

基于共形稀疏阵列的艇载外辐射源雷达性能分析

周建卫^{*①②} 李道京^① 田鹤^{①②} 潘洁^{①②} 胡焜^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 该文研究了共形稀疏阵列在艇载外辐射源雷达中的应用问题,并分析了艇载外辐射源雷达目标探测性能。鉴于天线在雷达系统中的重要地位,重点分析了稀疏阵列数字波束形成(DBF)天线的布阵方式及天线方向图指标。基于组合巴克码实现艇身稀疏阵列共形布设,提出一种曲线阵列到直线阵列的补偿方法,以获得理想的DBF天线方向图。针对曲线阵列可能存在的形变问题,采用分布式位置和姿态测量系统(POS)进行形变误差测量,经曲线拟合后实施精确补偿。仿真结果表明所提方法的有效性。

关键词: 外辐射源雷达; 稀疏阵列; 目标探测; 共形天线; 阵列误差测量和补偿

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)05-1058-06

DOI: 10.11999/JEIT160846

Performance Analysis on Airship-borne Passive Radar Based on Conformal Sparse Array

ZHOU Jianwei^{①②} LI Daojing^① TIAN He^{①②} PAN Jie^{①②} HU Xuan^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The application of conformal sparse array to airship-borne passive radar is studied, and the target detection performance of airship-borne passive radar is analyzed. Because of the importance of antenna in radar system, embattle method of sparse array Digital Beam Forming (DBF) antenna and antenna pattern index are selectively analyzed. Layout of airship-borne sparse array is implemented based on the combination of Barker code. In order to obtain ideal DBF antenna pattern, a method of compensating the curve array to the linear array is proposed. With respect to the possible deformation problem, the distributed Position and Orientation System (POS) is used to measure the deformation error based on which curve fitting is implemented to conduct accurate compensation. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: Passive radar; Sparse array; Target detection; Conformal antenna; Array error measurement and compensation

1 引言

平流层飞艇可在20 km以上高空长时间驻留,这为其在通信服务、高空侦察等领域的应用提供了有利条件。其巨大的体积可满足雷达大尺寸天线的布设要求,从而实现高精度、远距离目标探测。为减少系统体积重量,基于稀疏阵列天线的艇载主动式雷达技术已得到广泛研究^[1-3],相关工作已涉及到共形稀疏阵列天线^[4-6]。

主动式雷达系统要获得远的探测距离,除要使用大尺寸天线以外,还需要有较大的信号发射功率,

对飞艇供电能力要求较高。针对平流层飞艇电源紧缺的问题,可考虑设计主被动结合的艇载雷达探测系统,在必要时使用外辐射源信号^[7,8](地面广播、电视信号和合作辐射源等),以在低功耗条件下实现目标远距离探测。在此基础上,可将稀疏阵列天线设计为主动X波段子阵和被动P波段子阵共孔径。

本文结合平流层飞艇区域侦察预警应用需求,提出了把稀疏阵列用于艇载外辐射源雷达的设想,设计了系统参数并分析了艇载共形稀疏阵列外辐射源雷达的目标探测性能。针对平流层飞艇的特点,设计了基于组合巴克码的大型共形稀疏阵列,分析了直线稀疏布阵和共形曲线稀疏布阵及天线方向图指标。针对曲线阵列的弯曲和形变问题,提出了曲线阵列到直线阵列的补偿方法。

收稿日期: 2016-08-16; 改回日期: 2016-11-11; 网络出版: 2016-12-13

*通信作者: 周建卫 wlx000@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61271422), 所创新项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271422), Institute Innovation Project

2 直线稀疏布阵及分析

2.1 直线稀疏阵列天线布局

本文基于组合巴克码设计稀疏阵列，子阵阵元数为 3×3 。巴克码是一种具有良好相关特性的二相码序列，它具有一定的稀疏性，有助于稀疏重建^[9]。但巴克码的码长较短，最长只有 13 位，故考虑采用码长较长的组合巴克码序列排布子阵实现稀疏布阵。组合巴克码的生成方式见文献[10]。根据舰载雷达对空间分辨率的要求，综合考虑阵列长度和稀疏率，本文采用以 11 位巴克码[11100010010]作为 4 位巴克码[1110]码元构成的 44 位组合巴克码序列^[11]。该编码方法所得的组合巴克码序列长度为 44，可排布 21 个子阵，稀疏率约 50%。在方位向，子阵依组合巴克码序列排布，子阵与子阵间的间隔为子阵方位向长度。每个子阵在方位向和俯仰向均等间隔布设 3 个阵元，俯仰向的 3 个阵元采用功率合成，21 个子阵在方位向阵元级做 DBF 处理。

基于组合巴克码的稀疏阵列如图 1 所示，其中实心表示该码元位置有子阵，空心表示该码元位置无子阵。若将图中的空心子阵换成实心子阵则可变成满阵。本文主要分析阵列方位向天线方向图。

2.2 直线稀疏阵列性能分析

通过线阵列常规窄带波束形成^[12]，可在不同方位角上形成相应的 DBF 天线方向图。

对于由间距为 d 的 M 个全向阵元组成的均匀线阵列， λ 为波长， θ 为信号入射角， Θ 为入射角范围， θ_0 为波束指向，相邻两阵元间波程差引起的相位差为 $(2\pi/\lambda)d \sin \theta$ ，则阵列的天线方向图为

$$p(\theta) = \mathbf{w}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta) = \sum_{i=0}^{M-1} w_i(\theta_0) a_i(\theta), \theta \in \Theta \quad (1)$$

其中， $\mathbf{w}(\theta_0)$ 为阵列加权向量， $\mathbf{w}^T(\theta_0) = [w_0(\theta_0) w_1(\theta_0) \cdots w_{M-1}(\theta_0)]$ ， $\mathbf{a}(\theta)$ 为阵列导向向量， $\mathbf{a}^T(\theta) = [a_0(\theta) a_1(\theta) \cdots a_{M-1}(\theta)]$ ， $a_i(\theta) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}id \sin \theta}$ ， $i = 0, 1, \dots, M-1$ 。

本文阵列波束形成均采用均匀加权。

对于满阵，有 $w_i(\theta_0) = a_i(\theta_0)/M$ ， $i = 0, 1, \dots, M-1$ ，根据式(1)可知其天线方向图为

$$p(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}id(\sin \theta - \sin \theta_0)}, \theta \in \Theta \quad (2)$$

对于稀疏阵，设 N 为其全向阵元数， $a_k(\theta), k = 0, 1, \dots, N-1$ 为稀疏阵列导向向量中第 k 个阵元分量， $w_k(\theta), k = 0, 1, \dots, N-1$ 为稀疏阵列加权向量中第 k 个阵元分量，则稀疏阵列的天线方向图为

$$p_{sp}(\theta) = \sum_{k=0}^{N-1} w_k(\theta_0) a_k(\theta), \theta \in \Theta \quad (3)$$

设 $i_k, k = 0, 1, \dots, N-1$ 为稀疏阵中第 k 个阵元对在满阵中的阵元序列值，其中 $i_k \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 。

则 $a_k(\theta) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}i_k d \sin \theta}$ ， $w_k(\theta_0) = a_k(\theta_0)/N$ ， $k = 0, 1, \dots, N-1$ ，则有

$$p_{sp}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}i_k d(\sin \theta - \sin \theta_0)}, \theta \in \Theta \quad (4)$$

稀疏阵天线方向图有比较高的副瓣，为降低副瓣，可采用子阵天线方向图加权的方式^[13]。从线阵列常规窄带波束形成原理可知，利用连续子阵天线方向图对稀疏阵天线方向图进行加权，连续子阵数量越多，加权效果越好，限于组合巴克码编码方式，本文最多只能使用连续 3 子阵。下面考虑使用组合巴克码中间的连续 3 子阵即 1×9 个阵元对稀疏阵天线方向图进行加权，如图 1 中虚线框内所示。

令连续 3 子阵阵元数为 M_s ， $p_{sub}(\theta)$ 为子阵天线方向图， $p_{sp}(\theta)$ 为稀疏阵天线方向图，那么根据式(2)和式(4)可得到子阵加权后的天线方向图表达式：

$$\begin{aligned} p_{w_sp}(\theta) &= p_{sub}(\theta) p_{sp}(\theta) \\ &= \frac{1}{M_s N} \sum_{r=0}^{M_s-1} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(r+i_k)d(\sin \theta - \sin \theta_0)}, \theta \in \Theta \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 仿真结果和指标对比情况

这里设置信号波长 $\lambda = 0.6$ m，每个子阵方位向阵元间隔为 $\lambda/2$ 即 0.3 m。由图 1 可知满阵阵元数为 132 个，连续 3 子阵阵元数为 9 个，根据式(2)，式(4)，式(5)可分别获得直线满阵、直线稀疏阵和加权直线稀疏阵天线方向图，如图 2 所示。

根据图 2 中的天线方向图，表 1 给出了不同阵列形式下天线方向图的相关性能指标。

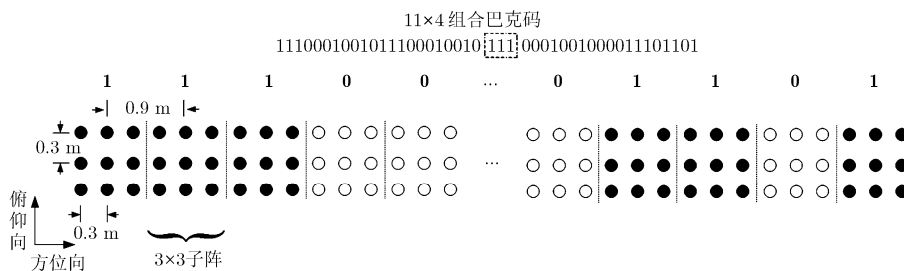


图 1 11×4 组合巴克码稀疏阵子阵排列图

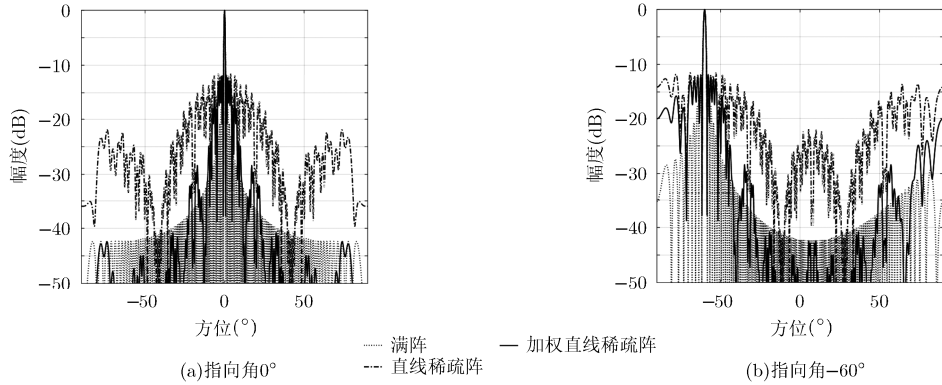


图 2 直线满阵、直线稀疏阵、加权直线稀疏阵天线方向图

表 1 直线满阵、直线稀疏阵、加权直线稀疏阵天线方向图指标

指标	直线满阵		直线稀疏阵		加权直线稀疏阵	
指向角(°)	0	-60	0	-60	0	-60
-3 dB 波束宽度(°)	0.768	1.54	0.704	1.41	0.704	1.41
PSLR(dB)	-13.26	-13.26	-11.82	-11.82	-11.93	-11.93
ISLR(dB)	-9.57	-9.34	2.35	2.72	-3.04	-1.92

从图 2 和表 1 可以看出，利用连续 3 子阵方向图加权的方法可有效抑制稀疏阵列天线旁瓣和栅瓣的影响，从而大大改善其积分旁瓣比，但其峰值旁瓣比和-3 dB 波束宽度几乎无改善。从表 1 中数据看出积分旁瓣比可提高 5.4 dB(0°指向)/4.6 dB(-60°指向)。

3 共形曲线稀疏布阵及分析

3.1 共形曲线稀疏阵列天线布局

目前设计的平流层飞艇艇身大都呈“水滴”型，常见的有近似椭圆形、纺锤体系和玫瑰线系列等。本节中采用三叶玫瑰线来近似表示艇身的外形^[4]。三叶玫瑰线在极坐标下的表达式为

$$\rho = a \sin(3\theta) \quad (6)$$

以其中的一个叶作为飞艇艇身外形曲线的近似形状，本文假设飞艇艇身长度为 150 m，即令三叶玫瑰线模型中 $a = 150$ ，布设全阵长度为 39.6 m。三叶玫瑰线的艇身结构使得子阵的排列变成曲线形式，即稀疏阵列天线变成曲线阵。稀疏阵列天线的弯曲对天线方向图性能指标影响较大，为此需要研

究共形曲线稀疏阵列到直线稀疏阵列的阵型补偿问题，这里定义该补偿为弯曲补偿。共形曲线稀疏布阵示意图如图 3 所示，图中示意了稀疏阵列的共形曲线排列形式以及弯曲补偿后的直线排列形式。

3.2 共形曲线稀疏阵列性能分析

这里首先假设曲线阵列无形变，而直线稀疏阵可通过利用最小二乘法对曲线稀疏阵进行一阶线性拟合得到，由此确立每个子阵相位中心在曲线稀疏阵与直线稀疏阵之间对应的斜距误差对应关系。曲线稀疏阵与直线稀疏阵的主要区别在于子阵接收信号的相位变化，该相位变化可通过曲线稀疏阵与直线稀疏阵在斜距上的距离差得到。弯曲补偿的核心即对曲线稀疏阵子阵接收信号相位变化的补偿。

共形曲线稀疏阵与直线稀疏阵阵相比，假设弯曲距离为 $\Delta R_{i_k}, k = 0, 1, \dots, N-1$ ，则根据式(4)可得到共形曲线稀疏阵的天线方向图为

$$p_{cv} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} i_k (d + \Delta R_{i_k}) (\sin \theta - \sin \theta_0)}, \theta \in \Theta \quad (7)$$

3.3 形变误差测量和补偿

由于飞艇体积较大，阵列天线的尺寸也较大，

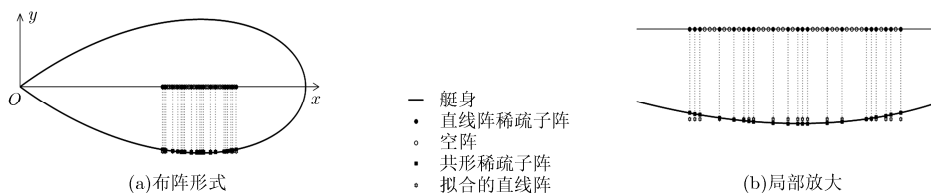


图 3 共形曲线稀疏布阵示意图

而子阵间不能保证刚性连接，因而共形稀疏阵列天线全阵工作在与艇身蒙皮共形的非刚性状态下，在平台运动时，稀疏阵列天线的形变是难以避免的，有必要分析阵列形变误差测量和补偿问题。

使用分布式位置和姿态测量系统(POS)可获得每个子阵的高精度位置信息^[15]，并获得阵列形变误差信息。由于信号波长较长，基于差分 GPS 即可能达到 1/10 波长(约 5~6 cm)的位置测量精度，保证阵列形变误差补偿的精度要求。假定艇载共形阵列主要产生低阶形变，为减少分布式 POS 测量误差的影响，可考虑联合处理多个 POS 给出的子阵位置信息并进行曲线拟合。本文采用最小二乘法，对 POS 测量值进行多项式拟合，估计出整个天线阵列的形变情况。

设曲线阵形变误差距离为 $\Delta E_{ik}, k = 0, 1, \dots, N - 1$ ，根据式(7)可得到有形变误差条件下共形曲线稀疏阵的天线方向图为

$$p_{cv} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (d + \Delta R_{ik} + \Delta E_{ik}) (\sin \theta - \sin \theta_0)}, \theta \in \Theta \quad (8)$$

由式(8)可以看出，在实际应用中，减去曲线阵弯曲及形变带来的相位变化即可得到直线稀疏阵天线方向图。

3.4 仿真结果和指标对比情况

基于前面阵列形变与共形问题的分析，假定 POS 位置测量精度为 5 cm，根据最小二乘准则对 POS 位置信息进行二阶曲线拟合，得到有一定形变误差的曲线阵。对该曲线阵进行形变补偿，再根据最小二乘准则对形变补偿后的曲线阵进行一阶直线拟合，得到与艇身几乎平行的直线阵。比较形变补偿后的曲线阵与对其进行一阶拟合后得到的直线阵在斜距上的位置差，可得到待补偿曲线阵弯曲距离。这里波长和阵元间隔参数同上述。

图 4(a)为无形变曲线阵、有形变曲线阵、拟合后的形变曲线阵以及弯曲补偿后的直线阵的阵列位置图。图 4(b)为随机误差拟合前后的形变情况，其中虚线表示由分布式 POS 得到的带有随

机误差的形变误差，点划线表示拟合后只有阵列形变的形变误差。从图中可以看出，经二阶曲线拟合后，可在一定程度上减少 POS 位置测量误差带来的影响。

根据式(8)可得到有形变误差条件下共形曲线稀疏阵的天线方向图。有形变曲线稀疏阵与加权直线稀疏阵的对比图如图 5 所示。从图中可以看出，经过形变误差拟合、形变补偿、弯曲补偿、连续 3 子阵加权后，稀疏阵天线方向图副瓣得到了很好的抑制。

表 2 给出了不同阵列形式下天线方向图的相关性能指标。从表中可以看出有形变曲线稀疏阵的积分旁瓣比 7.72 dB(法向指向)/8.17 dB(-60°指向)非常高，经过形变误差拟合、形变补偿、弯曲补偿、连续 3 子阵加权后，积分旁瓣比改善 10.76 dB(法向指向)/10.09 dB(-60°指向)。

这里 PSLR 未列出来，因为有形变曲线稀疏阵的 PSLR 非常差，几乎分不出来主瓣和副瓣。

4 外辐射源雷达探测性能分析

4.1 系统参数设计

外辐射源雷达系统参数如表 3 所示。

这里检测信噪比选取为 16 dB，对应起伏目标的发现概率约为 0.8，虚警约为 10^{-5} ^[16]；系统损耗选取为 13 dB，包括射频系统损失 1 dB，波束形状损失 1 dB，CFAR 损失 2 dB，信号处理失配损失 5 dB，参考信号与回波信号去相关损失 1 dB(相关系数 0.8)，直达波对消使检测基底抬高损失 3 dB，后两项损失为外辐射源雷达体制带来的，实际系统中产生的损失可能会更大。

根据直线稀疏阵布阵，表 4 给出了满阵与稀疏阵相关天线参数，表中对比列出了天线俯仰向、方位向阵元数，总阵元数，天线面积和天线增益。

4.2 探测性能分析

根据信号从辐射源到接收机传播中的功率变化情况，由雷达方程^[16]可推导出

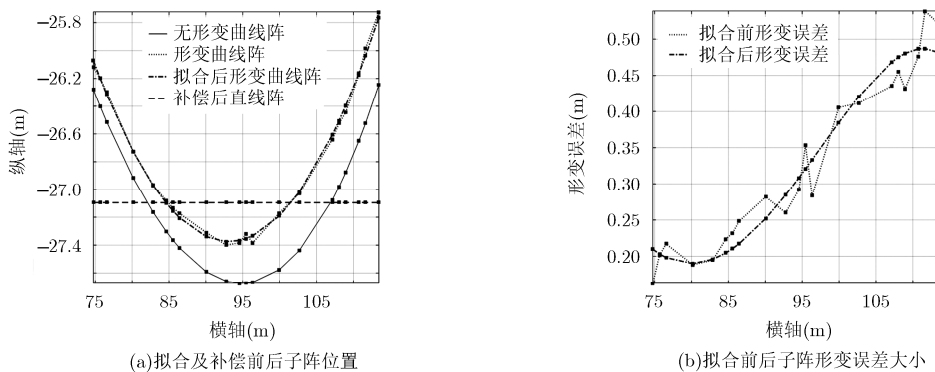


图 4 形变误差拟合及补偿

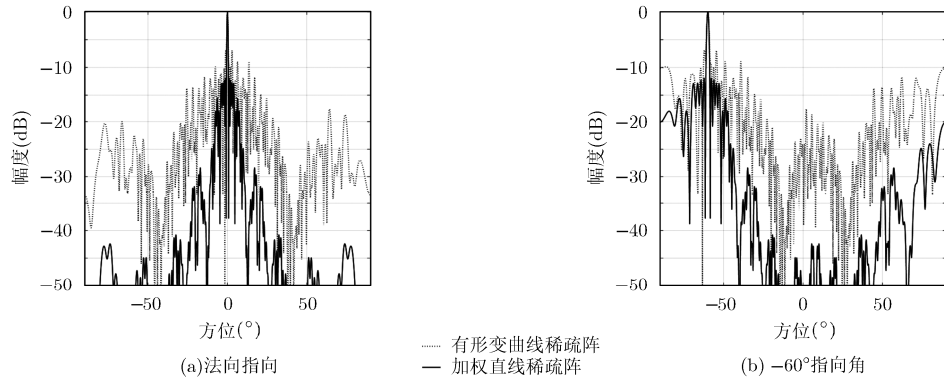


图 5 有形变曲线稀疏阵与加权直线稀疏阵对比图

表 2 有形变曲线稀疏阵、加权直线稀疏阵指标对比

指标	有形变曲线稀疏阵		加权直线稀疏阵	
指向角(°)	0	-60	0	-60
-3 dB 波束宽度(°)	0.7470	1.4920	0.7040	1.4050
ISLR(dB)	7.72	8.17	-3.04	-1.92

表 3 系统参数

系统参数	数值	系统参数	数值
信号频率(MHz)	500	阵元间隔(m)	0.3
噪声温度(K)	300	信号积累时间(s)	3
噪声系数(dB)	3	辐射源发射功率(kW)	10
系统损耗(dB)	13	目标 RCS (m ²)	3
检测信噪比(dB)	16	基线长度(km)	50

表 4 满阵与稀疏阵天线参数

指标	满阵	稀疏阵
俯仰向阵元数(个)	3	3
方位向阵元数(个)	3×44	3×21
总阵元数(个)	396	189
天线面积(m ²)	35.64	17.01
天线增益(dB)	30.95	27.7

$$R_r R_t = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 (1/T_n) F L_n (\text{SNR})_{\text{omin}}}} \quad (9)$$

式中, P_t 为辐射源发射功率, G_t 为发射天线增益, G_r 为接收天线增益, σ 为目标 RCS, λ 为信号波长, R_t 为目标到辐射源距离, R_r 为目标到接收天线的最远接收距离, $(\text{SNR})_{\text{omin}}$ 为接收机最小输出信噪比, k 为波尔兹曼常数, T_0 为接收机噪声温度, F 为接收机噪声系数, T_n 为接收机信号积累时间, L_n 为系统损耗。

设外辐射源雷达系统中基线长度为 D , 则

根据式(9)可得到雷达在水平面各个方向上的最大接收距离表达式:

$$R_{r \max} = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 (1/T_n) F L_n (\text{SNR})_{\text{omin}}}} + \frac{D^2}{4} + \frac{D}{2} \quad (10)$$

$$R_{r \min} = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 (1/T_n) F L_n (\text{SNR})_{\text{omin}}}} + \frac{D^2}{4} - \frac{D}{2} \quad (11)$$

这里假定阵列在艇身两侧均布设, 近似形成全向天线的覆盖范围, 根据表 3 和表 4 参数, 可得到满阵与稀疏阵条件下的最大作用距离分别为 $R_{f \max} = 368.83 \text{ km}$, $R_{sp \max} = 311.12 \text{ km}$, 满阵和稀疏阵的覆盖范围如图 6 所示。从图中可以看出, 在 11×4 组合巴克码稀疏方式下, 稀疏率约 50%, 稀疏阵覆盖范围略小于满阵覆盖范围。

5 结束语

本文分析了基于共形稀疏阵列的艇载外辐射源雷达性能。基于组合巴克码实现艇身稀疏阵列共形布设, 本文采用连续布设多子阵均匀加权控制天线方向图副瓣, 通过形变误差测量和曲线阵到直线阵的补偿获得理想的 DBF 天线方向图。仿真结果表明, 共形稀疏阵列天线在保证方位向空间分辨率的同时, 其峰值旁瓣比可得到有效控制, 其积分旁瓣

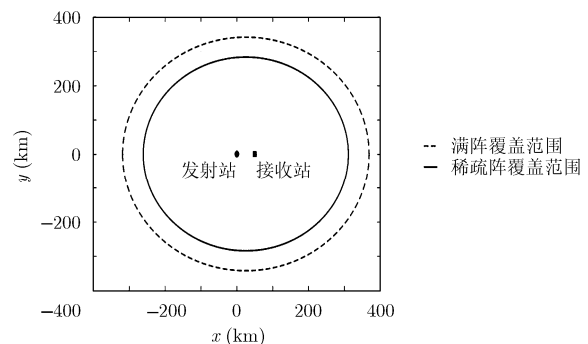


图 6 满阵与稀疏阵覆盖范围

比可达到 -3.04 dB (0° 指向) / -1.92 dB (-60° 指向)的水平。对连续布设多子阵实施非均匀加权有可能进一步改善稀疏阵列的副瓣水平。在外辐射源雷达工作条件下, 稀疏率约 50% 的稀疏阵和未稀疏满阵两种布阵方式相比, 其作用距离接近, 同时具有体积小、重量轻的特点, 更容易工程实现, 相关研究工作值得深入开展。

参 考 文 献

- [1] 侯颖妮, 李道京, 尹建凤, 等. 基于稀疏综合孔径天线的艇载成像雷达研究[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2377-2382. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2008.12.020.
HOU Yingni, LI Daojing, YIN Jianfeng, et al. Airship imaging radar based on aperture synthesis of thinned array[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(12): 2377-2382. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2008.12.020.
- [2] CLARK T and JASKA E. Million element ISIS array[C]. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY), Boston, 2010: 29-36. doi: 10.1109/ARRAY.2010.5613396.
- [3] VAN BEZOUWEN H, FELDLE H, and HOLPP W. Status and trends in AESA-based radar[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), California, 2010: 526-529. doi: 10.1109/MWSYM.2010.5517507.
- [4] 许群, 王云香, 刘少斌, 等. 飞行器共形天线技术综述[J]. 现代雷达, 2015, 37(9): 50-54. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2015.09.012.
XU Qun, WANG Yunxiang, LIU Shaobin, et al. An overview on conformal antenna technology for aircraft[J]. *Modern Radar*, 2015, 37(9): 50-54. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2015.09.012.
- [5] 张玉洁, 龚书喜, 王文涛, 等. 基于改进遗传算法的非规则共形阵的研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(4): 689-695. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2010.04.014.
ZHANG Yujie, GONG Shuxi, WANG Wentao, et al. Research on irregular conformal array using improved genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2010, 25(4): 689-695. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2010.04.014.
- [6] 李杰然, 许稼. 共形阵列信号 DOA 和极化状态联合估计研究[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(2): 159-163. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2015.02.010.
LI Jieran and XU Jia. Joint Estimation of 2D-DOA and polarization based on conformal array[J]. *Radar Science and Technology*, 2015, 13(2): 159-163. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2015.02.010.
- [7] GROMEK D, KULPA K, and SAMCZYŃSKI P. Experimental results of passive SAR imaging using DVB-T illuminators of opportunity[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(8): 1124-1128. doi: 10.1109/LGRS.2016.2571901.
- [8] 王志纲, 董鹏曙, 吴琼. 飞艇载无源雷达的外辐射源选择[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(1): 8-12. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2014.01.002.
WANG Zhigang, DONG Pengshu, and WU Qiong. Study on selection of external transmitters for airship-borne passive radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2014, 12(1): 8-12. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2014.01.002.
- [9] 李烈辰. 变换域稀疏压缩感知雷达成像技术研究[D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2015.
LI Liechen. Research on imaging technology of transform domain sparse compressed sensing radar[D]. [P.h.dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [10] 杨波. 一种设计组合巴克码脉冲压缩旁瓣抑制滤波器新方法[J]. 现代雷达, 2001, 23(5): 41-45. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2001.05.012.
YANG Bo. A new method for designing range-sidelobe suppression filter for combined barker code[J]. *Modern Radar*, 2001, 23(5): 41-45. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2001.05.012.
- [11] 李烈辰, 李道京, 黄平平. 基于变换域稀疏压缩感知的艇载稀疏阵列天线雷达实孔径成像[J]. 雷达学报, 2016, 5(1): 109-117. doi: 10.12000/JR14159.
LI Liechen, LI Daojing, and HUANG Pingping. Airship sparse array antenna radar real aperture imaging based on compressed sensing and sparsity in transform domain[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(1): 109-117. doi: 10.12000/JR14159.
- [12] 鄢社锋, 马远良. 传感器阵列波束优化设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 169-170.
YAN Shefeng and MA Yuanliang. Design and Application of Sensor Array Beam Optimization[M]. Beijing: Science Press, 2009: 169-170.
- [13] 李道京, 侯颖妮, 滕秀敏, 等. 稀疏阵列天线雷达技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 100-120.
LI Daojing, HOU Yingni, TENG Xiumin, et al. Sparse Array Antenna Radar Technology and Application[M]. Beijing: Science Press, 2014: 100-120.
- [14] 滕秀敏, 李道京. 艇载共形稀疏阵列天线雷达成像研究[J]. 电波科学学报, 2012, 27(4): 644-649. doi: 10.13443/j.cjors.2012.04.015.
TENG Xiumin and LI Daojing. Airship conformal sparse array radar imaging[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(4): 644-649. doi: 10.13443/j.cjors.2012.04.015.
- [15] 李道京, 滕秀敏, 潘舟浩. 分布式位置和姿态测量系统的概念与应用方向[J]. 雷达学报, 2013, 2(4): 400-405. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.13086.
LI Daojing, TENG Xiumin, and PAN Zhouhao. The concept and applications of distributed POS[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(4): 400-405. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.13086.
- [16] SKOLIN M I, 王军, 林强, 等译. 雷达手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 297-301.

周建卫: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为外辐射源雷达系统.
李道京: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达系统和雷达信号处理.
田 鹤: 女, 1991年生, 博士生, 研究方向为稀疏阵列天线雷达3维成像技术.
潘 洁: 女, 1977年生, 高级工程师, 博士生, 研究方向为稀疏阵列雷达系统.
胡 焯: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理.