

阵列天线方向图仿真系统设计与研究

陈俭朝¹, 孔维宾^{1,2}, 方忠庆^{1,2}, 贾保敏¹, 郑永涛¹

(1.盐城工学院, 江苏 盐城 224051;

2.盐城市光纤传感及应用工程技术研究中心, 江苏 盐城 224051)

✉1729875138@qq.com; kongweibin2007@sina.com; fangzq@ycit.edu.cn;

jiaycit@sina.com; 1789147061@qq.com



摘要: 针对阵列天线的布阵问题, 设计了一种阵列天线仿真系统, 实现了阵列天线设计的可视化操作。通过设置阵元数、波长、阵元间距等天线相关参数, 系统能够实现直线、平面、圆形和圆柱四类阵列天线的仿真分析。针对四类阵列天线稀疏布阵问题, 系统采用遗传算法, 对稀疏阵列天线的方向图特性进行研究。通过系统的仿真, 用户可以直观地观察阵列天线方向图的变化, 从而调整相关参数实现阵列天线方向图的优化设计。该仿真系统具有操作简单、页面简洁、交互性强等特点, 能够支持和辅助用户分析与设计阵列天线。

关键词: 阵列天线; 遗传算法; 方向图; 稀疏优化

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A

Design and Research of Array Antenna Pattern Simulation System

CHEN Jianzhao¹, KONG Weibin^{1,2}, FANG Zhongqing^{1,2}, JIA Baomin¹, ZHENG Yongtao¹

(1. Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

2. Yancheng Optical Fiber Sensing and Application Engineering Technology Research Center, Yancheng 224051, China)

✉1729875138@qq.com; kongweibin2007@sina.com; fangzq@ycit.edu.cn;

jiaycit@sina.com; 1789147061@qq.com

Abstract: Aiming at the arrangement problem of array antenna, this paper proposes an array antenna simulation system that realizes the visual operation of array antenna design. By setting the antenna-related parameters such as the number of array elements, wavelength, and array element spacing, the proposed system can realize the simulation analysis of four types of array antennas: straight line, plane, circle and cylinder. As to the sparse array problem of four kinds of array antennas, the pattern characteristics of sparse array antennas are studied by using genetic algorithm. Through system simulation, users can intuitively observe the changes of array antenna pattern, so as to adjust relevant parameters and realize the optimal design of array antenna pattern. The simulation system has the characteristics of simple operation, concise page, strong interactivity, which can support and assist users to analyze and design the array antenna.

Keywords: array antenna; genetic algorithm; pattern; sparse optimization

1 引言(Introduction)

随着5G时代的到来, 相较于4G移动通信, 其处理和传输数据流量的性能提升了100倍, 为物联网数据传输提供了承载网络, 使万物互联成为可能^[1-2]。5G技术基于蜂窝移动通信技术, 性能目标是高数据速率、减少延迟、降低成本、提高系统容量和大规模设备连接^[3-5]。然而, 5G移动通信具有高能

耗、基站多、传输距离近等缺陷^[6]。为了解决以上问题, 其中一个方法就是对天线进行阵列排布。

KALOSHIN等人设计了一种具有180°频率扫描扇区的缝隙天线阵列, 确定了满足180°扇区频率扫描要求的波导参数^[7]; 郭华等人利用入侵杂草算法对圆形阵列进行稀疏优化来提高圆阵天线的性能^[8]; TRIGKA等人在均匀直线阵列的基础上进

行混合设计, 设计出的混合直线阵列相比传统的直线阵列性能更好^[9]; 俞成龙等人利用遗传算法对直线阵列进行稀疏优化^[10]; 张承畅等人利用MATLAB工具实现了对三种阵列天线的仿真分析^[11]; 房帅等人基于成功父代选择框架, 改进了差分进化(PSO-JADE)算法, 能够实现目标位于阵列天线近场情况下的方向图综合^[12]; 由于水循环算法(WCA)具有随机搜索能力和稳定性, 仇亮等人将其应用到阵列天线方向图综合问题中^[13]; 马晓岩利用图形用户界面GUI实现人机交流信息^[14]。

波束赋形能够对信号进行组合分配, 减少干扰, 尽可能减少通信过程中的信号衰落与失真。由于阵列天线的方向图影响波束赋形的性能, 本文利用MATLAB GUI开发设计了阵列天线的方向图仿真系统。该系统采用遗传算法对阵列天线进行遗传编码, 可以对四类阵列天线进行优化仿真, 并对四类阵列天线进行稀疏和稀布优化^[15-19]。

2 系统总体设计(Overall system design)

阵列天线仿真系统的主要功能模块如图1所示, 要包括直线阵列、平面阵列、圆形阵列和圆柱阵列四类阵列天线的仿真分析, 以及开始界面、主界面、四个类型界面和仿真界面等。每一个仿真界面都可以进行独立的参数输入和仿真分析。在仿真系统的主要功能模块中, 通过调用相关函数对分解后的功能块进行算法逻辑设计开发。

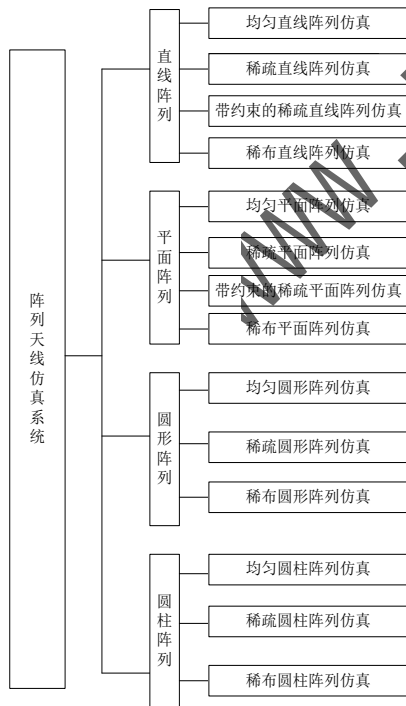


图1 阵列天线仿真系统模块

Fig.1 Array antenna simulation system module

3 系统仿真设计(System simulation design)

本文以稀布圆形阵列为例介绍其原理和设计流程。

3.1 稀布圆形阵列优化模型

首先建立一个半径为 $R = K \cdot \lambda$ 的不均匀圆形阵列模型, 其中 K 为无量纲值, λ 为信号波长。圆形阵列由 N 个不等间距的天线阵元组成。 d_i 表示第 i 个阵元的方位角, 且令圆形阵列主波束指向方向为 (φ_0, θ_0) , 由此可得其方向图函数为:

$$F(\varphi, \theta) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{j \frac{2\pi}{\lambda} R D(\varphi, \theta, d_i)} \cdot f_i(\varphi, \theta) \quad (1)$$

其中, $D(\varphi, \theta, d_i) = \sin \theta \cos(\varphi - d_i) - \sin \theta_0 \cos(\varphi_0 - d_i)$, A_i 表示第 i 个阵元量化后的幅度值, φ 、 θ 分别是球坐标系中 x 轴、 z 轴正方向为参考方向的俯仰角和方位角, $f_i(\varphi, \theta)$ 表示有向阵元的方向图。假定天线阵元方向图 $f_i(\varphi, \theta)$ 足够宽, 满足全照性, 则在直线阵列天线波束扫描范围内可以忽略其影响, 即 $f_i(\varphi, \theta) = 1$ 。天线照射孔径函数为等幅分布, 即不进行幅度加权, 幅度加权系数 $A_i = 1$, 满足均匀分布。这里只考虑圆形阵列方位向的方向图, 即可设定 $\theta = \theta_0$, 此时该函数可以简化为:

$$F(\varphi) = \sum_{i=0}^{N-1} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} R [\sin \theta_0 \cos(\varphi - d_i) - \sin \theta_0 \cos(\varphi_0 - d_i)]} \quad (2)$$

由方向图最大电平定义可知, 方向图最大相对旁瓣电平的计算公式为:

$$MSLL = \max_{\varphi \in S} \{F_{dB}(\varphi)\} = \max_{\varphi \in S} \left\{ \frac{F(\varphi)}{\max(F(\varphi))} \right\} \quad (3)$$

其中, $F_{dB}(\varphi)$ 表示归一化后的方向图函数, S 表示方向图的旁瓣区间。若方向图中主瓣的零功率点为 $2\varphi_0$, 则 $S = (\varphi | 0^\circ \leq \varphi \leq \varphi_0 - \varphi_0 \cup \varphi_0 + \varphi_0 \leq \varphi \leq 360^\circ)$ 相邻阵元方位角间隔满足条件为:

$$\min\{d_i - d_m\} \geq d_c, \quad 1 \leq m < i \leq N \quad (4)$$

式中, d_c 为相邻阵元的最小角度间隔。由相邻阵元最小距离间隔 d_0 、阵列半径 R 及余弦公式可得:

$$d_c = \arccos\left(\frac{2R^2 - d_0^2}{2R^2}\right) \quad (5)$$

取波长的一半为最小距离间隔, 可得第 N 个阵元的方位角为:

$$d_N \leq 360^\circ - d_c - d_1 \quad (6)$$

这里将 d_i 拆分为 x_i 和 $(i-1)d_c$ 两个部分, 则可以得到:

$$d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 + d_c \\ x_3 + 2d_c \\ \vdots \\ x_N + (N-1)d_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ d_c \\ 2d_c \\ \vdots \\ (N-1)d_c \end{bmatrix} = x + \begin{bmatrix} 0 \\ d_c \\ 2d_c \\ \vdots \\ (N-1)d_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

为了保证式(4)和式(7)同时成立, 则有:

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_N \quad (8)$$

同时保证式(6)和式(7)同时成立, 可得:

$$d_N = x_N + (N-1)d_c \leq 360^\circ - d_c \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可以得出:

$$x_N \leq 360^\circ - Nd_c \quad (10)$$

又由式(8)和式(10)得:

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_N \in [0^\circ, 360^\circ - Nd_c] \quad (11)$$

通过以上推算,可以将角度值 d_i 转换为角度差值 x_i ,将搜索空间从 $[0^\circ, 360^\circ]$ 减小到 $[0^\circ, 360^\circ - Nd_c]$,从而定义适应度函数优化模型:

$$\min_x (MSLL), x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} | x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_N \in [0^\circ, 360^\circ - Nd_c] \quad (12)$$

该模型通过优化 x 的取值来优化阵元天线位置,使得圆形阵列方向图方位最大旁瓣电平最低。

3.2 遗传算法

遗传算法由HOLLAND教授提出,该算法起源于生物的遗传学和进化论,算法术语与遗传学具有相关性,例如群体、个体、适应度和变异等。遗传算法是基于概率的全局搜索技术,在进化搜索中不用外部信息,不断积累经验,并依靠自身产生的搜索空间的知识,逐步使群体进化到包含最优解的状态。遗传算法通过遗传算子实现最优解的搜索过程,把上一代的遗传信息遗传给下一代,实现群体进化。遗传算子包括选择算子、交叉算子和变异算子,下面分别作以详细介绍。

(1)选择算子:根据个体的适应度,使用轮赌选择法进行选择,按照个体适应度所占比例的大小来决定个体被选择的概率,并保存每次迭代的最优个体。若种群大小为 N_p ,某个个体 k 的适应度为 f_k ,则个体被选取的概率为:

$$p_k = \frac{f_k}{\sum_{k=1}^{N_p} f_k} \quad (k=1,2,\dots,N_p) \quad (13)$$

(2)交叉算子:随机搭配群体 $P(t)$ (其中 t 为群体代数)中选中的各个个体,以交叉概率 P_c 交换两两个体之间的部分染色体,从而提升其搜索能力。

(3)变异算子:变异是一种主动突变,以变异概率 P_m 对群体中的每个个体随机选择某些基因点上的基因值进行翻转,避免局部收敛。

因遗传算法在最优解问题上的优异表现,故将其应用到阵列天线的布阵问题上。通过具体问题适应性而改进的遗传算法对它们进行稀疏布阵、稀布布阵,进而减少天线阵元,大大降低成本,同时达到降低旁瓣、提高天线性能的目的。

3.3 稀布圆形阵列算法流程

通过遗传算法来对圆形阵列天线进行稀布,以达到减少阵元数、降低成本,同时保证阵列天线方向图旁瓣电平不能过大的设计要求^[20]。

本系统采用遗传算法对均匀圆形阵列进行稀布优化,优化后圆形阵列为稀布圆形阵列。取相邻两个阵元的角度差值作为个体基因进行编码,目的是为了减少群体中的个体基因

搜索区域,提高搜索效率^[21]。采用遗传算法对圆形阵列进行稀布优化的流程图如图2所示。由图2可以看出,首先对相邻阵元角度差值产生一个中间初始种群,并对每个个体基因进行从大到小的排序,然后将其变换为角度间隔种群,对种群中的每一个个体计算适应度,判断其是否满足终止条件。如果满足,输出最优个体为优化结果,算法结束;如果不满足,则对中间种群的个体进行选择、交叉和变异的遗传操作,再重新对每个个体基因进行从小到大的排序,变换到角度间隔种群。对进化后的子代种群进行重新优化判断,如此循环,直至满足终止条件为止。

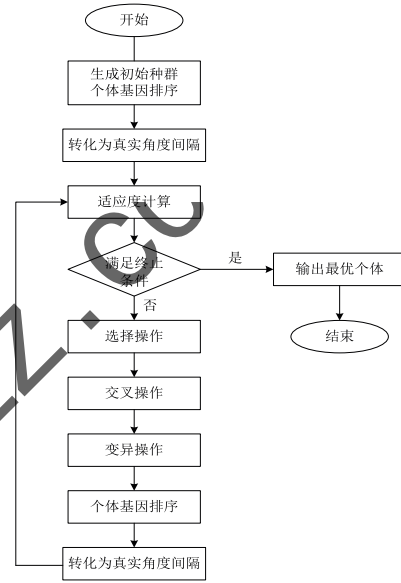


图2 稀布算法流程图

Fig.2 Sparse algorithm flowchart

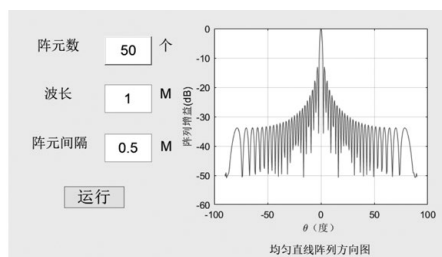
4 仿真结果及分析(Simulation results and analysis)

阵列天线系统对直线阵列、平面阵列、圆形阵列、圆柱阵列四大类,共计14种阵列天线进行仿真。下面对仿真结果进行展示和分析。

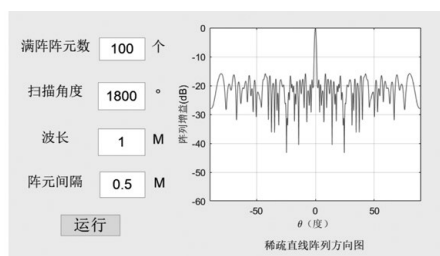
4.1 直线阵列仿真

直线阵列包括均匀直线阵列、稀疏直线阵列、带约束的稀疏直线阵列、稀布直线阵列。直线阵列是最基本的天线阵列,广泛应用于一维电扫描的相控雷达中。均匀直线阵列是将天线阵元按照等间距直线排列,接收和辐射电波的一类阵列,但是因其阵元个数太多,导致成本增加。稀疏直线阵列在其基础上运用遗传算法进行稀疏优化,达到减少阵元个数、提高天线性能的目的。带约束的稀疏直线阵列则是在稀疏直线阵列的基础上,对其进行条件约束,如要求直线阵列两端必须有阵元,稀疏后直线阵列孔径不变等。约束条件的增加使天线仿真更加适用于实际工程。图3展示了四种直线阵列在设置相应参数后的方向图仿真结果。如图3(c)所示,带约束的稀疏直线阵列的约束条件是稀疏后阵列孔径不变,左右

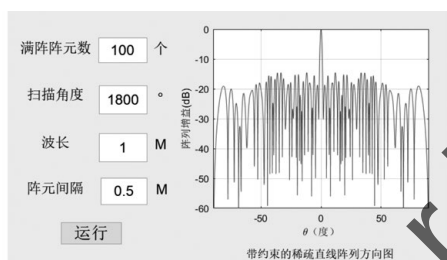
半阵对称。前三种排布方式均为等间距的阵元排布，稀布直线阵列则是不等间距的阵元排布，在稀疏阵列的基础上降低了成本，同时能够有效地抑制阵元天线方向图的旁瓣电平，起到提高天线性能的目的。



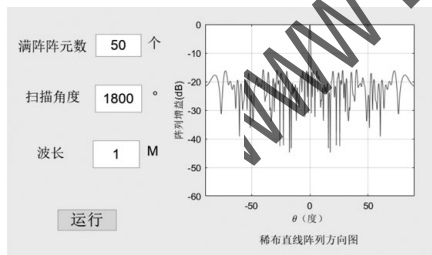
(a)均匀直线阵列方向图



(b)稀疏直线阵列方向图



(c)带约束的稀疏直线阵列方向图



(d)稀布直线阵列方向图

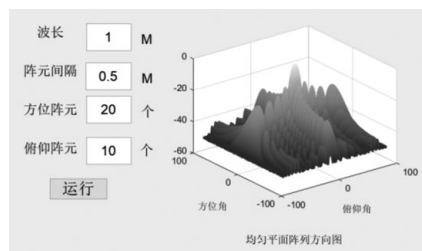
图3 直线阵列仿真方向图

Fig.3 Linear array simulation pattern

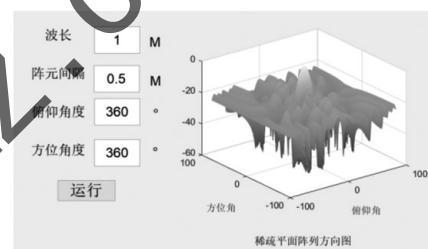
4.2 平面阵列仿真

平面阵列包括均匀平面阵列、稀疏平面阵列、带约束的稀疏平面阵列和稀布平面阵列。平面阵列可以看作是由多个直线阵列排列组成，天线阵元分布在平面上，天线波束在方位和仰角两个方向上都能电扫描的阵列天线。目前，大多数的远程相控雷达以及三坐标相控雷达均采用平面阵列天线。均匀平面阵列具有高增益，窄波束，易于方位、俯仰两维电扫描等特性，但耗费大量阵元，使天线系统造价高昂。稀疏

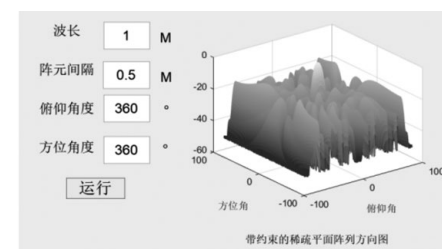
平面阵列是在均匀平面阵列的基础上，通过遗传算法对阵列天线进行稀疏优化，以达到减少阵元、降低造价的目的。为了更好地满足实际工程需要，通常采用在稀疏平面阵列的基础上加上约束条件的方式，即带约束的稀疏平面阵列，以达到相应的效果。如图4所示为四种平面阵列的仿真方向图。图4(c)中的约束条件是稀疏后平面阵列孔径不变，上下左右对称。稀布平面阵列在前三种平面阵列天线的基础上，实现了不等间距稀疏优化，以达到减少更多阵元、提高天线性能的目的。



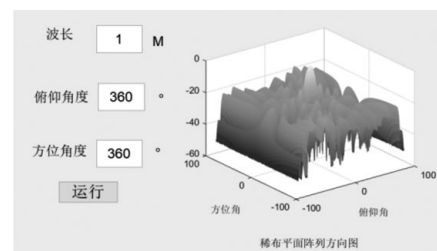
(a)均匀平面阵列方向图



(b)稀疏平面阵列方向图



(c)带约束的稀疏平面阵列方向图



(d)稀布平面阵列方向图

图4 平面阵列仿真方向图

Fig.4 Planar array simulation pattern

4.3 圆形阵列仿真

圆形阵列包括均匀圆形阵列、稀疏圆形阵列和稀布圆形阵列。圆形阵列是将天线阵元排列成一个圆形。相较于其他

阵列, 圆形阵列应用广泛, 能提供 360° 的方位角, 在天线扫描过程中能维持天线波束的形状和天线增益。均匀圆形阵列和前两种均匀阵列一样, 阵元都是等间距排布, 实现接收和辐射电波的功能, 但是由于使用阵元数量太多, 导致成本高昂。因此, 通过遗传算法对其进行稀疏优化, 得到稀疏圆形阵列, 减少了阵元, 降低了成本。稀布圆形阵列则是在稀疏圆形阵列的基础上进行不等间距的稀布优化, 更进一步减少阵元, 提高天线性能。如图5所示为三种圆形阵列仿真方向图。

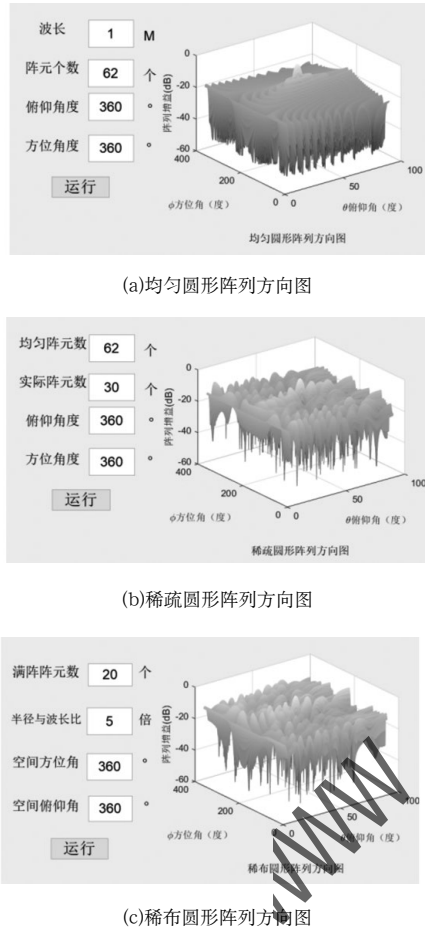


图5 圆形阵列仿真方向图

Fig.5 Circular array simulation pattern

4.4 圆柱阵列仿真

圆柱阵列包括均匀圆柱阵列、稀疏圆柱阵列和稀布圆柱阵列。圆柱阵列是最简单的共形阵列, 能与飞机机身、导弹弹体等圆柱状几何表面吻合, 因此对载体空气动力学的影响大幅降低, 同时扩大了搜索范围, 得到了广泛的应用。均匀圆柱阵列可以看作将均匀圆形阵列平行布置在一个圆柱体上而得来。稀疏圆柱阵列是利用遗传算法对其进行稀疏排布, 达到减少阵元、降低成本的设计要求。稀布圆柱阵列是由均匀圆柱阵列通过遗传算法进行不等间距的稀布排列而得到, 在原有基础上进一步提高性能, 降低成本。如图6所示为三种圆柱阵列仿真方向图。

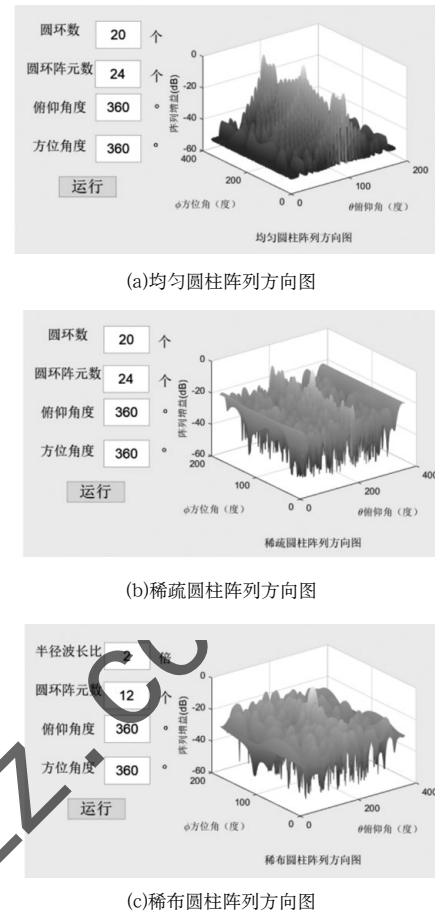


图6 圆柱阵列仿真方向图

Fig.6 Cylinder array simulation pattern

4.5 参数分析

阵列天线的性能好坏与其输入的参数有着直接关系, 阵元数、波长、阵元间隔、圆形阵半径等能够影响阵列天线的性能。下面以均匀平面阵为例分析不同参数对均匀平面阵列天线性能的影响。由图7可以看出不同参数对均匀平面阵列方向图的影响。图7(a)将原始参数设定为波长1 M, 阵元间隔设定为波长的一半0.5 M, 平面阵列两个方向上的阵元数量分别为方位阵元15个, 俯仰阵元10个。由图7(a)可以看出主瓣宽度适中, 半功率波瓣宽度较小, 旁瓣高度较低, 天线性能较好。当图7(b)中将波长由1 M设置为2 M时, 可以明显地看出主瓣宽度变宽, 半功率波瓣变大, 旁瓣高度增加, 天线性能降低。将图7(c)中阵元间隔由0.5 M增加到0.8 M时, 主瓣宽度变小, 半功率波瓣宽度减小, 旁瓣高度降低, 天线性能增强。由图7(d)可以看出, 当把方位阵元由15个提高到25个, 俯仰阵元由10个提高到15个时, 主瓣宽度降低, 半功率波瓣宽度降低, 旁瓣高度降低, 天线性能提升。仿真结果表明, 均匀平面阵列天线性能和阵元数量呈正相关, 与阵元间隔距离呈正相关, 与波长长度呈负相关。用户可以通过该阵列天线仿真系统探究不同参数对不同类型阵列天线性能的影响。

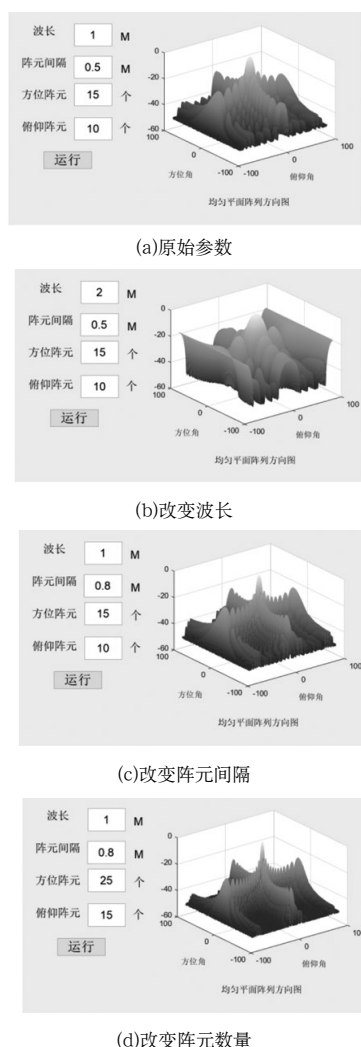


图7 不同参数的均匀平面阵列仿真图

Fig.7 Uniform planar array simulation diagram with different parameters

5 结论(Conclusion)

本阵列天线仿真系统实现了多种阵列天线的仿真,并通过遗传算法实现阵列天线稀疏优化。因此通过该仿真系统,用户可以针对不同场合的需要进行仿真分析,设计适合的阵列天线。在该系统中,通过对不同参数的定量分析,可以直观地观察到不同参数对天线阵列性能的影响,以优化设计阵列天线。

参考文献(References)

- [1] 肖瑞雪,冯英伟,吕国,等.面向5G移动通信的蜂窝物联网关键技术[J].现代电子技术,2020,43(09):29-32.
- [2] 倪艺洋,王玉玺,朱洪波.面向5G的毫米波D2D通信技术综述[J].现代电子技术,2019,42(21):6-12.
- [3] 刘友波,王晴,曾琦,等.能源互联网背景下5G网络能耗管控关键技术及展望[J].电力系统自动化,2021,45(12):174-183.
- [4] MISHRA D, ZEMA N R, NATALIZIO E, et al. A high-end IoT devices framework to foster beyond-connectivity capabilities in 5G/B5G architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(1):55-61.

- [5] LI B, FEI Z S, ZHANG Y. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2):2241-2263.
- [6] 刘炎培,陈宁宁,朱运静,等.面向5G/Beyond 5G的移动边缘缓存优化技术研究综述[J/OL].计算机应用.[2021-09-23].https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1307.TP.20210922.1649.006.html.
- [7] KALOSHIN V A, KALINICHEV V I. Waveguide-Linear antenna array with a 180° frequency scanning sector[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2019, 64(7):675-679.
- [8] 郭华,崔琳,焦亚萌,等.圆形稀疏阵列天线综合[J].信息通信,2017(12):37-38.
- [9] TRIGKA M, MAVROKEFALIDIS C, BERBERIDIS K. Full snapshot reconstruction in hybrid architecture antenna arrays[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2020(243):1-22.
- [10] 俞成龙,宋佳.基于遗传算法的稀疏直线阵列方向图特性研究[J].舰船电子对抗,2021,44(02):73-76.
- [11] 张承畅,余洒,罗元,等.基于Matlab的阵列天线方向图仿真[J].实验技术与管理,2020,37(08):62-67.
- [12] 房帅,张苒萌,孙进平.基于SPS-JADE算法的阵列天线近场方向图综合[J].电子测量技术,2021,44(08):59-64.
- [13] 仇亮,王云秀,郑霞,等.基于WCA的阵列天线方向图综合算法研究及实现[J].陕西科技大学学报,2021,39(01):172-180.
- [14] 马晓岩.基于MATLAB-GUI的风电机组功率特性测试数据分析[J].计算机应用与软件,2018,35(04):325-328,333.
- [15] 刘佳音.基于两种智能算法的阵列天线优化[D].西安:西安电子科技大学,2019.
- [16] 丁扬,王郑杰,伍捍东,等.基于遗传算法的余割平方波束赋形天线设计[J].微波学报,2020,36(S1):119-122.
- [17] 张月.阵列天线的稀疏优化方法研究[D].曲阜:曲阜师范大学,2020.
- [18] 邹乐,王伟,王学田.基于遗传算法的车载雷达天线阵列布局优化方法[J].微波学报,2018,34(S1):155-158.
- [19] 贺怡,蔡明波,武哲.基于遗传算法的赋形天线阵列优化设计[J].微波学报,2016,32(S1):137-139.
- [20] 包子阳.基于MATLAB的遗传算法及其在稀疏阵列天线中的应用[M].北京:电子工业出版社,2017:150-162.
- [21] 温正,孙克华.MATLAB智能算法[M].北京:清华大学出版社,2017:145-166.

作者简介:

陈俭朝(1997-),男,硕士生.研究领域:信号处理与智能控制。

孔维宾(1982-),男,博士,副教授.研究领域:信号处理和微波技术。

方忠庆(1990-),男,博士,讲师.研究领域:光信号处理和固体激光器。

贾保敏(1981-),女,硕士,助理研究员.研究领域:计算数学和计算电磁学。

郑永涛(1998-),男,硕士生.研究领域:系统与自动控制。