

圆柱相控阵天线的功率分级和极化控制

李海林¹ 周建江¹ 谭静^{1,2} 汪飞¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学金城学院, 南京, 211156)

摘要:为满足共形相控阵的功率分级和极化捷变的要求,给出了一种新的圆柱阵列天线设计方法。阵列天线的天线单元由两种极化正交的线极化单元构成,且在阵列中交替出现。针对天线单元只能以开启或关闭进行幅度控制,提出了基于天线单元有效辐射功率排序方法的功率分级方案,并采用多目标粒子群算法对副瓣和交叉极化进行了抑制。仿真结果表明,基于双天线单元类型的圆柱阵列天线有效地实现了功率分级,在期望方向上实现了指定极化方向的最大功率辐射,且副瓣和交叉极化低。

关键词:阵列天线;极化控制;功率分级;多目标粒子群优化

中图分类号: TN823.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2013)03-0410-05

Radiated Power Classification and Polarization Control of Cylindrical Phased Array Antenna

Li Hailin¹, Zhou Jianjiang¹, Tan Jing^{1,2}, Wang Fei¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Nanhang Jincheng College, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211156, China)

Abstract: For power classification and polarization control of conformal phased array antenna, a new cylindrical array antenna with two types of elements arranged alternately on its surface is designed. Then, a power classification method based on effective sorting of radiated power of elements is proposed when each antenna element is only turning on or off status. Finally, sidelobes and cross-polarization are optimized by multi-objective particle swarm optimization (MOPSO). Results indicate that with low sidelobes and cross-polarization, maximum power radiation in the given radiated direction and polarization direction can be effectively got in this cylindrical phased array antenna.

Key words: array antenna; polarization control; radiated power classification; multi-objective particle swarm optimization

射频隐身性能,与雷达隐身性能、红外隐身性能等已成为评价飞行器综合隐身能力的重要指标^[1,2]。机载有源相控阵雷达系统中,射频隐身的研究内容包括辐射信号的时域、频域、空域不确定性和低截获雷达波形设计等,其中有效地控制天线系统的空域辐射特性,包括主瓣辐射功率、副瓣水平等,能使雷达辐射信号处于低概率探测状态,可以减少无源探测系统对飞机的作用距离^[3]。共形

相控阵列天线安装在飞机表面,扫描范围大,不改变载机的外形结构,保持了飞机的空气动力学特性和外形隐身特性,已应用在雷达、通信及电子战等领域^[4-6]。圆柱阵列天线与飞机机身、导弹弹体等圆柱几何表面相吻合,对载体空气动力学性能的影响将大为降低,同时加大了探测范围。在圆柱共形阵列天线研究方面,文献^[7]给出了一种宽带贴片单元组成的圆柱阵列天线,分析了其增益、互耦等

特性。文献[8]设计了一种 X 波段双极化圆柱阵列天线,可用于无人机的极化雷达系统。文献[9]研究了基于粒子群算法的圆柱阵列天线方向图综合方法。在方向图综合这类优化问题中,遗传算法、粒子群算法^[10-12]等进化算法十分重要。

为开展基于共形相控阵列天线的功率分级和极化捷变的研究,本文设计一种由两类极化正交的线极化单元交替排布组成的圆柱阵列天线,实现主瓣的多极化,并对副瓣和交叉极化进行了抑制。对于采用开关矩阵选通工作阵面的圆柱共形相控阵天线,还利用天线单元有效辐射功率排序法进行了功率分级。

1 用于极化控制的圆柱阵列天线

阵列天线由 N 个天线单元组成,辐射波束方向为 \hat{u} ,工作波长为 λ ,自由空间传播系数为 $k = 2\pi/\lambda$ 。第 p 个天线单元到原点的距离为 r_p ,方向矢量为 \hat{r}_p ,在 $\hat{u}_\phi, \hat{u}_\theta$ 方向上的方向性函数为 $f_{p\phi}(\cdot), f_{p\theta}(\cdot)$,激励幅度和相位为 I_p, φ_p ,则其远场方向性函数为

$$\mathbf{E}(\phi, \theta) = \sum_{p=1}^N (I_p e^{j\varphi_p})^* e^{jkr_p(\hat{r}_p \cdot \hat{u})} \cdot [f_{p\phi}(\phi, \theta)\hat{u}_\phi + f_{p\theta}(\phi, \theta)\hat{u}_\theta] \quad (1)$$

阵列天线常由相同的天线单元模块构成,即所有单元在天线单元坐标系 (x', y', z') 中的方向性函数都是相同的,可用正交的归一化方向性函数 $f'_\phi(\phi', \theta'), f'_\theta(\phi', \theta')$ 表示。由坐标转换关系可知,在阵列天线坐标系 (x, y, z) 中的第 p 个天线单元方向性函数为

$$\begin{cases} f_{p\phi}(\phi, \theta) = J \cdot [-\sin\phi & \cos\phi & 0] \\ f_{p\theta}(\phi, \theta) = J \cdot [\cos\theta\cos\phi & \cos\theta\sin\phi & -\sin\theta] \end{cases} \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} f_{p\phi}(\phi'_p, \theta'_p) \\ f_{p\theta}(\phi'_p, \theta'_p) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} -\sin\phi'_p & \cos\phi'_p & 0 \\ \cos\theta'_p\cos\phi'_p & \cos\theta'_p\sin\phi'_p & -\sin\theta'_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x'_{px} & x'_{py} & x'_{pz} \\ y'_{px} & y'_{py} & y'_{pz} \\ z'_{px} & z'_{py} & z'_{pz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $(x'_{px}, x'_{py}, x'_{pz}), (y'_{px}, y'_{py}, y'_{pz}), (z'_{px}, z'_{py}, z'_{pz})$ 分别为天线单元坐标系的三坐标轴在阵列天线坐标系中的表示分量。

在共形阵列天线中,由于各天线单元的指向矢量各不相同,使得各天线单元在辐射方向上的极化

是各向异性的,产生了交叉极化。为了增强指定极化上的辐射功率,降低交叉极化,在图 1(a)所示的一般圆柱阵列天线单元设计方法的基础上,本文提出了图 1(b)所示的圆柱阵列天线单元设计方案,在天线单元位置不变的情况下,第 1 种和第 2 种天线单元交替出现,且两种天线单元极化方向相互正交。

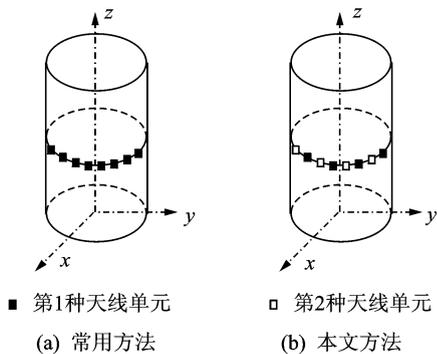


图 1 两种圆柱阵列天线示意图

2 圆柱阵列天线的功率分级

天线单元工作在饱和区时,稳定性较好,阵列天线可通过开关矩阵来实现辐射功率的控制。由于天线单元的辐射功率不可调,只能通过各天线单元的开启 ($I_p = 1$) 或关闭 ($I_p = 0$) 来实现整个阵列天线辐射功率的控制。为了实现圆柱阵列天线的功率分级,采用如下步骤实现工作单元的选择:

(1) 在考虑遮挡的情况下,计算所有单元在指定方向和极化上的辐射功率 P_1, \dots, P_N ,并按照从大到小进行排序,使得 $P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_N$,同时记录功率 P_i 对应的单元索引。

(2) 计算阵列天线在指定方向上的最大辐射功率 P_A ,其表达式为

$$P_A = \sum_{i=1}^N P_i \quad (4)$$

(3) 设定功率分级系数 α ,计算工作单元个数 M ,使得 $|\alpha P_A - \sum_{i=1}^M P_i|$ 最小。

(4) 前 M 个辐射功率对应的天线单元为工作状态,其余为关闭状态,构成工作阵列天线。

3 副瓣和交叉极化的约束

为了满足射频频隐身的需求,阵列天线的辐射方向图在指定方向和极化上要求为最大值,还要实现低副瓣和低交叉极化功率。这是一个多目标综合优化的问题,可以表述为:求解最佳激励相位 φ_p ,

$p=1, \dots, N$, 满足

$$\begin{aligned} \max P_{co} \\ \min P_{av}, P_{cv}, P_{s1}, \dots, P_{sL} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: P_{co} 为阵列天线在指定方向和极化方向上的辐射功率, 若指定方向 $\hat{\mathbf{u}}_M$ 的方位角和俯仰角分别为 ϕ_M, θ_M , 指定极化方向即共极化方向为 $\hat{\mathbf{u}}_{co}$, 则其表达式为

$$P_{co} = |\mathbf{E}(\phi_M, \theta_M) \cdot \hat{\mathbf{u}}_{co}|^2 \quad (6)$$

P_{av} 为阵列天线辐射的平均功率, 其表达式为

$$P_{av} = \frac{1}{4\pi\omega} \iint |\mathbf{E}(\phi, \theta)|^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (7)$$

P_{cv} 为阵列天线交叉极化平均功率, 其表达式为

$$P_{cv} = \frac{1}{4\pi\omega} \iint |\mathbf{E}(\phi, \theta) \cdot \hat{\mathbf{u}}_{cr}|^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (8)$$

式中 $\hat{\mathbf{u}}_{cr}$ 为交叉极化的方向, 和共极化方向 $\hat{\mathbf{u}}_{co}$ 和辐射方向 $\hat{\mathbf{u}}_M$ 都正交。

P_{s1}, \dots, P_{sL} 为 L 个副瓣区域的平均功率, 表达式为

$$P_{sj} = \frac{1}{S_j} \iint_{\Omega_j} |\mathbf{E}(\phi, \theta)|^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad j=1, \dots, L \quad (9)$$

式中 S_j 为第 j 个副瓣区域 Ω_j 的面积。

对于式(5)的多目标优化问题, 本文采用文献[10]给出的多目标粒子群优化(Multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法求解阵列天线各单元天线的最优激励相位。主要步骤如下:

(1) 初始化圆柱阵列天线的阵元位置和阵元指向, 选择各阵元的方向性函数。

(2) 设定阵列辐射方向, 副瓣区域和电平, 极化方向等。

(3) 考虑圆柱几何外形的遮挡, 选择处于工作状态的阵元组合构成工作子阵。

(4) 初始化粒子种群, 包括: 确定粒子维数, 确定多目标优化的维数, 设置粒子最大游动范围和最大游动速度 V_{max} , 设置最大迭代次数, 初始化粒子位置, 初始化所有粒子的初始速度, 设置粒子更新的学习因子 c_1, c_2 和速度更新因子 ω , 典型值为 $c_1=c_2=2$ 和 $\omega=0.73$ 。

(5) 初始化外部比较集和 Pareto 解的自适应网格, 包括: 计算初始粒子种群的适应度, 初始化每个粒子的历史最优解, 基于 Pareto 支配关系初始化外部比较集, 根据网格挤压技术初始化自适应网格。

(6) 更新粒子速度。根据种群的全局最优解和

粒子的历史最优解更新速度, 更新公式如下

$$\begin{aligned} V_i^{k+1} = \omega \times V_i^k + c_1 \times (\text{Pos}_{i, \text{best}} - \text{Pos}_i^k) + \\ c_2 \times (\text{Pos}_{j, \text{ref}} - \text{Pos}_i^k) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: V_i 表示第 i 个粒子的速度; $\text{Pos}_{i, \text{best}}$ 表示该粒子的历史最优解; $\text{Pos}_{j, \text{ref}}$ 表示外部比较集中的第 j 个非支配解, 它是采用轮盘赌运算从当前外部比较集中产生, 可以看作在不同粒子之间进行了信息共享。粒子速度更新后, 要使其最大速度在 $[-V_{max}, V_{max}]$ 区间。

(7) 更新粒子位置。更新公式如下

$$\text{Pos}_i^{k+1} = \text{Pos}_i^k + V_i^{k+1} \quad (11)$$

(8) 根据阵列天线方向图综合目标, 计算粒子适应度。

(9) 更新外部比较集。将当前的最优解加入到外部比较集中, 进行支配关系运算, 按照步骤(5)中的网格挤压技术得到新的外部比较集。

(10) 判断种群迭代是否满足结束条件, 如果结束则执行下一步骤, 如果未结束返回步骤(6)继续执行迭代。结束条件一般是已经到达最大迭代次数或者已经求得满足要求的非支配解集。

(11) 根据得到的 Pareto 最优边界, 选择适当的最优解, 构成阵列天线的激励复数矢量。

(12) 由激励矢量求解阵列天线的三维方向图, 并给出数值结果。

4 仿真结果和分析

本文设计了由 310 个天线单元组成圆柱阵列天线, 天线单元位于 10 个圆环上, 圆环之间和单元天线之间的间隔都为 $\lambda/2$ 。a 型圆柱阵列天线采用表 1 所示的第 1 种天线单元, b 型圆柱阵列天线采用了表中的两种天线单元, 这两种天线单元都是线极化, 极化方向是相互正交的。如图 2 所示的 b 型圆柱阵列天线中, 两种天线单元相间排列。考虑几何外形遮挡和功率分级的要求, 矩形中有点的表示工作天线单元。

表 2 给出了两种圆柱阵列天线仿真结果的比较
表 1 两种天线单元的方向性函数

天线单元	$f'_\phi(\phi', \theta')$	$f'_\theta(\phi', \theta')$
第 1 种	0	$\cos[1.57 * \sin\theta']$ $0 \leq \theta' < \frac{\pi}{2}$
第 2 种	$\cos[1.57 * \sin\theta']$ $0 \leq \theta' < \frac{\pi}{2}$	0

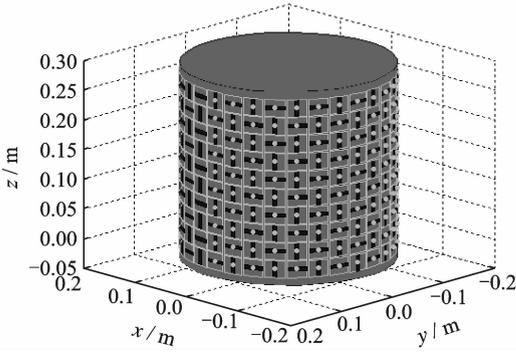


图 2 用于极化控制的圆柱阵列天线

表 2 两种圆柱阵列天线的仿真结果比较

圆柱阵列天线	a 型		b 型	
	\hat{u}_ϕ	\hat{u}_θ	\hat{u}_ϕ	\hat{u}_θ
共极化最大功率 P_{co}/dB	33.2	27.3	31.9	31.6
辐射平均功率 P_{av}/dB	11.3	9.8	10.7	10.8
交叉极化平均功率 P_{cv}/dB	5.8	6.6	5.3	6.5
交叉极化最大功率 P_{cm}/dB	24.6	27.2	19.9	21.5
第 1 副瓣平均功率 P_{s1}/dB	8.0	4.3	5.6	6.6
副瓣最大功率 P_{sm}/dB	27.1	20.0	18.7	19.4

较,图 3 给出了 b 型在极化方向为 \hat{u}_ϕ 时的共极化方向图,其中辐射方向 \hat{u}_M 的方位角和俯仰角分别为 $180^\circ, 90^\circ$ 。可以看出, b 型在两个正交的共极化指定方向上皆能实现功率最大值,而且起伏较小。a 型天线在 \hat{u}_ϕ 共极化时,在 \hat{u}_M 方向上取得了功率最大值,且比 b 型要高出 1.3 dB。a 型天线在 \hat{u}_θ 共极化时,虽然在辐射方向上取得了功率最大值,但交叉极化和共极化的功率最大值相差 0.1 dB,指定方向之外出现了大功率辐射,不满足要求。所以从圆柱阵列天线的波束角度和极化方向控制出发, b 型天线性能优于 a 型天线。

从交叉极化和副瓣抑制角度看, a 型天线在 \hat{u}_ϕ 共极化时,交叉极化功率最大值比 b 型天线大 2.6 dB,副瓣功率最大值比 b 型天线大 7.4 dB,而

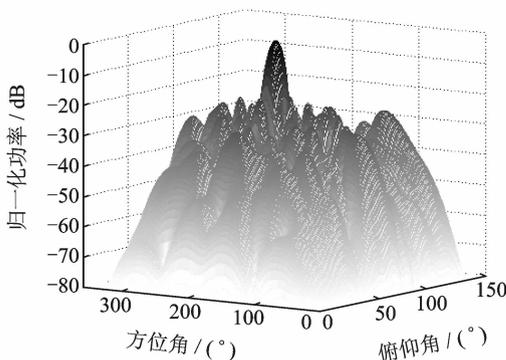


图 3 b 型圆柱阵列天线方向图

且 a 型天线在 \hat{u}_θ 共极化时,交叉极化功率最大值接近共极化功率最大值,完全没有抑制效果。b 型天线中,与共极化功率最大值相比,交叉极化功率最大值低 -10 dB,副瓣功率最大值低 -12 dB,抑制效果良好,而且不同共极化方向条件下的起伏较小。所以在交叉极化和副瓣抑制方面, b 型天线也是优于 a 型的。

对于 b 型圆柱阵列天线,本文基于天线单元功率排序的方法选择工作天线单元,组成工作阵列天线,在指定方向条件下对极化、副瓣和交叉极化进行控制。圆柱阵列天线的辐射方向 \hat{u}_M 为 $(180^\circ, 90^\circ)$,共极化方向为 \hat{u}_ϕ 方向,在不同功率分级系数下,表 3 给出了阵列天线方向图的参数,图 4 给出了切面二维方向图的比较结果,其中切面方向图取方位角为 180° ,俯仰角变化。由仿真结果可知,阵列天线的最大功率在指定方向得到了分级,而且低交叉极化性能得到了保持。其中,功率分级系数 $\alpha=0.9$ 时处于工作状态的天线单元有 48 个,与 $\alpha=1$ 时相比减少非常明显,这是因为大部分天线单元在指定方向和指定极化上的辐射强度较小。工作天线单元的减少,降低了整个阵列天线的辐射功率,提高了其隐身能力。

表 3 不同功率分级系数下的阵列天线仿真结果

功率分级系数 α	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
工作单元个数	151	48	37	29	23
共极化最大功率 P_{co}/dB	31.2	29.4	28.0	27.0	25.3
辐射平均功率 P_{av}/dB	10.8	7.0	5.8	4.9	3.9
交叉极化平均功率 P_{cv}/dB	6.4	0.6	-0.9	-1.4	-2.8
交叉极化最大功率 P_{cm}/dB	18.5	19.3	17.3	17.4	15.3

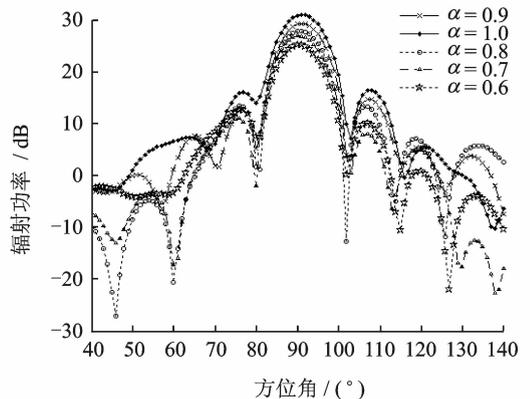


图 4 不同功率分级系数 α 下的切面方向图比较

5 结束语

为了满足圆柱相控阵列天线的功率分级和极化控制的要求,本文首先推导了共形阵列天线的极化方向图表达式,设计了两种极化正交的线极化单元交替排布的圆柱阵列天线,分析了其方向图的特性,和单类型单元天线组成的圆柱阵列天线进行了比较,仿真结果表明该阵列天线在极化控制、副瓣和交叉极化抑制方面具有优越性。本文还提出了基于天线单元辐射功率排序方法的功率分级方法,针对由开关矩阵选择天线单元组成的阵列天线,解决了其辐射功率控制的问题。

参考文献:

- [1] 杨红兵,周建江,汪飞,等.飞机射频隐身表征参量及其影响因素分析[J].航空学报,2010,31(10):2040-2045.
Yang Hongbing, Zhou Jianjiang, Wang Fei, et al. Characterization parameters of warplane RF stealth and analysis of its affecting factors [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(10): 2040-2045.
- [2] 陈国海.先进战机多功能相控阵系统综合射频隐身技术[J].现代雷达,2007,29(12):1-4.
Chen Guohai. General RF stealth of airborne multifunctional phased array systems[J]. Modern radar, 2007, 29(12): 1-4.
- [3] Lynch D. Introduction to RF stealth [M]. North Carolina: Science Technology Publishing Inc, 2004.
- [4] 张光义.共形相控阵天线的应用与关键技术[J].中国电子科学研究院学报,2010,5(4):331-336.
Zhang Guangyi. Applications and key technologies of conformal phased array antenna[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2010, 5(4): 331-336.
- [5] 连小华,周建江.应用于微型飞行器阵列天线的自适应波束形成器[J].南京航空航天大学学报,2006,38(3):326-330.
Lian Xiaohua, Zhou Jianjiang. Robust adaptive beamformer for antenna on micro air vehicle [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 38(3): 326-330.
- [6] Ahn H, Tomasic B, Liu S. Digital beamforming in a large conformal phased array antenna for satellite operations support—Architecture, design, and development[C]//2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston, USA: IEEE Boston Section, 2010: 423-431.
- [7] Abbaspou M, Hassani H R. Wideband planar patch antenna array on cylindrical surface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 394-397.
- [8] Ahn C H, Ren Y J, Chang K. A dual-polarized cylindrical conformal array antenna suitable for unmanned aerial vehicles [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2011, 21(1): 91-98.
- [9] 王一笑,郭陈江,丁君,等.基于粒子群优化算法的共形阵列天线图综合[J].计算机仿真,2008,25(8):174-177.
Wang Yixiao, Guo Chenjiang, Ding Jun, et al. Pattern synthesis of cylindrical conformal arrays using PSO [J]. Computer Simulation, 2008, 25(8): 174-177.
- [10] Coello C C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [11] 白俊杰,王宁生,唐敦兵.一种求解多目标柔性作业车间调度的改进粒子群算法[J].南京航空航天大学学报,2010,42(4):447-453.
Bai Junjie, Wang Ningsheng, Tang Dunbing. Improved PSO algorithm for multi-objective optimization flexible job shop scheduling problems [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(4): 447-453.
- [12] Yang Q R, Yuan Q R, Yang F, et al. Synthesis of conformal phased array with improved NSGA-II algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(12): 4006-4009.