

# 舰载圆形阵列天线抑制相干干扰的性能研究

于 波<sup>1,2</sup> 杨莘元<sup>1</sup> 杨 林<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 大庆石油学院 电子工程系, 黑龙江 大庆 163318)

**摘要** :自适应天线阵常常工作于存在相干干扰的背景下,运用空间平滑技术的波束形成方法可抑制相干干扰,但降低了阵列孔径利用率且不能直接用于圆形阵列。这里对一种基于预正交处理思想的波束形成方法的性能进行了分析,表明其不仅能有效抑制相干干扰,而且充分利用了阵列孔径,在实际应用时可采用阵列移位方式来实现。计算机仿真实验表明,该方法不仅可以在有很大随机移位误差的情况下有效工作,而且在阵元存在幅相误差时比常规方法更有效,所得结论有利于推动该技术走向工程实际。

**关键词** 均匀圆阵 ;自适应天线 ;相干干扰 ;波束形成

中图分类号 :TN971.3 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7043(2004)05-0597-04

## Study of the performance of suppressing the coherent interference based on shipborne uniform circular array

YU Bo<sup>1,2</sup>, YANG Xin-yuan<sup>1</sup>, YANG Lin<sup>1</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China 2. Department of Electronics Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China)

**Abstract** :An adaptive antenna usually works in an environment where coherent interferences exist. The approach of spatial smoothing is often applied to suppress coherence interference, but it has a lower utilization ratio of arrays' aperture and cannot be simply used in uniform circular array. An analysis was done on the performance of an orthogonal processing algorithm and showed that this approach can suppress the coherence interference and has higher utilization ratio of arrays' aperture. It can be achieved by moving the position of the circular array in practice. The method is effective in dealing with displacement error and it can work more effectively than the conventional arithmetic in dealing with amplitude perturbation and phase perturbation as verified by computer simulation.

**Key words** :uniform circular array ; adaptive antenna ; coherent interference ; beamforming

在自适应数字波束形成(ADBF)技术中,相对于讨论得比较深入的均匀线阵列,均匀圆阵有其特有的优点,如圆阵可在360°内进行全方位波束扫描和抗干扰“零陷”形成,在任何方向有相同的阵列孔径,天线阵列所占尺寸小等。圆阵的这些特点尤其适用于军用舰船这样的实际环境。在实际应用情况下,由于多路径效应、智能干扰等问题的存在,阵列天线常常会工作于存在相干干扰的背景之中,利用空间平滑技术<sup>[1,2]</sup>来抑制相干干扰是常用的方法,但这

是以降低阵列孔径利用率代价的,且由于均匀圆阵的导向矩阵比均匀线阵复杂得多,空间平滑技术不能直接用于圆阵。虽然通过预处理方法可以将均匀圆阵由阵元空间转换为模式空间<sup>[3,4]</sup>中的虚拟均匀线阵,再利用空间平滑技术进行波束形成,可达到抑制相干干扰的目的,但在空间转换过程中又降低了阵列孔径利用率。文献[5]提出了一种基于预正交处理思想的抗相干干扰的波束形成方法,在实际应用时,可将圆阵作等间隔移动以实现去相干处理,称之为移位平滑技术,利用该技术进行波束形成不仅可以抑制相干干扰,还不降低阵列孔径利用率,通过对性能特点的分析,提出了应用解决方案,并对存在阵元幅相误差和移位随机误差情况下的波束形成

性能进行了计算机仿真,研究结论有利于推动该技术走向工程实际应用。

## 1 阵列模型和移位平滑算法

考虑  $M$  元的窄带均匀间隔圆天线阵,远场平面波信号包括 1 个期望信号和  $q$  个干扰信号,则阵列接收到的信号可表示为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{AS}(t) + \mathbf{N}(t). \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{A} = [a(\theta_0) \ a(\theta_1) \ \dots \ a(\theta_q)]$ ,  $\mathbf{S}(t) = [S_0(t), S_1(t), \dots, S_q(t)]^T$ ,  $S_i(t)$  为信号的复包络。而  $a(\theta_i) = [e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\cos(\theta_i - j_0)} \ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\cos(\theta_i - j_1)} \ \dots \ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\cos(\theta_i - j_{M-1})}]^T$ ,  $i=0, 1, 2$  时分别表示期望信号和  $q$  个干扰信号的导向矢量;  $\mathbf{N}(t)$  为背景噪声, 假设它为空时白噪声与  $\mathbf{S}(t)$  不相关;  $\varphi_k = \frac{2\pi k}{M}$ ,  $k=0, 1, \dots, M-1$ 。

阵列输出的协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = \mathbb{E}[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] = \mathbf{AR}_S\mathbf{A}^H + \sigma^2 I. \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{R}_S$  为信号复包络的相关矩阵;  $\sigma^2$  是噪声功率;  $I$  为单位阵。在实际工程实现中, 是用有限次快拍数据  $\mathbf{X}(t_i)$  来估计相关矩阵  $\mathbf{R}$ 。

利用线性最小方差准则(LCMV)算法, 得到最优权矢量

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \alpha \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_d). \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为一常数;  $\mathbf{a}(\theta_d)$  为均匀圆阵下的期望信号导向矢量, 即  $\mathbf{a}(\theta_d) = [e^{j\beta\cos(\theta_d - \varphi_0)} \ e^{j\beta\cos(\theta_d - \varphi_1)} \ \dots \ e^{j\beta\cos(\theta_d - \varphi_q)}]^T$ ;  $\theta_d$  为期望信号方向。

当干扰信号中包含有与期望信号相干的信号时,  $\mathbf{R}_S$  不是满秩的, 这时用式(3)得到的最优权向量进行波束形成已不能对相干干扰形成有效的零陷。为实现对相干干扰的有效抑制, 必须在不破坏圆阵的信号导向矩阵结构的前提下恢复  $\mathbf{R}_S$  的满秩性。由文献[5]可知, 基于预正交处理的方法可达到去相关的目的, 如图 1, 这种预处理方法在实际应用时可通过阵列移位来实现, 故称其为移位平滑技术。

当把圆阵进行  $M-1$  次间距为  $d$  的等间隔移位后, 见图 1, 各次得到的阵列输出记为  $\mathbf{X}_k$ , 则

$$\mathbf{X}_k(t) = \sum_{i=0}^q S_i(t) e^{\frac{2\pi k d}{\lambda} \cos \theta_i} a(\theta_i) + N = \sum_{i=0}^q S_i(t) e^{jk\Phi_i} a(\theta_i) + N_k(t). \quad (4)$$

式中:  $k=0, 1, \dots, M-1$ ;  $\Phi_i = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_i$ ,  $i=0, 1, \dots, q$ 。

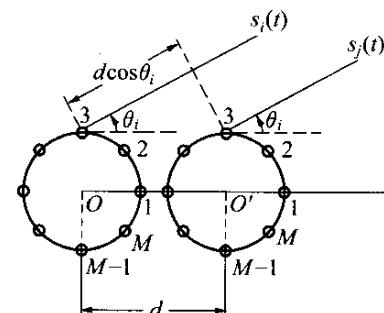


图 1 圆阵移位的后阵元关系图

Fig. 1 The relationship about moving circular array

令  $\mathbf{U}_k = \mathbf{U}_1^k = \text{diag}[e^{jk\Phi_0} \ e^{jk\Phi_1} \ \dots \ e^{jk\Phi_{M-1}}]$ , 式(1)又可表示为

$$\mathbf{X}_k(t) = \mathbf{AU}_k \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}_k(t) = \mathbf{AS}_k(t) + \mathbf{N}_k(t), \quad (5)$$

则有

$$\mathbf{R}_k = \mathbb{E}[\mathbf{X}_k(t)\mathbf{X}_k^H(t)] = \mathbf{AU}_k \mathbf{R}_S \mathbf{U}_k^H \mathbf{A}^H + \sigma^2 I, \quad (6)$$

从而得到移位平滑后的相关矩阵

$$\bar{\mathbf{R}} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \mathbf{R}_k = \mathbf{A} \bar{\mathbf{R}}_S \mathbf{A}^H + \sigma^2 I. \quad (7)$$

考虑最不利情况, 即  $q$  个干扰均为相干干扰, 不妨设  $\mathbf{S}(t) = [s_0, p_1 s_0, \dots, p_q s_0]^T$ ,

$$\text{则 } \bar{\mathbf{R}}_S = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \mathbf{U}_k \cdot \mathbb{E}[\mathbf{S}(t)\mathbf{S}(t)^H] \mathbf{U}_k^H = \frac{|s_0|^2}{M} \mathbf{QQ}^H. \quad (8)$$

式中:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & p_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & p_q \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & e^{j\Phi_0} & \dots & e^{j(M-1)\Phi_0} \\ 1 & e^{j\Phi_1} & \dots & e^{j(M-1)\Phi_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{j\Phi_q} & \dots & e^{j(M-1)\Phi_q} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

当  $\Phi_i \neq \Phi_j + 2k\pi$  ( $k = \pm 1, \pm 2, \dots, i, j = 0, 1, \dots, q$ ;  $i \neq j$ ) 时, 由式(9)可知  $\text{rank} \mathbf{Q} = \text{rank} \bar{\mathbf{R}}_S = q+1$ , 利用式(3)得到的最优权矢量进行波束形成, 可实现对相干干扰地有效抑制。

波束形成是根据  $M$  个阵列输出的相关矩阵的平均, 在实现抗相干干扰的同时不降低整个天线阵列孔径的利用率。

针对以一定的速度  $v$  航行的军用舰船, 设想可按如下步骤进行波束形成:

1) 在  $t_0$  时刻得到阵列输出的一定采样快拍数的数据组, 并得到输出相关矩阵  $\mathbf{R}_0$ ;

2) 每间隔时间  $\Delta t$  ( $d = v \cdot \Delta t$ ) 取得阵列输出数据, 即在  $t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, \dots, t_0 + (M-1)\Delta t$  时刻分别得到相关矩阵  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_{M-1}$ ;

3) 由  $\bar{\mathbf{R}} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \mathbf{R}_k$ , 从而在  $t_0 + (M-1)\Delta t$  时刻利用  $\bar{\mathbf{W}}_{\text{LCMV}}(\theta_0) = \alpha \bar{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)$  进行波束形成, 即  $\mathbf{y}(\theta_0) = \mathbf{X}^T \bar{\mathbf{W}}_{\text{LCMV}}(\theta_0)$ , 改变  $\theta_0$ , 进而实现电子波束扫描;

4) 在  $t_0 + M\Delta t$  时刻得到  $\mathbf{R}_M$ , 利用  $\bar{\mathbf{R}} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \mathbf{R}_k$ ,

其他同步步骤 3).

需要说明的是, 移位平均技术是以下面的情况为前提的:

1) 接收的为远场平面波信号, 来波方向角不会突变;

2) 天线阵能在很短的时间内完成移位.

在实际应用中要求, 与波长相比拟的移位距离较短, 从而移位在很短的时间即可完成, 目标距离较远且不会因为短时间移位而使来波角度有所改变.

下面针对移位平滑算法在相干背景、存在移位误差、存在阵元幅相误差等情况下的性能进行计算机仿真分析.

## 2 计算机仿真分析

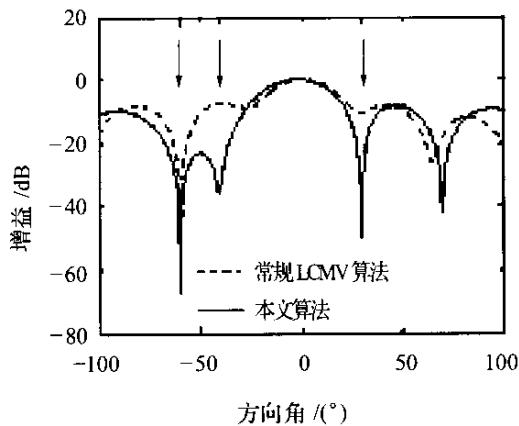


图 2 相干背景下的自适应方向图

Fig. 2 The adaptive pattern under Coherent interference

以下的实验选取八元均匀圆阵, 期望信号来自  $0^\circ$ , 信噪比 SNR 为 0 dB, 干燥比 INR 均为 30 dB, 快拍数为 128, 移位距离  $d = \lambda/2$ . 移位平滑前(常规)后波束形成均采用 LCMV 算法.

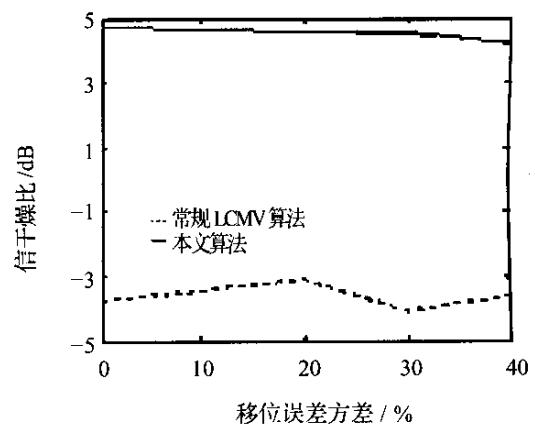


图 3 相干背景下移位误差对信干噪比影响

Fig. 3 SINR influenced by moving error

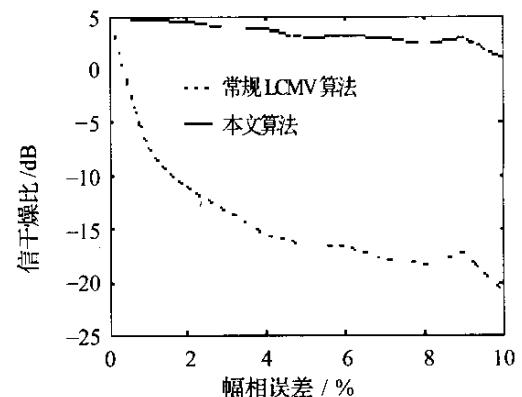


图 4 不相关背景下幅相误差对信干噪比影响

Fig. 4 SINR influenced by amplitude and phase errors under uncorrelated interference

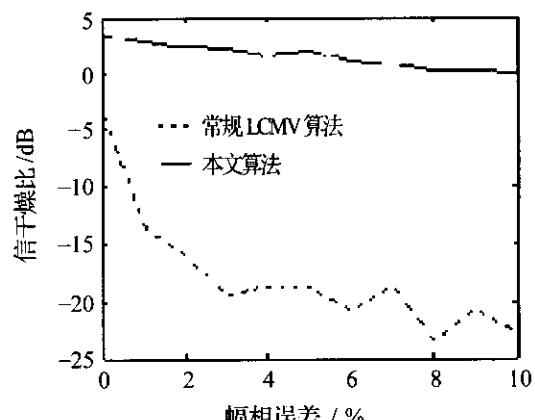


图 5 相干背景下幅相误差对信干噪比影响

Fig. 5 SINR influenced by amplitude and phase errors under coherent interference

图 2 为相干背景下的自适应方向图, 两个相干

干扰信号来自  $-40^\circ$ 、 $30^\circ$ ,一个不相关干扰来自  $-60^\circ$ . 可以看出移位平滑算法在对不相关干扰形成较深零陷的同时,能有效地抑制相干干扰.

图 3 为在相干背景下,信干噪比随移位误差方差  $Ed\%$ (服从高斯分布)的变化图,两相干干扰信号来自  $30^\circ$ 、 $-40^\circ$ ,一个不相关干扰来自  $-60^\circ$ ,常规算法根据每次的初始圆阵数据得到的权值计算. 曲线为 30 次独立实验结果的平均值. 从图中可以看出,信干噪比随移位误差方差的增大下降较缓慢,在移位误差方差为 40% 时,波束形成器对相干干扰的抑制能力仍然较强,波束形成器仍能有效工作. 由于存在相干干扰常规算法已失效.

图 4 为不相关背景下输出信干噪比随阵元随机幅度和相位误差的变化图,假设幅、相误差的方差都为  $Er\%$ ,服从高斯分布,与信源到达方向无关. 3 个与期望信号不相关的干扰来自  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $-40^\circ$ . 曲线为 30 次独立实验的平均结果. 可以看出移位平滑算法比常规算法对幅相误差有更强的稳健性.

图 5 为相干背景下输出信干噪比随阵元随机幅度和相位误差的变化图. 2 个相干干扰信号来自  $30^\circ$ 、 $-40^\circ$ ,1 个不相关干扰来自  $60^\circ$ ,其他同图 4. 在幅、相误差为 10% 时,移位平移算法的输出信干噪比下降到 0 dB,此时对相干干扰仍有一定抑制作用.

### 3 结束语

圆阵移位平滑波束形成方法可以在不降低阵列孔径利用率的同时,在相干干扰方向形成较深的零陷,并且在有一定的移位误差情况下,仍能对干扰进行有效抑制. 阵元存在幅相误差情况时,无论在相干还是不相关干扰背景下,均较常规算法有更好的性能. 该波束形成技术比较适用于舰载圆阵的实际情况. 但需要说明的是该方法由于是采用移位平滑技术,在波束形成时需要考虑前面  $M - 1$  个时刻的阵元输出数据,要求信源环境不存在突变,这使得该方

法存在一定的局限性,需要进一步完善.

### 参考文献:

- [1] SHAN T J, KALLATH T. Adaptive beamforming for coherent signals and interference[J]. IEEE Trans on Assp, 1985, 33(6): 527–536.
- [2] 吴海菁, 张莉, 吴瑛. 相干信号源的空间平滑算法及其改进[J]. 信息工程大学学报, 2001, 2(4): 31–34.  
WU Hai-jing, ZHANG Li, WU Ying. Space smooth algorithm for the calculation of a coherent signal source and its improvement[J]. Transaction of Information Engineering University, 2001, 2(4): 31–34.
- [3] SWINGLER N, DAVIS S. Spatial harmonic interpolation and extrapolation for use with circular arrays[J]. IEEE PROCCSP '91, 1991: 138–141.
- [4] 黄浩学, 吴嗣亮. 基于均匀圆阵的信号源 DOA 和多普勒频率估计算法[J]. 电子学报, 2001, 29(5): 619–621.  
HUANG Hao-Xue, WU Si-Liang. An algorithm for estimating DOA and Doppler frequency of signals incident on uniform circular array[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(5): 619–621.
- [5] 杨超. 自适应圆阵中的干扰抑制和互耦补偿[J]. 中国空间科学技术, 1998, 24(4): 31–35.  
YANG Chao. Coherent interference suppression and mutual coupling compensation in adaptive circular array[J]. Chinese Space Science and Technology, 1998, 24(4): 31–35.
- [6] MATHEWS C P, ZOLTOWSKI M D. Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular array[J]. IEEE Trans on SP, 1994, 42(9): 2395–2407.
- [7] VIBERG M, OTTERSTEN B. Sensor array processing based on subspace fitting[J]. IEEE Trans SP, 1991, 39(5): 1110–1121.
- [8] YANG C, RUAN Y Z. The transient performance of adaptive with mutual coupling and two correlated sources present [A]. International Symposium on Radio Propagation[C]. Beijing, 1993.

[责任编辑 陈峰]

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>