

陈德民, 陈俊. 基于 Matlab 仿真的阵列天线方向图影响因素探究 [J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(9): 198–202. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 250930

基于 Matlab 仿真的阵列天线方向图影响因素探究

陈德民, 陈俊

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108)

摘要: 构建均匀直线阵列天线数值表达式, 利用 Matlab 软件设计一款可交互 GUI 阵列天线仿真工具, 进行三维天线方向图仿真, 相较于常用的二维天线方向图分析方式, 可展示更多天线方向图信息。主要分析天线阵元间距、个数、馈电相位差等核心参数对阵列方向图影响, 同时提出了阵元天线定向性、倾角对阵列方向图影响研究。仿真结果表明: 阵元间距、阵元个数、阵元天线定向性与阵列天线方向性呈正相关, 阵元倾斜角度、馈电相位差对阵列天线的方向性呈负相关。阵元天线定向性及倾角增加会使阵列天线对应角度的副瓣增强。

关键词: 阵列天线; 主瓣方向; Matlab

中图分类号: TN011 文献标志码: A 文章编号: 2095-2163(2025)09-0198-06

Exploration of influencing factors of array antenna pattern based on Matlab

CHEN Demin, CHEN Jun

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The numerical expression of the uniform linear array antenna is constructed, based on the array antenna pattern multiplication theorem. Matlab software is used to design an interactive GUI array antenna simulation tool for simulating the three-dimensional antenna pattern. Compared to the commonly used two-dimensional antenna pattern analysis method, this approach can display more antenna pattern information. The effects of commonly used parameters such as element spacing, element number, and feed phase difference on the array antenna pattern are compared, and the influence of element antenna directivity and tilt angle on the array pattern is particularly studied. Simulation results indicate that element spacing, element number, and element antenna directivity are positively correlated with array antenna directivity, while element tilt angle and feed phase difference are negatively correlated. Increasing element antenna directivity and tilt angle mainly enhances the side lobe of the array antenna in the corresponding angle direction.

Key words: array antenna; main lobe orientation; Matlab

0 引言

室内覆盖是无线通信网络中一个重要环节, 在 5G 时代是建设智慧社会、提供智能应用服务的重要保障。随着室内环境的复杂和通信频段的升高, 以及目前 5G 通信新业务的进一步拓展, 并且更多地发生在用户分布密集、网络请求并发多、数据吞吐量较大的场景^[1], 室内信号覆盖^[2]也面临了更高的技术挑战, 对室内天线的使用场景外延和性能要求也不断提升。采用阵列天线^[3]可以实现高增益^[4]、强方向性^[5]、主瓣可控^[6]等特点, 且是由多个离散的辐射源按照一定的规则排列而成的天线系统。因

此, 对阵列天线方向图的影响因素进行仿真研究具有重要意义。

在传统方法中, 天线的设计方案需要在电磁仿真软件中进行验证, 并依靠从仿真软件得到的信息对天线进行修改^[7]。然而这个验证和修改的过程十分耗费时间和精力, 每一次修改模型或者调整参数都需要重新进行全波仿真和数据后处理^[8]。天线设计需要对模型和参数进行大量调整和尝试, 因此使用传统方法设计天线需要耗费大量计算资源和时间成本, 限制了其在阵列天线方向图仿真中快速迭代的应用和发展。Matlab 仿真软件作为应用于阵列天线中的仿真工具, 拥有表达能力强的数学计算语言、优秀的可视化

作者简介: 陈德民(1996—), 男, 工程师, 主要研究方向: 阵列天线仿真及设计。

通信作者: 陈俊(1974—), 男, 副教授, 主要研究方向: 计算机软件及计算机应用。Email: 1585798022@qq.com。

收稿日期: 2024-01-29

化能力和多种专业算法, 这些特性在集成研究阵列天线中能够节省大量计算和拟合时间^[9]。

本研究首先基于方向图乘积定理^[10], 建立直线阵的数学模型及阵列天线表达式, 并设计成可交互 GUI 阵列天线仿真工具, 实现三维天线方向图仿真, 相较于常用的二维天线方向图可同时分析 E、H 面变化影响。其次, 在 HFSS 软件中建立对称振子天线、微带贴片天线作为阵元天线, 生成不同参数下的三维阵列天线仿真方向图, 主要对比阵元间距、个数、馈电相位差等核心因素对阵因子函数及阵列天线方向图的影响, 并且特别提出阵元天线定向性、倾角对阵列方向图影响探究。

1 均匀直线阵列天线

阵列天线是由多个相同的阵元天线按一定方式排列组成的天线系统。阵列天线的分类一般按照阵元天线的位置分布不同进行分类, 可区分为直线形式和平面形式排列的阵列天线^[11]。阵列天线的辐射电磁场是组成该天线阵各单元辐射场的总和(矢量和)^[12]。阵列天线产生特殊方向图的原理是调整每个阵元天线的位置和馈电电流^[13]等相关参数, 以获取所需要的辐射方向性^[14]。

直线阵有 2 种排布方式。一种是单元振子在坐标轴上按照一定倾斜角并排分布, 称为并排振子直线阵^[15]; 另一种是单元振子在坐标轴上共轴排布, 称为共轴振子直线阵^[16]。本次讨论的主要对象是均匀并排振子直线阵, 如若无特殊说明, 则所有阵列天线均为均匀并排振子直线阵, 如图 1 所示。

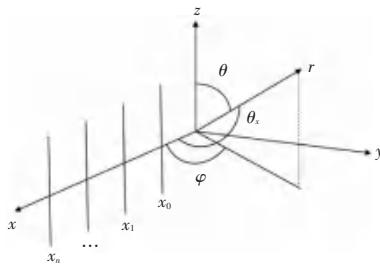


图 1 并排振子直线阵

Fig. 1 Side-by-side oscillator linear array

均匀直线阵具有相同激励幅度的阵元, 激励相位按照 α 进行均匀递增或递减, 单元间距距离均为 d 。

2 方向图乘积定理

2.1 方向图函数

设空间某平面内存在一个面积为 S 的面电流源^[17], 则该面电流源在空间某点产生的矢量位 A 为:

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S J(r') \frac{e^{-jkR}}{R} dS' \quad (1)$$

进一步推得远场公式 $E = -j\omega A$, 面电流密度 $J(r') = \hat{z} J_z(x', z')$ 和关系式 $\omega\mu = k\eta$ 。这里, k 为波数, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\omega}}$ 是波阻抗。式(1) 中, R 为该面电流源远场半径, r 为坐标原点远程半径, $R, r \gg \lambda$, 代入式(1) 可得到其远区电场为:

$$\begin{aligned} E_\theta &= -j\omega A_z \sin \theta \\ &= j \frac{\omega \mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \iint_S J_z(x', z') e^{jk(x' \sin \theta \cos \varphi + z' \cos \theta)} dx' dz' \\ &= j \frac{\eta e^{-jkr}}{4\pi r} F(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2) 可得方向图函数为:

$$F(\theta, \varphi) = k \sin \theta \iint_S J_z(x', z') e^{jk(x' \sin \theta \cos \varphi + z' \cos \theta)} dx' dz' \quad (3)$$

2.2 阵因子函数

设所求的阵列天线 阵元个数为 N , 阵列中点为坐标原点, 对奇数阵和偶数阵位置示意关系如图 2 所示。

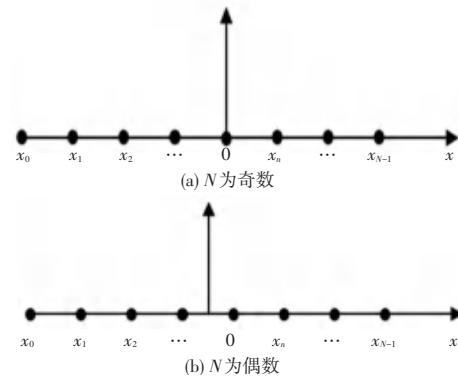


图 2 阵列中心为坐标原点

Fig. 2 Set the array antenna as the coordinate origin

无论 N 是奇数、或者是偶数, 阵列天线的位置均满足如下关系:

$$x_n = \left(n + 1 - \frac{N + 1}{2}\right) d, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4)$$

当阵列上的元素都是相同的, 可将单元视为点源来计算阵列因子。从第一个阵元往后, 每个阵元相较于前一阵元的相位落后 $kdcos \theta + \alpha$ 。由式(4) 可推导得均匀直线阵的阵因子函数^[18]:

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{jkx_n \sin \theta \cos \varphi} = I_0 e^{jk(1-\frac{N+1}{2})d \cos \theta} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jkx_n \sin \theta \cos \varphi} \quad (5)$$

令 $u = kdcos \theta + \alpha$, $t = \sum_{n=0}^{N-1} e^{jnu}$, 对 t 进行数学变

换可得：

$$t = e^{j(N-1)u/2} \frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)} \quad (6)$$

把式(6)代入式(5), 对其取模值, 可得阵元等间距为 d 排列、馈电相位差为 α 且单元馈电振幅为 I_0 的均匀直线阵的阵因子为:

$$S(u) = I_0 \frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)}, u = kd\cos\theta + \alpha \quad (7)$$

2.3 方向图乘积定理

设均匀直线阵列天线的 N 个阵元天线等距离地排列在 x 轴上, 振子在坐标轴上的位置为 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}$, 相邻单元之间的馈电相位差为 α , 单元馈电振幅为 I_n 。阵列天线的电流分布可以看作为面电流源的连续电流密度抽样^[19], 即:

$$J_z(x', z') = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{jn\alpha} g(z') \delta(x' - x_n) \quad (8)$$

其中, $g(z')$ 表示阵元天线上电流在坐标轴上变化的函数, $\delta(x' - x_n)$ 为 delta 函数。将式(4)代入式(3), 并根据关系式 $\int f(x) \delta(x - x_n) dx = f(x_n)$, 可以得到:

$$F(\theta, \varphi) = k \sin \theta \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{jkx_n \sin \theta \cos \varphi} \int g(z') e^{jkz' \cos \theta} dz' = k f_0(\theta) S(\theta, \varphi) \quad (9)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$; λ 表示波长; $f_0(\theta)$ 表示单元振子方向图函数; $S(\theta, \varphi)$ 表示阵因子方向图函数^[20]。

式(9)即为阵列天线的方向图乘积定理, 说明阵列天线的总场方向图可视为阵元天线方向图乘以阵因子方向图的结果^[21]。

3 仿真步骤及内容

阵列天线的设计主要思路为: 在 HFSS 软件中建立对应的阵元天线, 得到阵元天线方向图电场数据, 将数据导入 Matlab 软件中进行方向图乘积, 得到需要设计的阵列天线方向图。

3.1 阵元天线仿真设计

步骤 1 建立对称振子天线、微带贴片天线作为阵元天线。设对称振子工作频率 $f = 2.5$ GHz, 设置扫频范围为: $\theta \in [-\pi, \pi]$, $\phi \in [0, 2\pi]$, 利用 HFSS 软件建立对称振子模型及贴片微带天线模型。

步骤 2 导出方向图数据, 并进行数据预处理。由建立的对称振子模型可以利用软件得到振子的远场场强方向图, 将场强方向图数据选择导出并保存。将结果中场强值转化为 $[N \times N]$ 的矩阵, 令为 A 。

步骤 3 阵因子计算。确定阵元天线等间距 d , 相邻单元间的馈电相位差 α , 单元馈电振幅 I_0 的值。对于均匀直线阵, 上述 3 个参数值均为定值, 因此, 将 3 个参数值代入式(9)可得阵因子方向图矩阵 Z 。

步骤 4 阵列天线方向图计算。由方向图乘积定理, 将阵元天线方向图与阵因子方向图进行乘积运算, 即 $S = A \times Z$ 。

步骤 5 依据坐标系变换方法^[22], 将球坐标坐标矩阵 S 转化为直角坐标系坐标, 并进行三维方向图绘制。

3.2 可交互 GUI 工具设计

为提高程序的可视性和可操作性, 本次研究设计了 GUI 工具。GUI 工具设计首先需要根据输入的参数的数量进行界面布局设计。在阵列天线仿真设计中, 需要输入的参数为: 阵元个数 N , 单元等间距 d , 相邻单元间的馈电相位差 α , 单元馈电振幅 I_0 , 因此, GUI 界面布局如图 3 所示。



图 3 阵列仿真设计 GUI 界面示意图

Fig. 3 The GUI interface of the array antenna simulation

其中, 阵元个数 N 默认值为 20, 单元等间距 d 默认值为 0.5λ , 相邻单元间的馈电相位差 α 默认值为 0, 单元馈电振幅 I_0 默认值为 1。操作流程如图 4 所示。

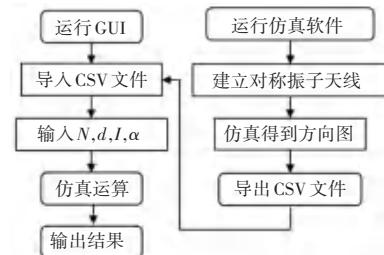


图 4 GUI 界面操作流程

Fig. 4 The operation process of GUI interface

4 阵列天线 Matlab 仿真分析

由阵列天线方向图乘积定理可知, 阵列天线的总体方向图与阵元天线、阵元间距、阵元数量等因素相关。传统的天线分析方法是采用 HFSS 仿真软件

搭建所需阵列的天线模型, 并进行模型求解, 得到最终的仿真方向图, 再对比不同条件下的方向图进行研究。但是采用仿真软件进行求解时, 模型建立及求解计算过程均需花费较多时间。若依据阵列天线方向数值解析式进行定量求解分析, 则难以看出参数对最终结果的影响。因此, 借助 Matlab 软件, 对阵列天线的方向图和阵因子方向图进行三维展示仿真, 通过对不同因素下的天线方向图, 能更加直观得到方向图影响因素。

4.1 阵因子函数 Matlab 仿真分析

由阵因子函数表达式可得, 阵因子函数与阵元间距、阵元个数、馈电相位差相关, 与阵元天线方向图无关。从其表达式可看出, 激励幅度与阵因子函数成正比关系, 无需进行详细讨论。

按照对比分析方法进行对照分析组设置, 分析不同条件对阵因子函数方向性影响。首先, 设置阵列阵元个数为 10、馈电相位差为 0, 阵元间距分别设置为 0.5λ 、 λ 、 1.5λ , 这里 λ 为天线波长, 讨论不同阵

元间距对阵因子函数影响; 其次, 再设置阵元间距为 0.5λ 、馈电相位差为 0, 阵元个数为 5、10、20, 研究阵元个数对其影响内容; 最后设置阵元个数为 10, 阵元间距为 0.5λ , 馈电相位差为 -0.5° 、 0° 、 0.5° 。其中 x 轴与 y 轴构成方位角, x 轴/ y 轴与 z 轴构成俯仰角, 对比仿真结果如图 5 所示。

从图 5(a1)~(a3) 可以看出: 阵元个数及馈电相位差固定时、阵列的阵元间距改变时, 天线的副瓣将增强且随着阵元间距增加, 副瓣数量增多、主瓣辐射强度减弱, 阵列天线的方向性减弱; 从图 5(b1)~(b3) 可以得出, 当阵元间距及馈电相位差不变时, 阵元个数增加导致阵因子函数图像副瓣增多, 主瓣方向及形状不变, 主瓣宽带变窄, 阵列方向性增强; 从图 5(c1)~(c3) 可以得出当阵元个数及阵元间距不变固定, 阵因子函数随着馈电相位差增大而实现主瓣水平夹角由左端射至右端的波束扫描, 主瓣及副瓣数量、强度不变。

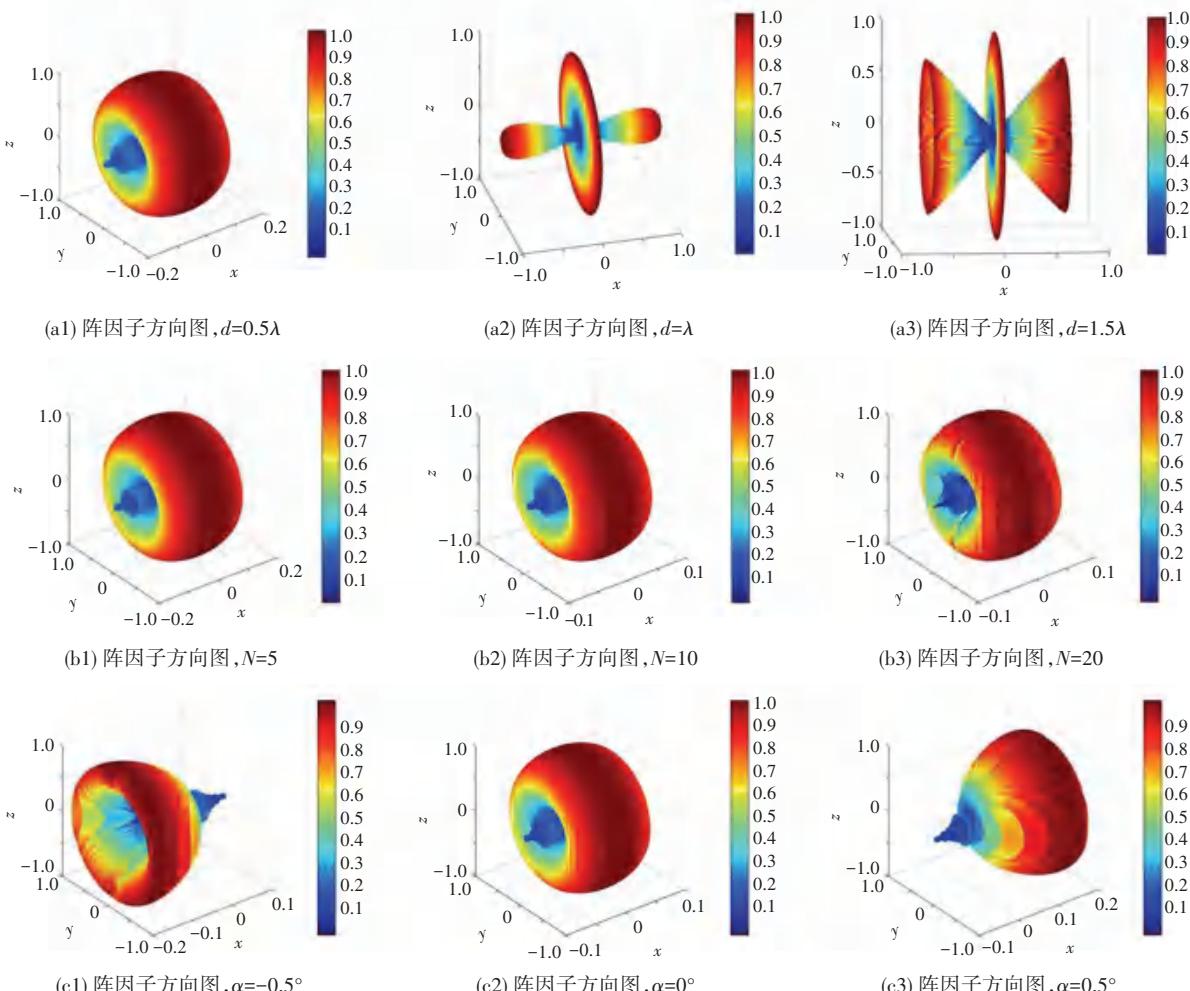


图 5 阵因子方向图影响因素分析图

Fig. 5 Analysis chart of influencing factors in array factor direction diagram

4.2 阵列天线方向图 Matlab 仿真分析

由阵列天线方向图乘积定理可知,阵列天线的总体方向图与阵元天线、阵因子方向图等因素相关。依据阵因子函数仿真结果,阵元个数及馈电相位差对阵因子函数整体形状影响可直观预估,因此,将重点分析阵元天线定向性、倾斜度、阵元间距对阵列天线方向图的影响。分别设置不同对比参数进行分析研究,首先设置阵元间距为 0.5λ 、阵元个数为 10、馈电相位差为 0,阵元天线分别为偶极子天线及微带贴片天线,其中,偶极子天线为全向天线,微带贴

片天线为定向天线,讨论不同阵元天线对阵列天线方向图的直观影响;其次,设置阵元间距为 0.5λ 、阵元个数为 10、馈电相位差为 0,对微带贴片天线分别设置 0° 、 45° 、 90° 偏转角度作为阵元天线,探究阵元天线的偏转角度对阵列天线方向图的影响及关系;再次,设置阵元天线为偶极子天线,阵元个数为 10,阵元间距分布设置为 0.5λ 、 λ 、 1.5λ ,讨论不同阵元间距对总方向图的影响。其中, x 轴与 y 轴构成方位角, x 轴/ y 轴与 z 轴构成俯仰角,对应的仿真图如 6 所示。

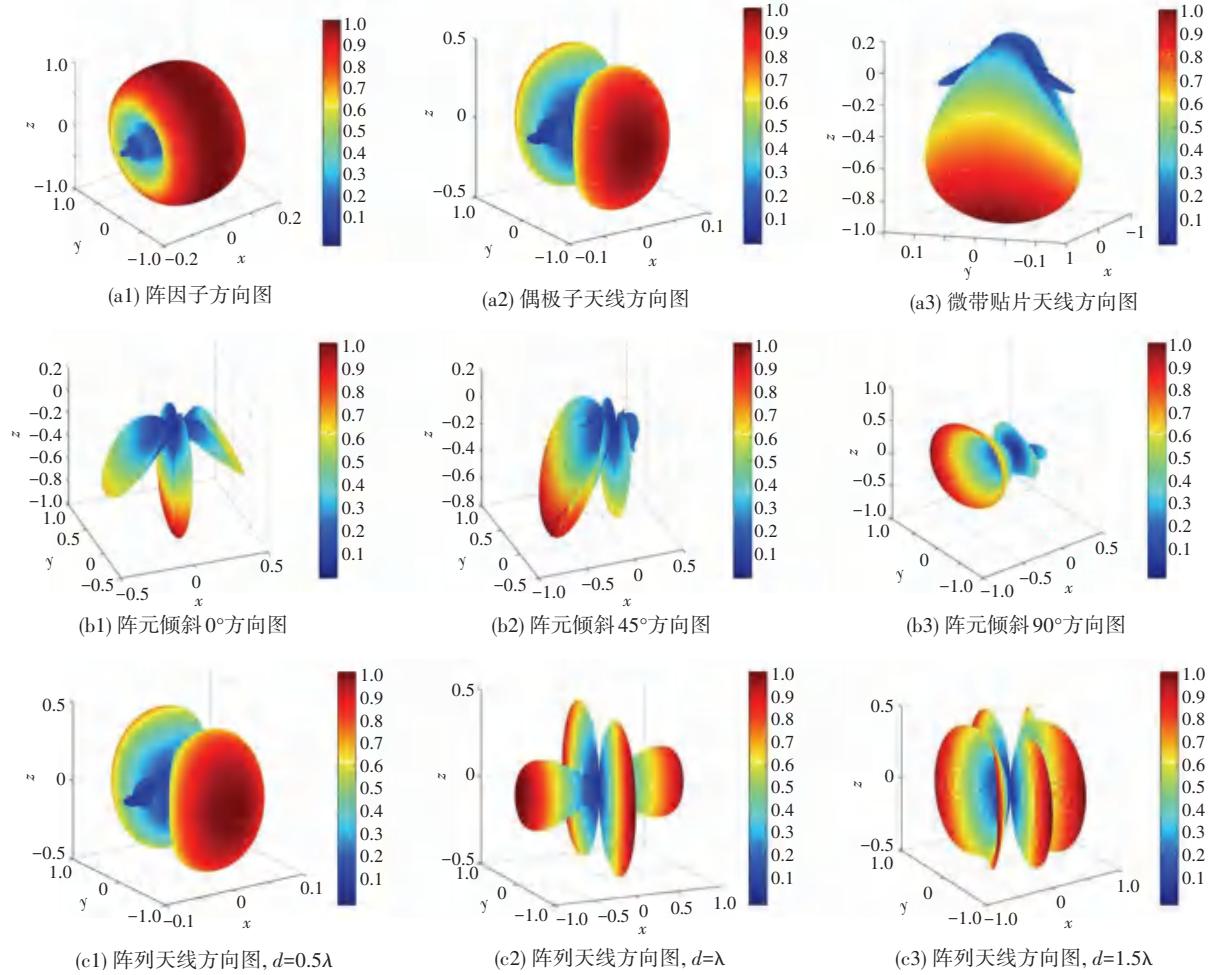


Fig. 6 阵列天线方向图影响因素分析图

Fig. 6 Analysis chart of influencing factors in array antenna direction diagram

从图 6(a1)~(a3)可以得出:仅改变阵列的阵元天线类型,阵元天线方向图与阵因子方向图在同样辐射强度的场强值得以保留,其他辐射方向相对应减弱,构成总体的阵列天线方向图,具象化对方向图乘积定理进行展示说明;从图 6(b1)~(b3)可以得出,当阵元相关参数固定,阵元天线采用采用微带贴片天线时,随着阵元天线倾斜角度改变,阵列天线主瓣辐射方向也随之改变,对应旋转方向的副瓣辐

射强度增强,与馈电相位差导致的天线方向偏移不同在于其总体方向图形状大致不变,仅对应倾斜角度的副瓣强度及宽带增强;从图 6(c1)~(c3)可以得出当采用偶极子天线、且阵元个数及馈电相位差固定时,随着阵元间距增加时,天线的副瓣数量增多,主瓣宽度减少,对阵列天线方向图的影响与阵因子函数相同。

综上,由仿真结果可以得出,阵元天线方向