

## 一种基于共形阵的自适应单脉冲测角方法

赵英俊<sup>1,2</sup>, 李荣锋<sup>1</sup>, 王永良<sup>1</sup>, 刘维建<sup>1</sup>

(1. 空军预警学院兵器运用工程军队重点实验室, 武汉 430019; 2. 海军工程大学电子工程学院, 武汉 430019)

**摘要:** 针对主瓣干扰背景下, 当共形阵采用常规自适应单脉冲方法测角时, 其单脉冲比曲线严重失真, 导致测角精度严重下降的问题, 提出了一种基于共形阵的自适应单脉冲测角方法。该方法首先对阵列进行常规自适应和波束形成, 得到阵列和波束输出; 然后通过施加单脉冲比约束求取自适应差波束权矢量, 从而形成阵列差波束输出; 最后利用输出的和、差波束实现测角。仿真结果表明, 和常规方法相比, 该方法能在抑制主瓣干扰的同时, 较好地保证共形阵对目标方位角、俯仰角的测角精度。

**关键词:** 共形阵; 自适应波束形成; 单脉冲测角; 主瓣干扰; 干扰抑制

**中图分类号:** V271.4; TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)07-0015-04

## Adaptive Monopulse Angle Measurement for Conformal Array

ZHAO Yingjun<sup>1,2</sup>, LI Rongfeng<sup>1</sup>, WANG Yongliang<sup>1</sup>, LIU Weijian<sup>1</sup>

(1. Key Research Laboratory, Wuhan Early Warning Institute of Engineering, Wuhan 430019, China;

2. College of Electronic Engineering, Naval Engineering University, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** When conformal antennas array perform angle measurement based on the approach of conventional adaptive monopulse, the curve of monopulse ratio may be seriously distorted if there is mainlobe jamming. Consequently, the precision of the angle measurement is poor. In this paper, we propose a method of adaptive monopulse angle measurement for conformal antennas array. The conventional adaptive sum beam is formed first. Then monopulse ratio restraint is posed, and the adaptive difference beam is formed. Finally, the outputs of the sum beam and difference beam are used to measure the angle. Simulation demonstrated that the proposed method can suppress the mainlobe jamming and guarantee good measurement precision of azimuth and elevation angles.

**Key words:** conformal antennas array; adaptive beamforming; monopulse angle estimation; mainlobe jamming; interference suppression

### 0 引言

传统的自适应单脉冲测角技术具有在计算中不涉及接收信号相位, 其角度输出稳定性仅和幅度有关的显著优点, 现已被广泛采用<sup>[1]</sup>。但当外界环境存在干扰, 特别是主瓣干扰时, 自适应单脉冲测角技术将受到严重影响, 结果将导致测角精度降低。因此, 针对主瓣干扰环境下的自适应单脉冲测角技术, 国内外进行了大量研究。其中, 文献[2]提出了基于线阵的3种最大似然单脉冲表达式, 文献[3]提出了基于最小均方误

差的目标方向搜索方法, Nickel把文献[2]中的方法推广到任意面阵和立体阵中<sup>[4]</sup>, 文献[5]提出一种对旁瓣干扰和主瓣干扰分别抑制的两级自适应单脉冲方法, 文献[6]提出了一种在主瓣干扰条件下的自适应波束形成方法。

上述文献主要是针对线阵或面阵开展研究的, 然而针对共形阵的研究, 公开发表的文献还很少见。共形阵是指某一表面共形的天线或阵列<sup>[7]</sup>, 例如飞机上安装的阵列, 它具有以下优点: 可有效减小载机反射截面积, 在大大降低载机负荷的前提下提供与载机外形相一致的空气动力外形, 同时可显著增大有效发射孔径<sup>[8]</sup>。但是当存在主瓣干扰时, 将现有常规自适应和差波束单脉冲测角方法<sup>[5]</sup>用于共形阵还存在问题, 那就是单脉冲比曲线会严重失真, 导致测角精度下降。为了提高共形阵在主瓣干扰存在条件下的测角精度,

收稿日期: 2012-11-26

修回日期: 2013-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(60736009; 60901071)

作者简介: 赵英俊(1984—), 男, 黑龙江海伦人, 博士生, 研究方向为自适应阵列信号处理。

本文提出了一种基于共形阵的自适应单脉冲测角方法。该方法通过对方位、俯仰和差波束施加约束,抑制主瓣干扰并保持和差单脉冲比曲线不失真,从而在保证测角精度的同时,实现对目标方位、俯仰角的估计。和常规方法相比,本文方法能够在抑制主瓣干扰的同时,较好地保证共形阵的测角精度。

## 1 共形天线阵的阵列模型

假设空间任意两个阵元,其中一个为参考阵元(位于原点),另一个阵元的坐标为 $(x, y, z)$ 。空间任意两阵元的几何关系如图1所示,图中:“ $\times$ ”表示阵元; $\theta$ 、 $\varphi$ 分别为来波入射阵元的方位角和俯仰角。

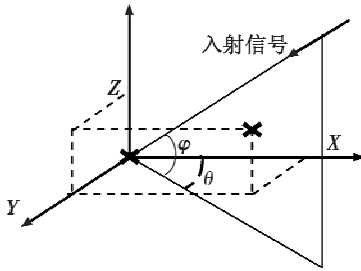


图1 空间任意2阵元的几何关系

Fig. 1 Geometric relation of two arbitrary antennae

由几何知识可以推导出两阵元间的波程差为

$$\tau = \frac{1}{c}(x \cos \theta \cos \varphi + y \sin \theta \cos \varphi + z \sin \theta) \quad (1)$$

式中, $c$ 代表光速,如果已知阵元间的延迟表达式 $\tau$ ,就很容易得出特定空间阵列导向矢量或阵列流型。下面以一个简化的共形阵模型为例进行说明,如图2所示。

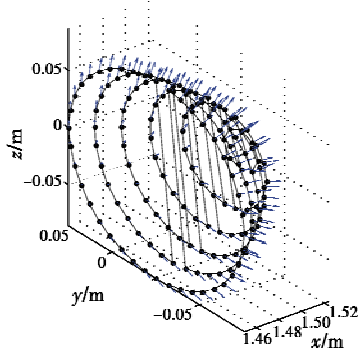


图2 共形阵模型

Fig. 2 The model of conformal array

由于共形阵中每个阵元的坐标 $(x, y, z)$ 已知,因此根据式(1)可求出两阵元间的波程差,从而可得到共形阵的导向矢量。考虑 $N$ 元共形阵,且假设阵元均为各向同性阵元,远场处有 $P$ 个窄带干扰以平面波入射,波长为 $\lambda$ ,到达角度分别为 $(\theta_k, \varphi_k)$ , $k=1, 2, \dots, P$ ,同时假设干扰、噪声互不相关,且各通道噪声为相互独立的零均值高斯白噪声。

阵列接收信号可表示为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t). \quad (2)$$

## 2 提出的方法

本文提出方法的原理如下:首先对阵列输入数据进行常规自适应方位和波束形成,然后对方位单脉冲比曲线施加约束,在满足抑制主瓣干扰的条件下,保持方位单脉冲比曲线不失真,从而形成方位差波束输出,最后将自适应方位差波束与自适应方位和波束相比,得到目标的方位单脉冲比,并将该单脉冲比和方位静态单脉冲比曲线相比较,从而实现对目标方位角的估计。同理,可实现对目标俯仰角的估计。本文所提方法的原理如图3所示。

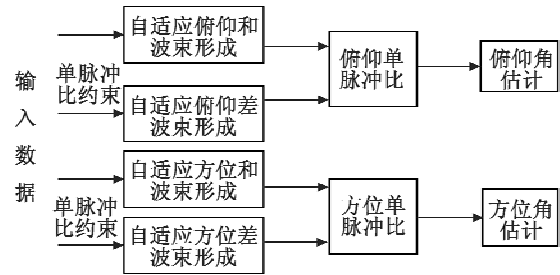


图3 共形阵自适应单脉冲测角方法原理图

Fig. 3 Principle of the adaptive monopulse angle measurement for conformal array

自适应方位和、差波束分别为

$$\Sigma_A(\theta, \varphi_0) = \mathbf{w}_{\Sigma_A}^H \mathbf{a}(\theta, \varphi_0) \quad (3)$$

$$\Delta_A(\theta, \varphi_0) = \mathbf{w}_{\Delta_A}^H \mathbf{a}(\theta, \varphi_0) \quad (4)$$

式中: $(\theta_0, \varphi_0)$ 为波束中心指向; $\mathbf{w}_{\Sigma_A}$ 和 $\mathbf{w}_{\Delta_A}$ 分别为方位自适应和、差权; $\mathbf{a}(\theta, \varphi_0)$ 为俯仰角一定时的方位导向矢量,其表达式为

$$\mathbf{a}(\theta, \varphi_0) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(x \cos \theta \cos \varphi_0 + y \sin \theta \cos \varphi_0 + z \sin \theta)} \quad (5)$$

常规方法的方位自适应和权为

$$\mathbf{w}_{\Sigma_A} = \mathbf{R}_A^{-1} \mathbf{w}_{\Sigma_A} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{R}_A = \sum_{k=1}^M \delta_k^2 \mathbf{a}(\theta_k, \varphi_0) \mathbf{a}^H(\theta_k, \varphi_0) + \delta_n^2 \mathbf{I}$ , $\delta_k^2$ 为第 $k$ 个干扰的功率; $M$ 为干扰的个数; $\mathbf{w}_{\Sigma_A}$ 为静态和权。

常规方法的方位自适应差权为

$$\mathbf{w}_{\Delta_A} = \mathbf{R}_A^{-1} \mathbf{w}_{\Delta_A} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{w}_{\Delta_A}$ 为静态差权。

定义方位静态单脉冲比为

$$f_{A_s} = \frac{\mathbf{w}_{\Delta_A}^H \mathbf{a}(\theta, \varphi_0)}{\mathbf{w}_{\Sigma_A}^H \mathbf{a}(\theta, \varphi_0)} \quad (8)$$

常规方法的自适应单脉冲比为

$$f_a(\theta) = \frac{\mathbf{w}_{\Delta_A}^H \mathbf{a}(\theta, \varphi_0)}{\mathbf{w}_{\Sigma_A}^H \mathbf{a}(\theta, \varphi_0)} \quad (9)$$

虽然常规方法能够抑制掉主瓣干扰,但是会造成方位自适应单脉冲比曲线失真,从而严重破坏了共形

阵单脉冲测角性能。为了解决这个问题,本文提出了一种基于共形阵的自适应单脉冲测角方法,该方法保持方位自适应和权不变,在计算方位自适应差权时,对单脉冲施加约束,这样就可以在抑制主瓣干扰的同时保持单脉冲比曲线不失真。在方位静态单脉冲比曲线的线性区域和非线性区域各选取两个对称的点作为约束点,保持单脉冲比曲线的斜率不变,同时使干扰抑制后的方位差波束在主波束中心指向 $(\theta_0, \varphi_0)$ 处方向图增益为0,因此方位自适应单脉冲比满足

$$f_{a_s}((\theta_0, \varphi_0) \pm (\Delta\theta, \varphi_0)) = \frac{\Delta_A(\theta \pm \Delta\theta, \varphi_0)}{\Sigma_A(\theta \pm \Delta\theta, \varphi_0)} = \pm k_1(\Delta\theta, \varphi_0) \quad (10)$$

式中: $((\theta_0, \varphi_0) \pm (\Delta\theta, \varphi_0))$ 为方位静态单脉冲比曲线线性区域内两个对称的约束点; $k_1$ 为方位静态单脉冲比曲线线性区域的斜率。约束点处的方位和波束输出值 $\Sigma_A(\theta \pm \Delta\theta, \varphi_0)$ 与方位差波束输出值 $\Delta_A(\theta \pm \Delta\theta, \varphi_0)$ 分别为

$$\Sigma_A(\theta \pm \Delta\theta, \varphi_0) = \mathbf{w}_{\Sigma_A}^H \mathbf{a}(\theta \pm \Delta\theta, \varphi_0) \quad (11)$$

$$\Delta_A(\theta \pm \Delta\theta, \varphi_0) = \mathbf{w}_{\Delta_A}^H \mathbf{a}(\theta \pm \Delta\theta, \varphi_0) \quad (12)$$

在静态单脉冲比曲线的非线性区域取两个约束点 $((\theta_0, \varphi_0) \pm (\Delta\theta_1, \varphi_0))$ ,其对应的方位自适应单脉冲比应满足

$$f_{a_s}((\theta_0, \varphi_0) \pm (\Delta\theta_1, \varphi_0)) = \frac{\mathbf{w}_{\Delta_A}^H \mathbf{a}(\theta \pm \Delta\theta_1, \varphi_0)}{\mathbf{w}_{\Sigma_A}^H \mathbf{a}(\theta \pm \Delta\theta_1, \varphi_0)} = \pm k_2 \quad (13)$$

式中, $k_2$ 为约束点处对应的方位静态单脉冲比的绝对值。

将式(10)和式(13)以及方位差波束在主波束中心指向 $(\theta_0, \varphi_0)$ 处方向图增益为0的约束条件写成矩阵形式,则可以表示为

$$\mathbf{w}_{\Delta_A}^H \mathbf{C}_A = \mathbf{f}_A \quad (14)$$

其中约束矩阵为

$$\mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{a}((\theta_0, \varphi_0) + (\Delta\theta_1, \varphi_0)) \\ \mathbf{a}((\theta_0, \varphi_0) + (\Delta\theta, \varphi_0)) \\ \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0) \\ \mathbf{a}((\theta_0, \varphi_0) - (\Delta\theta, \varphi_0)) \\ \mathbf{a}((\theta_0, \varphi_0) - (\Delta\theta_1, \varphi_0)) \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

约束矩阵对应的约束响应为

$$\mathbf{f}_A = \begin{bmatrix} k_2 \mathbf{w}_{\Sigma_A}^H \mathbf{a}((\theta_0, \varphi_0) + (\Delta\theta_1, \varphi_0)) \\ k_1 \mathbf{w}_{\Sigma_A}^H \mathbf{a}((\theta_0, \varphi_0) + (\Delta\theta, \varphi_0)) \Delta\theta \\ 0 \\ -k_1 \mathbf{w}_{\Sigma_A}^H \mathbf{a}((\theta_0, \varphi_0) - (\Delta\theta, \varphi_0)) \Delta\theta \\ k_2 \mathbf{w}_{\Sigma_A}^H \mathbf{a}((\theta_0, \varphi_0) - (\Delta\theta_1, \varphi_0)) \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

式中, $\mathbf{a}((\theta_0, \varphi_0) \pm (\Delta\theta, \varphi_0))$ 和 $\mathbf{a}((\theta_0, \varphi_0) \pm (\Delta\theta_1, \varphi_0))$ 为约束点处的方位导向矢量。

为了满足以上对差波束施加的约束条件并要求干

扰功率最小化,本文运用拉格朗日乘子法解得方位自适应差权为

$$\mathbf{w}_{\Delta_A} = \mathbf{R}_A^{-1} \mathbf{C}_A (\mathbf{C}_A^H \mathbf{R}_A^{-1} \mathbf{C}_A)^{-1} \mathbf{f}_A \quad (17)$$

综上所述,用解得的方位自适应和、差权对接收到的各阵元数据进行和差波束形成,得到方位目标单脉冲比

$$f_{A_s} = \frac{\mathbf{w}_{\Delta_A}^H \mathbf{X}}{\mathbf{w}_{\Sigma_A}^H \mathbf{X}} \quad (18)$$

将得到的方位目标单脉冲比和方位静态单脉冲比曲线相比较,即可估计出目标的方位角。同理,求解俯自适应和、差权以及估计目标俯仰角的方法和上述求解过程相同,本文不再赘述。

### 3 仿真实验

为了验证本文方法的测角性能,以测目标方位角为例,用均方根误差(RMSE)来衡量测角性能。考虑一个由162个阵元构成的共形阵,阵元间等间距,波束中心指向为 $(90^\circ, 0^\circ)$ ,方位半功率点波束宽度为 $20^\circ$ ,噪声为高斯加性白噪声,在方位主波束内取4个约束点分别为 $(90^\circ \pm 5^\circ)$ 、 $(90^\circ \pm 15^\circ)$ ,主瓣干扰方位指向为 $100^\circ$ 。

图4给出常规方法和本文方法得到的方位自适应单脉冲比曲线。由图4可看出,常规方法得到的方位自适应单脉冲比曲线与静态单脉冲比曲线相比已严重失真,而采用本文方法得到的方位自适应单脉冲比曲线和静态单脉冲比曲线较为接近,同时能够抑制主瓣干扰。

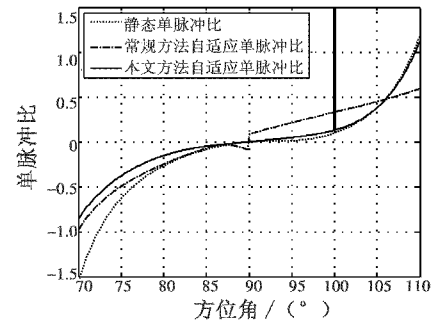


图4 两种方法的方位自适应单脉冲比

Fig. 4 The ratio of adaptive monopulse of the two methods

图5给出了阵列接收的目标信号合成后的信噪比为20 dB,主瓣干扰的干噪比为30 dB时,100次独立实验后,不同角度下两种方法得到的目标方位角估计均方根误差。由图5可以看出,用本文方法得到的测角精度明显高于常规方法,本文方法得到的方位角估计在扫描目标角的大部分范围内测角精度较高,但在主瓣干扰角附近测角精度较差,这是因为该方法在自适应抑制干扰过程中,在主瓣干扰方向形成了零陷,使得主瓣干扰角附近接收的目标信噪比减小,从而导致主瓣干扰处目标角度估计精度下降。

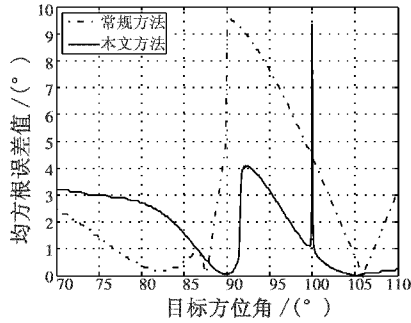


图5 不同角度下方位角估计的均方根误差

Fig.5 The RMSE of azimuth estimation at different angles

图6给出了目标方位指向为 $110^\circ$ 时,100次独立实验后,不同目标信噪比下两种方法得到的目标方位角估计均方根误差随目标信噪比变化的曲线。

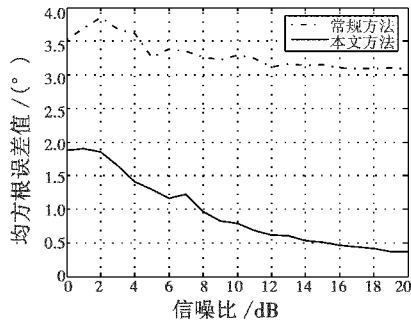


图6 不同信噪比下方位角估计均方根误差

Fig.6 The RMSE of azimuth estimation for different SNR

由图6可以看出,本文方法得到的目标方位角估计均方根误差随目标信噪比增大而迅速减小,而常规方法曲线平稳,说明并没有受到信噪比的影响。这是因为常规方法在抑制主瓣干扰后造成单脉冲比曲线失真,导致信噪比变化对角度估计均方根误差没有影响,因此本文方法优于常规方法。综上所述,本文提出的方法可以较好地解决共形阵在主瓣干扰背景下的测角问题。

## 4 结束语

针对共形阵在主瓣干扰背景下测角的问题,提出了一种基于共形阵的自适应单脉冲测角方法。该方法在抑制主瓣干扰并保持和差单脉冲比曲线不失真的条件下,对共形阵的方位和俯仰分别进行自适应和、差波束形成,从而可以保证对目标方位和俯仰角的估计精度。和常规方法相比,本文方法能够在抑制主瓣干扰的同时,较好地保证共形阵的测角精度。

## 参考文献

- [1] 雷剑梅. 基于单脉冲和自适应天线的数字单脉冲跟踪系统研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
- [2] DAVIS R C, BRENNAN L E, REED I S. Angle estimation with adaptive arrays in external noise field[J]. IEEE Transactions on AES, 1976, 12(2):179-186.
- [3] PAINE A S. Minimum variance monopulse technique for adaptive phased array radar [J]. IEEE Proceeding of Radar, Sonar & Navig, 1998, 145(6):374-380.
- [4] NICKEL U L. Monopule estimation with adaptive arrays[J]. IEE Pro-Radar, Sonar & Navig, 1993, 140(5):303-308.
- [5] YU K B, MURROW D J. Adaptive digital beamforming for angle estimation in jamming [J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2001, 37(2):508-523.
- [6] 李荣锋,王永良,万山虎. 一种在主瓣干扰条件下的自适应波束形成方法[J]. 系统工程与电子技术,2002, 24(7):61-64.
- [7] 崔尧,高晓光,侯新宇,等. 线性阵列天线到柱形共形阵天线的递推计算[J]. 弹箭与制导学报,2011, 31(3):232-234.
- [8] 段克清,谢文冲,王永良,等. 一种稳健的共形阵机载雷达杂波抑制方法[J]. 电子学报,2011,39(6):1321-1326.
- [9] ROGERS R M, FELLOW A. Drag-vs-entry trajectory control to accommodate uncertain winds [R]. AIAA 2002-4538, 2002:1-5.
- [10] BETTS J T. Trajectory optimization in the presence of uncertainty [J]. Journal of the Astronautical Sciences, 2006, 54(2):227-243.
- [11] Common launch acceptability region (CLAR) truth data generator interface control document (ICD) for the CLAR approach (CLAR-A) [R]. SAE aerospace information report AIR5788. US: Society of Automotive Engineers, 2005.
- [12] WILSON S A, VULETICH I J, FLEATHER D J, et al. Guided weapon danger area & safety template generation—A new capability[R]. AIAA-2008-7123, 2008.
- [13] FLEATHER D J, WILSON S A, JOKIC M D, et al. Guided weapon danger area generation—implementing a probabilistic approach [C] //AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006:1-14.

(上接第14页)