭代的大规模发射阵列稀疏阵方法能够较快地收敛到较优的结果。本文的研究与结论对大规模发射阵列的工程建设具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 任燕飞,张云,曾浩,等. 新型宽带数字多波束相控阵天线设计[J]. 电讯技术,2013,53(7):932-937.
REN Yanfei,ZHANG Yun,ZENG Hao,et al. Design of a novel wideband digital multi-beam phased array antenna [J]. Telecommunication Engineering,2013,53(7):932-937. (in Chinese)
- [2] 赖奔,梁昌洪,安翔. 大规模有限阵列结构快速算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),2009,36(1):99-105.
LAI Ben,LIANG Changhong,AN Xiang. Fast algorithm for large-scale finite array problems[J]. Journal of Xidian University(Natural Science),2009,36(1):99-105. (in Chinese)
- [3] 张光义,赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
ZHANG Guangyi,ZHAO Yujie. Technology of phased array radar[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2004. (in Chinese)
- [4] 潘妍妍. 稀疏阵的低旁瓣综合算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
PAN Yanyan. The study of sparse arrays aynthesis with low peak side-lobe [D]. Harbin:Harbin Institute of

- Technology, 2012. (in Chinese)
- [5] 潘妍妍,邓维波. 低峰值旁瓣电平稀布阵综合算法研究[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(3):290-294.
PAN Yanyan, DENG Weibo. Study on sparse arrays synthesis with low peak side-lobe level[J]. Radar Science and Technology, 2013, 11(3):290-294. (in Chinese)
- [6] 付云起,袁乃昌,毛钧杰. 基于遗传算法和模拟退火的不等间距稀布阵的设计[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(7):700-704.
FU Yunqi, YUAN Naichang, MAO Junjie. Design of unequally spaced thinned arrays based on genetic algorithm and simulated annealing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2001, 23(7):700-704. (in Chinese)
- [7] 凌劲,龚书喜,张帅,等. 混合算法在稀布阵设计中的应用[J]. 微波学报, 2010, 26(3):11-14.
LING Jin, GONG Shuxi, ZHANG Shuai, et al. Application of hybrid method in design of sparse arrays[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(3):11-14. (in Chinese)
- [8] 张昭阳,赵永波,黄敬芳. 任意位置稀布阵天线的遗传优化[J]. 火控雷达技术, 2009, 38(3):68-70.
ZHANG Zhaoyang, ZHAO Yongbo, HUANG Jingfang. Genetic optimization of sparse-array antenna at arbitrary position[J]. Fire Control Radar Technology, 2009, 38(3):68-70. (in Chinese)
- [9] 张建华,王玉峰,庞伟正. 矩形平面稀布阵旁瓣电平的免疫算法优化[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(4):741-744.

ZHANG Jianhua, WANG Yufeng, PANG Weizheng. Side-lobe level optimization with immune algorithm in rectangular plane thinned array[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(4):741-744. (in Chinese)

- [10] 夏双志,徐秀成,郭肃丽,等. 基于交替迭代的深空天线阵布局优化算法[J]. 载人航天, 2015, 21(5):516-521.
XIA Shuangzhi, XU Xiucheng, GUO Suli, et al. Optimizing algorithm for deep space antenna array configuration based on alternate iteration[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(5):516-521. (in Chinese)

作者简介:



王鹏毅(1968—),男,河北石家庄人,2007年获工学博士学位,现为研究员,主要从事航天测控总体技术研究;

WANG Pengyi was born in Shijiazhuang, Hebei Province, in 1968. He received the Ph. D. degree in 2007. He is now a senior engineer of professor. His research concerns the system

technology of TT&C.

Email:tom2000wang@sina.com

夏双志(1984—),男,湖北黄冈人,2012年获工学博士学位,现为工程师,主要研究方向为航天测控、目标检测和跟踪。

XIA Shuangzhi was born in Huanggang, Hubei Province, in 1984. He received the Ph. D. degree in 2012. He is now an engineer. His research concerns the technology of TT&C, target detection and tracking.

Email:hbxszd2000@163.com