

相控阵雷达多通道天线方向图建模与仿真

徐海峰¹, 卞春蓉²

(1. 南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)
(2. 南京师范大学数学科学学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 相控阵雷达天线方向图建模是相控阵雷达系统建模仿真中的关键技术之一. 本文从理论上分析了天线方向图函数, 提出了一种相控阵雷达多通道天线方向图建模与仿真算法. 基于相控阵天线的矩形平面模型, 我们通过配置不同的天线阵元矩阵参数, 最终获得了不同通道的天线方向图. 文中的算法不仅能够较为便捷地获取常规的和差通道天线方向图, 而且能够获取其它任意通道天线方向图. 仿真结果验证了建模方法和数学模型的正确性.

[关键词] 相控阵雷达, 多通道, 天线方向图

[中图分类号] TN958.92 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2014)02-0028-05

Multi-Channel Antenna Pattern Modeling and Simulation for Phased Array Radar

Xu Haifeng¹, Bian Chunrong²

(1. Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210039, China)
(2. School of Mathematical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Antenna pattern modeling for phased array radar is one of the key technologies in modeling and simulation for phased array radar systems. In this paper, we analyze the antenna pattern function theoretically, and propose a modeling and simulation algorithm in multi-channel antenna pattern for phased array radar. Based on rectangular planar model of phased array radar, we get the antenna pattern in different channels by configuring different matrix parameters of antenna array elements. Using this algorithm, we not only obtain sum-difference channel antenna pattern easily, but also get antenna pattern in any other channels. The simulation result shows that the modeling method and mathematical models are right.

Key words: phased array radar, multi-channel, antenna pattern

相控阵天线具有波束快速扫描、波束形状快速变化、空间定向与空域滤波以及天线与平台共形能力等诸多优点, 因此现代军用雷达多采用相控阵体制^[1-3]. 随着相控阵雷达的广泛应用, 相控阵雷达系统的建模与仿真对数字化雷达系统的优化设计、飞行训练对抗作战的战术设计和作战的效能评估等多个领域具有重要意义. 而相控阵天线建模与仿真是整个相控阵雷达系统建模与仿真的关键环节, 天线方向图仿真的准确与否直接影响到整个相控阵雷达系统仿真的准确性和精度. 相控阵天线指天线单元分布在一个平面上, 由数千个天线阵元组成, 加之天线波束的电扫描, 使得相控阵雷达天线增益求解复杂且计算量巨大. 目前在一些仿真系统领域采用的是载入方向图数据库方法, 它主要根据相控阵天线参数事先建立天线方向图数据库, 仿真时以数据文件的方式进行预先装载, 然后通过查表调用数据库中对应的数据并进行插值来获取数值. 由于预先存储的数据量巨大, 而且不能够完全实际覆盖相控阵雷达的所有天线特性, 这种方法大大降低了仿真的真实性, 不能很好地满足仿真系统要求^[4].

本文介绍了一种根据相控阵天线阵面形状、阵元个数和排列方式、阵元间距以及阵元幅相加权等相关参数来进行相控阵天线方向图仿真的方法, 该方法通过配置不同的天线阵元矩阵参数, 能够灵活地获取不同通道天线方向图, 大大提高了仿真的真实性, 很好地满足相控阵雷达仿真系统要求.

收稿日期: 2014-02-10.

通讯联系人: 卞春蓉, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 运筹学与控制论. E-mail: bianchunrong@njnu.edu.cn

1 相控阵雷达天线方向图数学模型

一个平面相控阵天线可以分为若干子平面相控阵天线或者多个线阵,平面相控阵天线中各个天线单元一般按矩形或三角格阵排列^[3,5](在后续章节中如果不特别注明,均使用矩形格阵进行数学建模)。

假设一个平面相控阵天线由 $M \times N$ 个阵元组成(文中天线排列为横向和纵向排列),如图 1 所示,沿 y 方向(横向)的 N 个阵元以间距 d_y 均匀排列,步进相位为 α_y ;沿 z 方向(纵向)的 M 个阵元以间距 d_z 均匀排列,步进相位为 α_z ,从而形成矩形栅格的平面阵(如图 2 所示)。

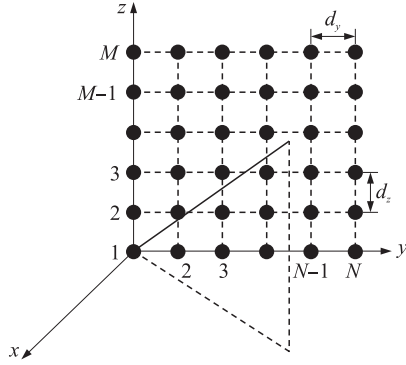


图 1 矩形平面相控阵天线阵元图

Fig. 1 Array element of rectangular planar phased array antenna

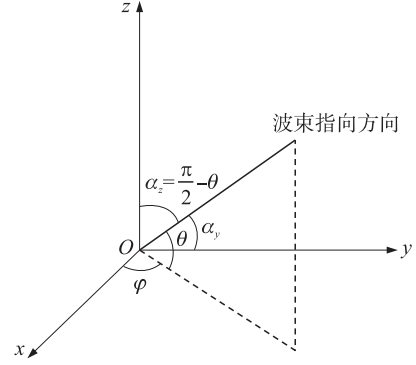


图 2 矩形平面相控阵天线坐标关系

Fig. 2 Coordinate system of rectangular planar phased array antenna

假设波束指向角所在位置的方向余弦为 $(\cos\alpha_x, \cos\alpha_y, \cos\alpha_z)$, θ 为俯仰角, φ 为方位角,根据三角函数坐标转换关系:

$$\cos\alpha_z = \sin\theta, \quad \cos\alpha_y = \cos\theta\sin\varphi. \quad (1)$$

根据方向图乘积原理,天线方向图函数 $D(\theta, \varphi)$ 可以表示成单元天线的方向图函数 $f(\theta, \varphi)$ 和阵因子 $F(\theta, \varphi)$ 的乘积:

$$D(\theta, \varphi) = |f(\theta, \varphi)| \cdot |F(\theta, \varphi)|, \quad (2)$$

其中 $f(\theta, \varphi)$ 称为单元天线的方向函数,即元因子. 通常认为所有的天线阵元具有相同的方向函数,即 $f(\theta, \varphi) = 1$. $F(\theta, \varphi)$ 称为阵因子,它与阵中每个阵元的位置、幅度和相位有关. 因此在阵列天线中,方向性主要由阵因子来决定.

相邻单元的空间相位差:

z 轴方向:

$$\Delta\phi_z = kd_z \cos\alpha_z, \quad (3)$$

y 轴方向:

$$\Delta\phi_y = kd_y \cos\alpha_y, \quad (4)$$

其中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (λ 为波长).

同理,可得到第 (i, j) 号阵元与第 $(0, 0)$ 号阵元(参考阵元)的空间相位差为:

$$\Delta\phi_{ij} = i \times \Delta\phi_z + j \times \Delta\phi_y. \quad (5)$$

若将天线在 z 轴方向的相邻单元相位差记为 β , y 轴方向的相邻单元相位差记为 α ,假设所有阵元幅度均为 I_0 ,则得到天线方向图函数:

$$F(\alpha_z, \alpha_y) = I_0 \times \sum_{m=0}^{M-1} e^{jm(kd_z \cos\alpha_z - \beta)} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(kd_y \cos\alpha_y - \alpha)}. \quad (6)$$

结合式(1),用 (θ, φ) 来表示天线方向图函数:

$$F(\theta, \varphi) = I_0 \times \sum_{m=0}^{M-1} e^{jm(kd_z \sin\theta - \beta)} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(kd_y \cos\theta \sin\varphi - \alpha)}. \quad (7)$$

假设第 (m, n) 号阵元幅度为 I_{mn} ,最终可从式(7)得到相控阵天线方向图函数:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{mn} e^{j(kmd_z \sin\theta - m\beta + knd_y \cos\theta \sin\varphi - n\alpha)}. \quad (8)$$

2 相控阵雷达天线方向图建模仿真

2.1 阵元数目

相控阵天线阵元个数通过孔径长度和阵元间距来确定,假设已知 z 方向孔径长度为 D_z ,阵元间距为 d_z ; y 方向孔径长度为 D_y ,阵元间距为 d_y ,则阵元数目:

$$M = \left\lceil \frac{D_z}{d_z} \right\rceil, \quad N = \left\lceil \frac{D_y}{d_y} \right\rceil. \quad (9)$$

2.2 加权处理

相控阵天线方向图一般采用幅度加权的方法,利用不同的加权类型和窗函数,控制阵因子中每个阵元的幅度,以便达到降低相控阵天线副瓣电平的目的.假设 W_{mn} 为 (m, n) 号阵元的加窗权值,经过加窗处理后该阵元的幅度:

$$A_{mn} = I_{mn} W_{mn}. \quad (10)$$

2.3 天线阵元矩阵系数

对于常规的和、方位差、俯仰差通道而言^[6],可将相控阵天线阵面等分为4个象限A、B、C、D(即4个子阵面区),如图3所示.

和通道为4个象限中所有阵元的合成:

$$F_z = A + B + C + D. \quad (11)$$

方位差通道为A、C两象限所有阵元合成减去B、D两象限所有阵元合成:

$$F_A = (A + C) - (B + D). \quad (12)$$

俯仰差通道为A、B象限所有阵元合成减去C、D两象限所有阵元合成:

$$F_E = (A + B) - (C + D). \quad (13)$$

为简化起见,定义 K 为天线阵元矩阵系数,矩阵中每一个 k_{mn} 对应于天线中的 (m, n) 号阵元,其中 $k_{mn} \in \{-1, 1\}$.

假设天线阵面为 8×8 的阵元排布,则和通道的天线阵元矩阵系数:

$$K_z = (k_{mn})_{8 \times 8}, \text{ 其中 } k_{mn} = 1 (\text{对 } \forall m, n); \quad (14)$$

方位差通道的天线阵元矩阵系数:

$$K_A = (k_{mn})_{8 \times 8}, \text{ 其中 } n \leq 4 \text{ 时, } k_{mn} = 1; n > 4 \text{ 时, } k_{mn} = -1; \quad (15)$$

俯仰差通道的天线阵元矩阵系数:

$$K_E = (k_{mn})_{8 \times 8}, \text{ 其中 } m \leq 4 \text{ 时, } k_{mn} = 1; m > 4 \text{ 时, } k_{mn} = -1. \quad (16)$$

依据天线阵元矩阵系数定义,我们可对该定义进行推广,令 $k_{mn} \in \{-1, 0, 1\}$,其中0表示无效阵元,-1和1表示有效阵元,就可以得到不同孔径形式(如圆或椭圆孔径等)、不同通道(常规的和差通道以及子阵通道等)的天线阵元矩阵系数.

例如,我们要得到如图3所示的A象限天线阵元矩阵系数,只需将B、C、D象限中所有阵元置为0,即 $K = (k_{mn})_{8 \times 8}$,其中 $m \leq 4$ 且 $n \leq 4$ 时, $k_{mn} = 1$; $m > 4$ 或 $n > 4$ 时, $k_{mn} = 0$.

2.4 多通道天线方向图函数

根据式(8)和式(10),我们可以得到天线波束指向角 (θ_0, φ_0) 时天线方向图函数(其中 K 为任意通道的天线阵元矩阵系数):

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} k_{mn} A_{mn} e^{j(kmd_z(\sin\theta - \sin\theta_0) + knd_y(\cos\theta \sin\varphi - \cos\theta_0 \sin\varphi_0))}. \quad (17)$$

3 仿真结果

仿真参数:平面矩形栅格排布,椭圆孔径形状,横向最大40个阵元(采用80、60、40、20进行对比仿

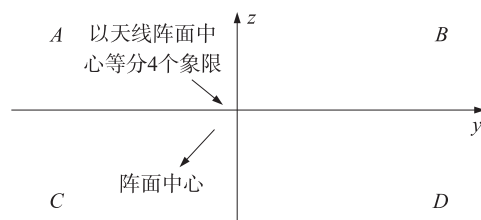


图3 平面相控阵天线象限定义

Fig. 3 Definition of quadrants of phased array antenna

真),纵向最大20个阵元,横向纵向阵元间距均为0.5个波长,30 dB 契比雪夫加权,单个阵元幅度误差5%,相位误差5%,波束指向中心方位 0° ,俯仰 0° 。

图4和图5表明,在阵元间距一定的情况下,阵元数目越多,3 dB 波束宽度越窄,副瓣性能越好。波束指向角 $(0^\circ, 0^\circ)$ 时,当横向阵元为20、40、60和80时,波束宽度分别对应为 6.822° 、 3.2198° 、 2.1124° 、 1.5882° 。

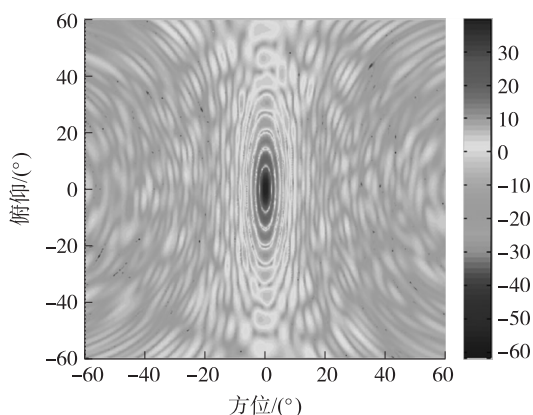


图4 80×20个阵元和通道

Fig. 4 Σ -channel antenna pattern(80×20)

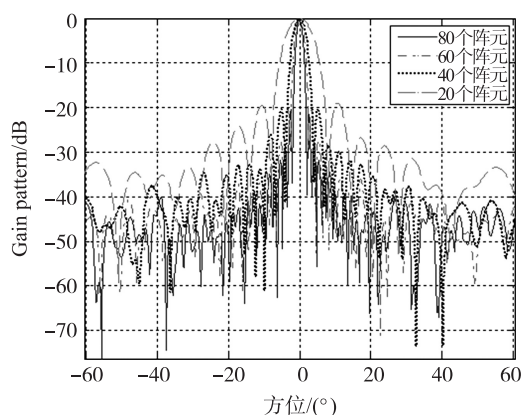


图5 横向阵元个数为80、60、40、20的方位向切面图

Fig. 5 Azimuth drawing of antenna pattern with different elements number

图6~图9为横向40个阵元纵向20个阵元的方位差、俯仰差通道方向图,其方位通道和差交点处增益 -4.1755° ,角度差 3.7592° ,方位波束宽度 3.2198° ;俯仰通道和差交点增益 -4.0758° ,角度差 7.7094° ,俯仰波束宽度 6.68° 。

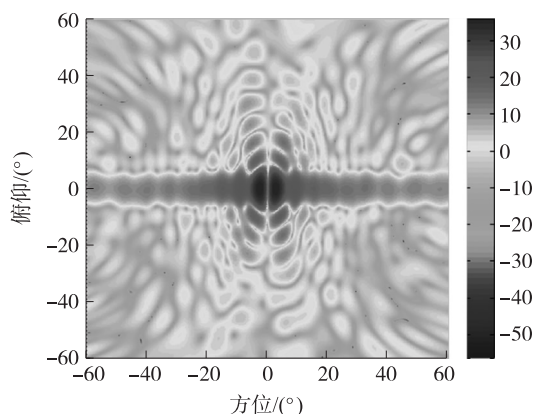


图6 40×20个阵元方位差通道

Fig. 6 Azimuth-difference channel antenna pattern(40×20)

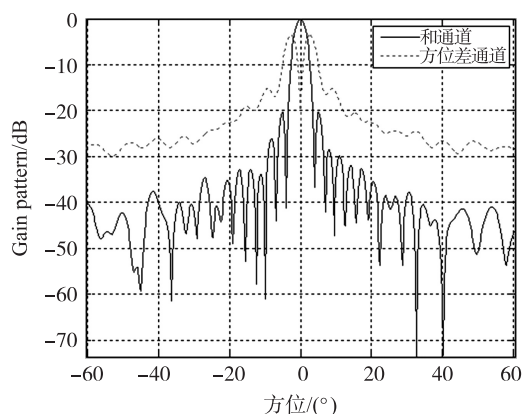


图7 40×20个阵元方位差通道切面图

Fig. 7 Drawing of azimuth-difference channel antenna pattern(40×20)

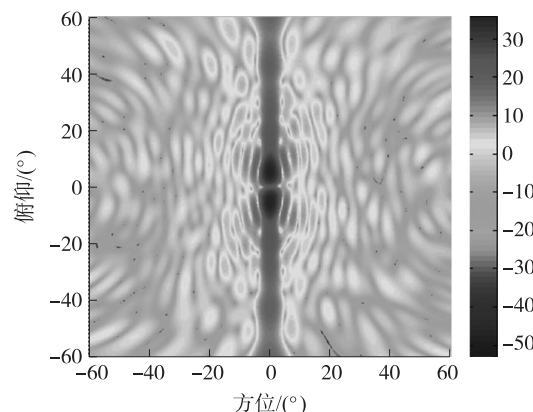


图8 40×20个阵元俯仰差通道

Fig. 8 Elevation-difference channel antenna pattern(40×20)

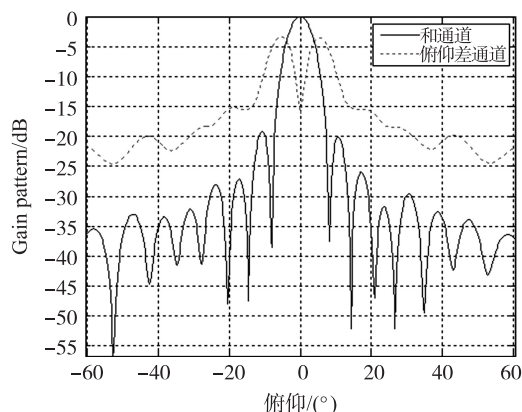


图9 40×20个阵元俯仰差通道切面图

Fig. 9 Drawing of elevation-difference channel antenna pattern(40×20)

4 结语

本文讨论了矩形栅格的天线方向图的数学模型,利用天线阵元矩阵系数得到了一个普适性的多通道天线方向图函数,并通过一组天线阵元参数进行仿真验证,分别得到和、方位差、俯仰差通道的天线方向图,随后对天线方向图的一些特性参数进行了对比分析.该算法能够灵活地获取不同通道天线方向图,可以很好地满足相控阵雷达仿真系统的设计要求,已经在一些仿真系统中得到应用.

[参考文献]

- [1] Robert J Mailloux. Phased Array Antenna Handbook[M]. 2nd ed. MA: Artech House, 2005.
- [2] John D Kraus, Ronald J Marhefka. Antennas for all Applications[M]. New York: McGraw-Hill Companies, INC, 2011.
- [3] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [4] 陈志杰, 李永祯, 戴幻尧, 等. 相控阵天线方向图的建模与实时仿真方法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(3): 31-35.
- [5] 毕明雪, 赵运弢, 钱博. 正六边形平面相控阵天线的仿真研究[J]. 电子技术, 2007, 39(4): 113.
- [6] 李文臣, 李青山, 马飞. 相位和差单脉冲相控阵天线方向图仿真与性能分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(4): 336-339.

[责任编辑: 丁 蓉]

(上接第27页)

- [3] Schmidli H. Optimal proportional reinsurance policies in a dynamic setting[J]. Scand Actuarial J, 2001(1): 55-68.
- [4] Liu C, Yang H. Optimal investment for a insurer to minimize its probability of ruin[J]. North American Actuarial Journal, 2004, 8(2): 11-31.
- [5] Gerber H, Shiu E. Optimal dividends: analysis with Brownian motion[J]. North American Actuarial Journal, 2004, 8(1): 1-20.
- [6] 梁志彬, 郭军义. 最优比例与超额损失组合再保险下的破产概率[J]. 数学学报: 中文版, 2010, 53(5): 857-870.
- [7] Yang H, Zhang L. Optimal investment for insurer with jump-diffusion risk process[J]. Insurance: Mathematics and Economics, 2005, 37(3): 615-634.
- [8] Hipp C, Schmidli H. Asymptotics of ruin probabilities for controlled risk processes in the small claims case[J]. Scand Actuarial J, 2004(5): 321-335.
- [9] Gaier J, Grandits P, Schachermeyer W. Asymptotic ruin probabilities and optimal investment[J]. Annal Applied Probability, 2003, 13(3): 1 054-1 076.
- [10] Centeno M L. Dependent risks and excess of loss reinsurance[J]. Insurance: Mathematics and Economics, 2005, 37(2): 229-238.
- [11] Centeno M L, Guerra M. The optimal reinsurance strategy—the individual claim case[J]. Insurance: Mathematics and Economics, 2010, 46(3): 450-460.
- [12] Grandell J. Aspects of Risk Theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [13] Dufresne F, Gerber H. Risk theory for the compound Poisson process that is perturbed by diffusion[J]. Insurance: Mathematics and Economics, 1991, 10(1): 51-59.
- [14] Rolski T, Schmidli H, Schmidt V, et al. Stochastic processes for insurance and finance[M]. Chichester: John Wiley, 1999.

[责任编辑: 丁 蓉]