

8-7-2020

## Graphic Method to Simulate Planar Arrays Pattern

Shuchun Zhang

*Air Force Harbin Flight Academy Flight Simulation Technology Institute, Harbin 150001, China;*

Yongbin Qiu

*Air Force Harbin Flight Academy Flight Simulation Technology Institute, Harbin 150001, China;*

Jiang Wei

*Air Force Harbin Flight Academy Flight Simulation Technology Institute, Harbin 150001, China;*

Wei Xin

*Air Force Harbin Flight Academy Flight Simulation Technology Institute, Harbin 150001, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Graphic Method to Simulate Planar Arrays Pattern

### Abstract

**Abstract:** Calculating planar arrays pattern is time-consuming in flight simulation whose frame synchronization time is within tens of milliseconds and this would cause removing frames. To resolve this problem, a graphic simulation method was presented to simulate planar arrays' pattern. *Based on analyzing ideal patterns' graphic characteristics, a kernel function was constructed whose graphics could reflect all those pattern's characteristics. Then this kernel's graphics being used as a section plane were rotated in the spatial coordinates to match the ideal pattern. The simulation results show that this method can be rapidly calculated and the simulated pattern is highly true to the ideal pattern.*

### Keywords

fire control radar, AESA, planar array, pattern, graphic simulation

### Recommended Citation

Zhang Shuchun, Qiu Yongbin, Jiang Wei, Wei Xin. Graphic Method to Simulate Planar Arrays Pattern[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 1983-1988.

## 一种平面天线阵列方向图图形化仿真方法

张树春, 仇永斌, 姜巍, 魏鑫

(空军哈尔滨飞行学院飞行仿真技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 平面阵列方向图计算在飞行仿真过程中因耗费计算资源而拖慢毫秒级的仿真同步进程。针对这一问题提出了一种图形化的方向图仿真计算方法。解析理想方向图在三维立体空间上的典型图形特征以及空间剖面特征, 在平面坐标系下利用 Sinc 函数构造能够再现该图形特征的核函数模型, 将该核函数图形作为剖面在空间坐标系下进行旋转, 得到仿真方向图。仿真结果表明: 这种图形化计算方法能够快速逼真再现平面阵列的理想方向图并满足系统的实时同步要求。

**关键词:** 火控雷达; 有源相控阵; 平面阵列; 方向图; 图形仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 09-1983-06

## Graphic Method to Simulate Planar Arrays Pattern

Zhang Shuchun, Qiu Yongbin, Jiang Wei, Wei Xin

(Air Force Harbin Flight Academy Flight Simulation Technology Institute, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Calculating planar arrays pattern is time-consuming in flight simulation whose frame synchronization time is within tens of milliseconds and this would cause removing frames. To resolve this problem, a graphic simulation method was presented to simulate planar arrays' pattern. Based on analyzing ideal patterns' graphic characteristics, a kernel function was constructed whose graphics could reflect all those pattern's characteristics. Then this kernel's graphics being used as a section plane were rotated in the spatial coordinates to match the ideal pattern. The simulation results show that this method can be rapidly calculated and the simulated pattern is highly true to the ideal pattern.

**Keywords:** fire control radar; AESA; planar array; pattern; graphic simulation

## 引言

机载火控雷达是目标探测、跟踪、武器运用以及引导攻击的主要工具, 是载机航电系统中最重要传感器。目前主流战机装备的都是有源相控阵雷达, 有源天线阵列是机载火控雷达的主要技术发展趋势<sup>[1-5]</sup>。在飞行仿真以及战术对抗仿真过程中, 要逼真的再现武器运用性能和战术对抗

场景, 机载火控雷达的性能仿真是一个关键性问题和难点。有源天线阵列的性能是机载有源相控阵雷达的主要性能决定因素, 而天线阵列辐射方向图又是阵列性能仿真的一个关键点。事实上, 在雷达性能仿真以及雷达电子对抗运用仿真过程中, 有源阵列的辐射方向图是仿真逼真度的一个主要决定因素, 例如电子对抗过程中副瓣压制式干扰的性能仿真等。通常情况下, 天线阵列的理想辐射方向图都是通过远场辐射电场方程进行精确理论计算得到的, 即所谓的平面阵列方向图综合、波束赋形或者方向图优化等<sup>[6-8]</sup>。这种理论计算的方法技术成熟且模型完备, 在各种通用教科书中都有详尽的阐述<sup>[9-11]</sup>。但在飞行仿真场



收稿日期: 2015-05-10 修回日期: 2015-08-17;  
作者简介: 张树春(1974-), 男, 黑龙江双城人, 博士, 高工, 研究方向为飞行仿真与非线性滤波; 仇永斌(1974-), 男, 黑龙江双城人, 博士, 工程师, 研究方向为有源相控阵雷达性能仿真; 姜巍(1983-), 男, 黑龙江五常人, 博士, 工程师, 研究方向为可视计算。

<http://www.china-simulation.com>

• 1983 •

景或者仿真对抗场景下, 机载有源天线阵列一般具有数千阵元, 方向图计算因涉及到大型矩阵运算而耗费较多计算资源; 另一方面, 仿真场景是以 ms 为计量单位的仿真帧步长, 在这种时间同步的要求下, 天线阵列辐射方向图作为一个计算点耗费大量的计算资源是得不偿失的, 不但会拖慢仿真同步进程, 造成脱帧, 还将使雷达性能仿真过程无法加入飞行仿真的同步环节。如果单独配置计算机进行计算, 所投入的成本就明显有点儿高。为解决这一问题, 本文在理论计算的大型平面阵列理想方向图的基础上, 深入分析幅度方向图的空间图形特征以及空间剖面图形特征, 根据该图形特征与空间剖面特征, 利用 Sinc 函数构造方向图图形仿真的核函数, 该核函数图形能够全面地逼近平面天线阵列方向图的空间剖面图形特征与空间立体图形特征。之后在空间坐标系下, 以核函数图形作为立体空间的剖面, 通过旋转该剖面图形得到平面阵列方向图的空间立体仿真图形。该仿真图形全面再现了平面阵列理想方向图的空间图形特征。仿真与应用结果表明, 该方法能够较为真实地逼近理论计算模型, 并能够实时计算, 节省计算资源和系统构建的成本。

## 1 平面天线阵列方向图图形特征

平面天线阵列是目前机载有源相控阵火控雷达的主要配置<sup>[1-3]</sup>。具体布阵方式有: 矩形栅格排列的矩形平面天线阵列、矩形栅格排列的圆形平面天线阵列、三角栅格排列的圆形平面天线阵列、三角栅格排列的矩形平面天线阵列、同心圆栅格排列的圆形平面阵列、矩形栅格排列六角形平面天线阵列以及矩形栅格或三角栅格排列的椭圆形平面阵列等多种阵列组阵方式<sup>[1-3,9-11]</sup>。无论何种阵列形状以及栅格排列方式, 该平面阵列空间远场辐射理想方向图都有完备的理论计算公式, 即远场辐射电场方程。通过电场方程理论计算可得到的平面阵列理想方向图空间立体图形, 针对这些立体图形进行图形分析, 可推知理想方

向图的辐射强度在空间分布上的共有图形特征以及空间剖面上的关键图形特征, 根据这些图形特征可构建图形仿真模型来对方向图进行图形化仿真。因而本文解决的技术问题不在于阵列方向图理论计算模型, 只是通过这些模型给出的理想方向图图形来分析方向图图形特征, 因而在本节中所引用的理论计算模型只给出具体的理论计算公式, 具体的公式推导过程以及参数含义, 在文献[9-11]中以及通用的基础理论教材中都有详细的描述, 本领域的工程技术人员也很熟悉, 这里不再详述。首先我们以矩形栅格的矩形阵列和矩形栅格圆形阵列来分析平面阵列的方向图图形特征。

### 1.1 矩形栅格矩形阵列

等距矩形栅格排列矩形阵列如图 1。对于三角栅格排列的矩形天线阵列, 等效于两个具有固定相位差的矩形栅格矩形阵列的叠加, 因而三角栅格排列的阵列可用矩形栅格排列的阵列进行仿真。典型的三角栅格排列的有源天线阵列如 APG-81<sup>[1-3]</sup>。该阵列的远场区辐射电场方程(无扫描, 即扫描中心位于俯仰角 0°和方位角 0°)为:

$$F(\theta, \phi) = \cos^{EF/2} \theta.$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij} e^{j(kx_i \sin \theta \cos \phi)} \cdot e^{j(ky_j \sin \theta \sin \phi)} \quad (1)$$

公式(1)中,  $\theta$  为阵列法向与视轴的夹角, 即天线坐标系下的俯仰角, 范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$ ;  $\phi$  为阵面视轴在 XOY 面上的投影与 x 轴的夹角, 即天线坐标系下的方位角, 范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$ ;  $M \times N$  为矩形阵列孔径,  $\cos^{EF/2}(\theta)$  为阵元因子, 取  $EF=1.5$ ;  $k=2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长;  $a_{ij}$  为阵元权系数,  $d_x$ ,  $d_y$  分别为阵元行间距和阵元列间距, 第 $(i, j)$ 个阵元的坐标分别为  $x_i$ ,  $y_j$  且有:

$$x_i = (i - 0.5(M + 1))d_x, i = 1, 2, \dots, M$$

$$y_j = (j - 0.5(N + 1))d_y, j = 1, 2, \dots, N$$

经过正弦空间坐标变换:

$$\begin{cases} u = \sin \theta \sin \varphi \\ v = \sin \theta \cos \varphi \\ w = \cos \theta \end{cases}$$

转换到正弦空间坐标系下方程(1)变换为:

$$F(\theta, u, v) = \cos^{\frac{EF}{2}} \theta \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij} (e^{jk_x u} \cdot e^{jk_y v}) \quad (2)$$

根据公式(2), 给定  $41 \times 41$  的矩形栅格矩形阵列,  $x$  轴与  $y$  轴的阵元间距相同, 为  $\lambda/\sin(60^\circ)$ 。计算阵列归一化方向图如图 2(单位权)。

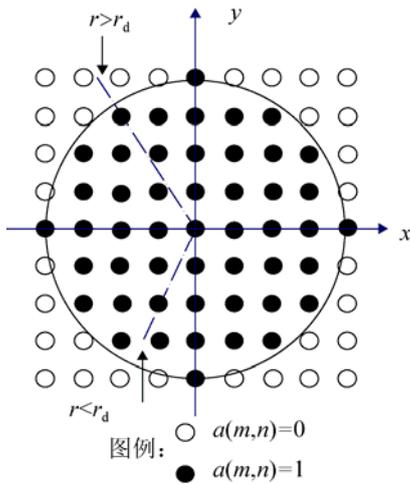


图 1 矩形栅格矩形阵列

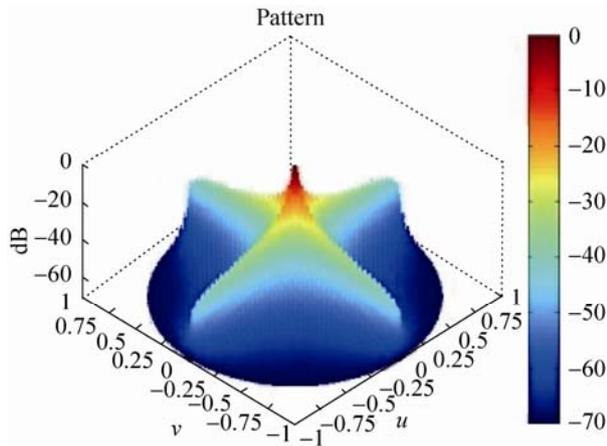


图 2 矩形阵列归一化方向图

从图 2 上看, 规则的矩形平面阵列的方向图空间图形上的特征非常明显, 除了 E 面( $\theta=0^\circ$ )、H 面( $\varphi=0^\circ$ )的副瓣之外, 其他空间方位上形成的空间副瓣相对都比较低。如果阵列孔径权值采用压缩副瓣的 Taylor 权系数, 副瓣会压缩的更低。图

形特征表现为: 在扫描中心形成一个能量非常集中的主瓣, 副瓣能量集中在 E 面和 H 面副瓣上, 在其他空间区域, 形成一个幅度平坦的超低副瓣的零副瓣区域, 体现一种非常规则的对称的空间副瓣图形特征。但实际安装的机载阵列很难是规则的矩形, 阵列形状会对阵列方向图形成类似于调制的效应, 导致副瓣出现严重的不规则性。阵列中阵元间的耦合效应, 相位量化效应以及失效阵元等因素, 都会导致阵列的副瓣出现严重的不规则性和不对称<sup>[9-11]</sup>。这种不规则性才能真正体现平面阵列方向图的实际空间图形特征, 图 2 所给出的图形特征在实际阵列中是很少存在的。

### 1.2 矩形栅格圆形阵列

矩形栅格圆形阵列如图 1 中实心点组成的阵列。对于三角栅格排列的圆形阵列, 也等同于两个具有固定相位差的矩形栅格圆形阵列的叠加。圆形阵列的远场辐射方向图计算可基于矩形阵列来计算, 所谓圆形阵列, 是基于矩形阵列产生的, 该阵列模型相当于矩形阵列与圆面方程的调制, 即处于圆周边界外的阵元, 其阵元权系数为 0(如图 1 的空心圆点)。阵列的远场电场方程同方程(1), (2), 只是在圆面之外的阵元权系数在计算时要置 0。取上节的矩形阵列设置, 以图 1 上  $x$  轴线上的阵元为直径, 计算阵列方向图(正弦空间坐标系)如图 3(单位权)。

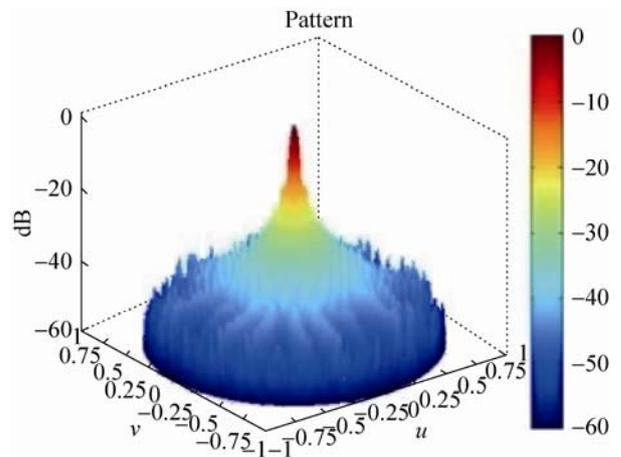


图 3 矩形栅格圆阵列( $41 \times 41$ )方向图(单位权)

图 3 不难看出, 矩形阵列经过圆周边界的外形调制后, 形成的方向图除了一个能量集中的主瓣外, 其副瓣在空间上具有类似于同心圆的分布特征, 只不过这种同心圆分布是断续的, 峰脊状的而不是连续的规则的同心圆, 尤其是在远离扫描中心的空间区域, 这种峰脊状特征远比近端同心圆特征要强烈的多。这种图形特征已经完全不同与规则矩形阵列的副瓣空间分布特征。对于平面阵列而言, 这种空间分布的图形特征具有相当程度的典型性和普遍性。

实际的机载天线阵列因机体孔径限制, 几乎没有规则的矩形阵列。一般都是以矩形栅格圆阵列、矩形栅格椭圆阵列或者同心圆阵列为多。从理论计算方向图中不难看出, 方向图因阵列外形调制或者为压缩副瓣而加窗会导致主瓣能量集中、宽度展宽, 同时副瓣呈同心圆的图形特征, 在离开扫描中心的远端, 副瓣呈不规则分布的峰脊起伏状态, 但副瓣峰值的同心圆分布的空间图形特征依然存在。事实上, 更多的方向图分析会证明这一点, 比如共形阵列, 尤其是共心球面阵列, 这种副瓣同心圆图形特征更为明显<sup>[9-11]</sup>。考虑到实际天线阵列并非理想的方向图, 比如阵列中会有阵元失效情形、数字移相器引起的量化噪声及相位量化误差、阵元耦合效应、阵面安装倾角引起副瓣偏移等多重因素, 这些因素一定会在方向图中引入扰动的副瓣, 这些副瓣的位置具有不可测性, 类似随机噪声的性质。因而图 2 理想方向图中非常平坦的零幅度区域是不存在的。实际的方向图空间图形特征更类似于图 3 叠加上扰动的噪声, 即图 3 具有更为典型的代表性的图形化空间分布特征。

通过平面阵列方向图的能量空间分布特征分析, 可得到如下图形特征的结论:

- (1) 方向图能量集中在主瓣;
- (2) 在扫描中心近端, 方向图副瓣峰值呈同心圆分布的空间分布特征, 该特征非常明显;
- (3) 在离开扫描中心的远端, 副瓣呈不规则分布的峰脊起伏状态, 但副瓣峰值的同心圆分布

的空间图形特征依然存在;

(4) 幅度切面即空间剖面的图形呈 Sinc 函数的快变图形特征, 即幅度图上具有高频率的过零点, 幅度图形包络具有高斯函数的图形特征;

(5) 主瓣宽度、副瓣包络的最大电平具有可控性。通常通过牺牲主瓣宽度能够压制副瓣电平。

这些特征决定这样一个事实: 图 3 中, 如果不考虑副瓣峰脊的断续性, 只考虑副瓣峰值的同心圆分布的空间图形特征, 那么方向图在空间上的图形特征完全可以由一个空间剖面来体现, 即用一个贯穿副瓣和主瓣的空间剖面, 可完全呈现方向图的空间图形特征。这种空间图形特征以及空间剖面图形特征, 映射到方向图计算上, 就意味着只要计算方位向上的一个空间剖面, 就能够体现方向图的整体图形特征。这一图形特征的分析结论, 对于提高仿真计算速度来讲是非常重要的。因为据此可完全抛开方向图的理论模型和计算公式, 设计一个能够体现空间剖面图形特征的核函数模型, 将该核函数的图形经过空间上的旋转, 就可以完全体现方向图的空间幅度和能量分布特征。这就相当于只是利用图形对平面阵列方向图进行仿真, 即文中所提出的方向图图形化仿真方法。

## 2 方向图图形化仿真模型

针对上节分析的平面阵列方向图空间图形特征, 为简化计算过程, 可以采用 Sinc 函数作为核函数, 将该核函数图形作为空间剖面图形, 即方位向上的一个空间剖面, 在空间坐标系下将该剖面围绕扫描中心旋转, 形成  $\theta, \varphi$  坐标系或者  $u, v$  坐标系下的立体空间图形, 以该图形作为平面阵列方向图的仿真图形。这种图形化仿真的根据在于: 核函数图形能够全面反映方向图的空间剖面特征, 旋转后的图形能够逼近方向图副瓣峰值的空间同心圆分布特征以及能量集中的主瓣图形特征。

经实验调整和验证, 该核函数可写为:

$$f(\theta) = \frac{1 + \cos\theta}{2} \times \frac{\sin(k \sin\theta)}{k \sin\theta} \quad (3)$$

(3)式中,  $k = 1.3196 / \sin(\theta_b / 2)$ ,  $\theta_b$  为半功率波瓣宽度。

为仿真旁瓣加权, 设需要的副瓣电平为  $S$  dB( $S < -m$  dB,  $m$  可根据实际需要调整), 则主瓣零点以外的部分加权副瓣为:

$$f(\theta) = a \times \frac{\sin(k \sin \theta)}{k \sin \theta} \quad (4)$$

(4)式中,

$$a = 10^{-r} \times \frac{1 + \cos \theta}{2}$$

$$r = 0.05(S - 13.26)$$

公式(4)即为核函数图形化仿真模型。根据需求, 设置副瓣电平为 20dB, 方位向方向图如图 4 所示。该曲线对  $\theta$  的采样频率非常敏感, 采样步长取  $0.1^\circ$  或  $0.5^\circ$  比较理想, 同时这个采样频率导致副瓣峰值太多, 与理想方向图的副瓣峰值位置不对应, 对于 -20dB 的副瓣电平, 如果是单位权的阵列孔径, 是能够满足需求的, 但无法反应压缩副瓣时的方向图副瓣特征。因而需要根据实际阵列权系数以及阵列参数需求对该核函数数据进行修正和平滑, 对于 Taylor 权系数修正和平滑后的核函数图形如图 5。数据平滑可采用高斯函数对包络进行幅度平滑, 平滑后的图形要能够最大程度的逼近方向图空间剖面的图形特征。平滑后的图形作为方向图的空间剖面, 在空间坐标系下将该剖面围绕扫描中心进行  $360^\circ$  空间旋转, 即可得到仿真的平面阵列方向图。

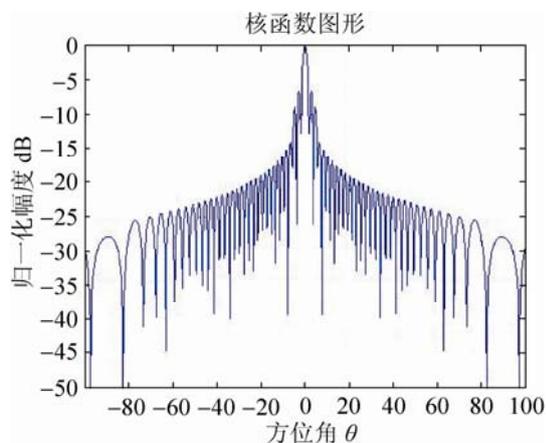


图 4 核函数图形

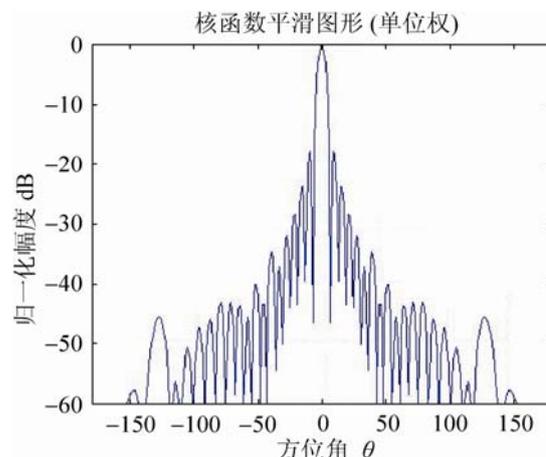


图 5 核函数平滑后的图形

### 3 方向图图形化仿真结果

按照天线方向图图形化仿真模型进行仿真, 将核函数图形(如图 4~5)绕扫描中心轴旋转, 在空间坐标系下形成  $u, v$  坐标系下的立体图形, 可得到仿真的方向图。对于第 2 节的矩形栅格圆形阵列(阵列大小  $41 \times 41$ )仿真结果如图 6。事实上, 根据平面阵列和方向图的对称性, 该核函数图形只需要半个坐标平面的旋转(无扫描时只需要  $1/4$  坐标平面的旋转), 即可得到整个空间坐标系下的平面阵列仿真方向图, 因而可进一步简化计算量。

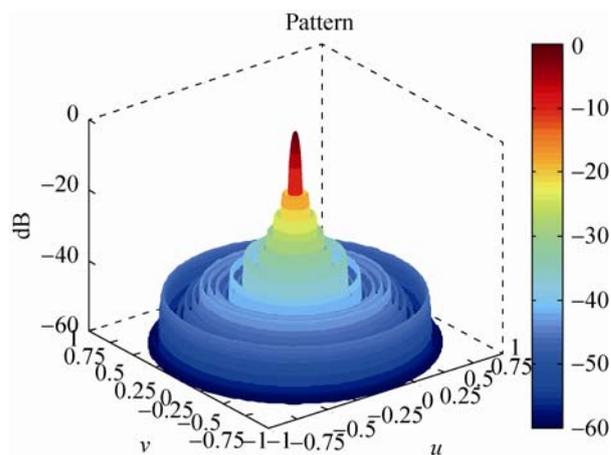


图 6 图形化仿真方向图

对比仿真图形(如图 6)和理论计算的方向图(如图 3), 可知这种图形化仿真计算方法能反映理想方向图的如下空间图形特征:

(1) 主瓣宽度、主瓣能量集中度以及增益完全一致;

(2) 副瓣空间位置、各副瓣最大电平完全一致, 但副瓣空间分布不完全一致, 这主要是因为采取副瓣同心圆的方法导致的, 因为不考虑远离扫描点空间位置上副瓣并不是同心圆, 是不等幅峰脊状空间分布;

(3) 副瓣不一致的区域都处在远离扫描点的空间位置, 这些位置上的副瓣电平一般都非常低。因而这种不一致并不会对所仿真的天线阵列性能造成本质的影响。对于实际的雷达阵列, 这些远离扫描点的空间位置实际上基本已经处于雷达阵列有效扫描范围之外, 因而更不会对阵列性能仿真造成本质的影响。

## 4 结论

仿真结果以及分析表明, 本文提出的核函数图形旋转的方法, 所仿真的平面阵列方向图与理论计算的方向图在空间图形特征上具有非常高的一致性, 同时具有非常高的计算速度, 能够实时应用。在飞行仿真过程中的实际应用也证明, 这种图形化仿真方法完全能够逼真再现阵列性能, 同时能够满足实际飞行仿真系统的实时和同步需求, 使得平面阵列方向图作为一个计算点不再耗费计算资源, 也使得雷达性能仿真作为主要功能模块能够接入仿真系统的实时同步进程。

## 参考文献:

[1] Northrop Grumman. Active Electronically Scanned Array

(上接第 1982 页)

- [10] Kim Y G, Kim S Y, Kim H T, *et al.* Prediction of maneuverability of a large container ship with twin propeller and twin rudder [J]. *J Mar Sci & Technol* (S0948-4280), 2007, 12(3): 130-138.
- [11] 杨旻. 基于 MultiGen 的真实感虚拟场景绘制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [12] 高山, 陈思. 城市三维建模技术与标准研究 [J]. *测绘*

(AESAs) Fire Control Radars [DB/OL]. (2014-05-02) [2015-05-10]. <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ANAPG80AESARadar/Documents/AESA.pdf>

- [2] Robert Hendrix. Aerospace System Improvements Enabled By Modern Phased Array Radar [DB/OL]. (2014-05-02) [2015-05-10]. <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ANAPG80AESARadar/Documents/aesawhitpaper.pdf>.
- [3] Northrop Grumman. AESA Radar: Revolutionary Capabilities for Multiple Missions [DB/OL]. (2013-03-21) [2015-05-10]. [http://es.www.northropgrumman.com/solutions/aesaradar/assets/review\\_aesa.pdf](http://es.www.northropgrumman.com/solutions/aesaradar/assets/review_aesa.pdf).
- [4] Frank Walker. Multi-Function Phased Array Radar Symposium [DB/OL]. (2014-05-02) [2015-05-10]. <http://www.northropgrumman.com>.
- [5] Moore S. UK Airborne AESA Radar Research [J]. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE* (S0885-8985), 2010, 25(2): 29-35.
- [6] 陈彭, 李坤, 陈朝阳, 等. 基于文化算法的超低副瓣方向图综合 [J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(7): 1477-1481.
- [7] 杨建华, 马梁, 李永祯. 宽带相控阵雷达导弹防御能力建模仿真研究 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(3): 409-414.
- [8] 王停, 夏克文, 张文澎, 等. 基于改进 QPSO 算法的阵列天线方向图综合 [J]. *电子学报*, 2013, 41(6): 1177-1182.
- [9] Randy L Haupt. ANTENNA ARRAYS: A Computational Approach [M]. USA: John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2010: 115-283.
- [10] Arik D Brown. Electronically Scanned Arrays-MATLAB Modeling and Simulation [M]. USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2012: 35-80.
- [11] Bassem R Mahafza, Atef Z Elsherbeni. MATLAB Simulations For Radar Systems Design [M]. USA: Chapman & Hall/CRC CRC Press LLC, 2004: 8.5.

通报, 2013 (3): 95-97.

- [13] 杨丽, 李光耀. 城市仿真应用工具—Vega 软件教程 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2007.
- [14] 樊晓丹, 孙应飞, 李衍达. 一种基于 RTW 的实时控制系统快速开发方法 [J]. *清华大学学报*, 2003, 43(7): 895-898.
- [15] 冯磊. 基于 RTW 的分布式实时仿真系统研究与实现 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [16] 吴楠, 陈红卫. 船舶动力定位仿真系统设计 [J]. *舰船科学技术*, 2013, 35(5): 103-106.