

# 基于非均匀子阵的双和/三差通道 同时抑制主副瓣干扰

孙晨伟,陶海红,郭晓双,宋嘉奇

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室,陕西西安 710071)

**摘 要:** 针对相控阵单脉冲雷达体制测角的情况,本文提出了一种降维双和/三差通道自适应同时抑制主、副瓣干扰的算法.该算法利用权值逼近的方法,在非均匀子阵上形成静态和、俯仰差、方位差、双差波束以及指向副瓣干扰方向的和波束,差波束、指向副瓣干扰的和波束作为静态和波束的辅助波束,双差波束作为差波束的辅助波束,根据维纳滤波原理通过对辅助波束的优化加权对消掉和波束中的主副瓣干扰信号及差波束中的主瓣干扰信号,设计出一种新的干扰抑制和测角跟踪算法.所提算法结构简单、测角精度高、能同时抑制主副瓣干扰且鉴角斜率无需修正.仿真实验和性能分析证明了所提算法的有效性和正确性.

**关键词:** 降维;自适应单脉冲;主副瓣干扰;辅助波束;维纳滤波

**中图分类号:** TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)04-0907-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.019

## Mainlobe and Sidelobe Interferences Suppression Based on Two Sum & Three Difference Channels for Irregular Subarrays

SUN Chen-wei, TAO Hai-hong, GUO Xiao-shuang, SONG Jia-qi

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** For adaptive monopulse technology in phased radar system, a novel algorithm for suppressing mainlobe and sidelobe interferences based on two sum and three difference channels is proposed in this paper. Weighting approximation method is adopted to produce weights to form sum, azimuth difference, elevation difference and double difference beams for irregular subarrays. Then azimuth difference, elevation difference beams and sum beam in the direction of sidelobe interference work as the auxiliary beams of static sum beam, while double difference beam works as the auxiliary beam of azimuth difference and elevation difference beams. Based on the principle of Wiener filter, the auxiliary beams are weighted in the optimized way to cancel the mainlobe and sidelobe interferences in the sum beam and mainlobe interference in azimuth difference and elevation difference beams. The proposed algorithm is of simple structure and high accuracy. It is able to simultaneously suppress the mainlobe and sidelobe interferences without distortion of monopulse ratio. Finally, the simulation results and analyses prove the effectiveness of the method.

**Key words:** dimension reduction; adaptive monopulse; mainlobe and sidelobe interferences; auxiliary beam; Wiener filter

### 1 引言

自适应单脉冲测角技术<sup>[1]</sup>因其稳定优良的特性被广泛应用在雷达、测控、通信、导航等电子系统中.在现代日益复杂的电磁环境下,干扰可能同时从主副瓣进入,抑制主瓣干扰形成凹口的同时造成主波

束偏移、增益损失等畸变,从而破坏鉴角曲线的线性,导致测角发生严重偏差.因此,如何在抑制干扰的同时保持良好的测角特性,而且能够实时地抑制主副瓣干扰,是一个亟待解决的关键问题,受到国内外学者的关注.

Applebaum S P 最早提出并设计了零陷主瓣干扰

并保持单脉冲跟踪测角范围内测角鉴角曲线不变的和差四通道系统<sup>[2]</sup>. 在此基础上, Kai-Bor Yu 等人将和差四通道主瓣干扰抑制系统与旁瓣自适应数字波束形成技术(ADBF)相结合, 分步消除主副瓣干扰对单脉冲测角的影响<sup>[3]</sup>. 胡航等人在该模型的基础上对子阵级的 ADBF 加以修正, 改善主瓣保形效果<sup>[4]</sup>. 主瓣干扰抑制及保形技术例如阻塞矩阵预处理(BMP)<sup>[5]</sup>、基于特征投影预处理(EPB)<sup>[6]</sup>与对角加载<sup>[7]</sup>相结合等算法也被广泛应用. 然而以上方法仅针对主瓣干扰的抑制或主副瓣干扰的分步抑制有效.

针对主瓣内外同时存在干扰的情况, 本文提出了一种双和/三差通道同时抑制主副瓣干扰的算法. 该算法将指向副瓣干扰方向的和波束作为静态和波束的辅助波束, 与四通道单脉冲技术相结合, 能同时抑制主副瓣干扰, 减小自适应单脉冲鉴角曲线的畸变, 保证单脉冲测角精度. 最后仿真实验和性能分析验证了所提算法的有效性及其可行性.

## 2 信号模型

### 2.1 平面阵信号模型

由  $M \times L$  个全向阵元构成平面阵分布在如图 1 所示坐标系的平面矩形栅格, 阵元间距设定为信号载波对应的半波长.

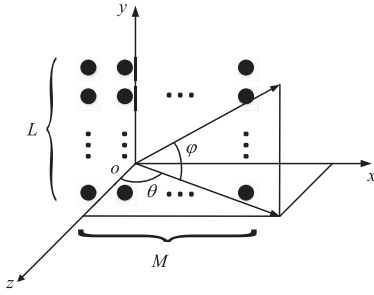


图1 阵列所在直角坐标系

假设一个远场窄带信号的入射角度为  $(\theta_0, \varphi_0)$ , 同时有  $p-1$  个干扰分别从  $(\theta_k, \varphi_k)$ ,  $k=1, 2, \dots, p-1$  方向入射到接收阵列, 其中包含一个主瓣干扰, 信号与噪声不相关. 阵列的接收信号可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) &= \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0) s_0(t) + \sum_{i=1}^{p-1} \mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k) s_i(t) + \mathbf{N}(t) \\ &= \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N}(t), k=1, 2, \dots, p-1 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中,

$$\mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0) = \left[ e^{j2\pi(x_1 u + y_1 v)/\lambda}, e^{j2\pi(x_2 u + y_2 v)/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(x_M u + y_M v)/\lambda} \right]$$

为目标信号导向矢量, 其中  $u = \cos\theta\sin\varphi$ ,  $v = \sin\theta$  分别表示  $(\theta, \varphi)$  方向的单位向量在  $x$  和  $y$  方向的投影, 阵元分布于  $xoy$  面,  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, ML$  为阵元坐标.

### 2.2 非均匀子阵划分及权值优化

通过粒子群优化算法, 以窄波束宽度、低旁瓣为准则优化子阵的划分, 最终得到  $N_{\text{sub}}$  个非均匀子阵. 在子阵划分的基础上, 优化阵元级及子阵权值以均方误差最小的准则逼近全阵参考加权, 以得到逼近全阵直接加权的和差及双差波束方向图<sup>[8]</sup>.  $\mathbf{W}_{\text{sum\_sub}}$  为第二级子阵的和波束加权,  $\mathbf{W}_{\text{ele}}$  为阵元级加权. 等效阵元级幅度加权为

$$\mathbf{W}_{\text{sum}} = \mathbf{T}\mathbf{W}_{\text{sum\_sub}} \odot \mathbf{W}_{\text{ele}} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{T} \in \mathbb{C}^{ML \times N_{\text{sub}}}$  为降维矩阵.

设定全阵参考和波束加权为  $\mathbf{W}_{\text{ref\_sum}}$ , 通过在阵元级 Taylor 加权获得. 优化各级权值使得  $\mathbf{W}_{\text{sum}}$  逼近全阵直接加权, 使逼近方差尽可能小. 由于阵元级衰减器对信号功率的衰减, 须加入约束条件, 数学表达式为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}_{\text{sum\_sub}}, \mathbf{w}_{\text{ele}}} & \|\mathbf{T}\mathbf{W}_{\text{sum\_sub}} \odot \mathbf{W}_{\text{ele}} - \mathbf{W}_{\text{ref\_sum}}\|^2 \\ \text{s. t.} & \|\mathbf{W}_{\text{sum\_sub}}\|_{\infty} \leq 1, \|\mathbf{W}_{\text{ele}}\|_{\infty} \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\|\cdot\|^2$  表示矢量的 2 范数,  $\|\cdot\|_{\infty}$  表示矢量的  $\infty$  范数; 优化子阵和阵元的联合加权, 使其逼近全阵直接加权. 可以通过对权值的对数变换处理将权值的连乘转化为加法运算, 从而将权值求解转化为凸优化<sup>[9]</sup>问题, 采用 yalmip<sup>[10]</sup> 工具箱进行优化求解. 对数转化处理后式(3)变为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}_{\text{sum\_sub}}, \mathbf{w}_{\text{ele}}} & \|\mathbf{w}_{\text{sum\_sub}} + \mathbf{w}_{\text{ele}} - \mathbf{w}_{\text{ref\_sum}}\|^2 \\ \text{s. t.} & \|\mathbf{w}_{\text{sum\_sub}}\|_{\infty} \leq 1, \|\mathbf{w}_{\text{ele}}\|_{\infty} \leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

固定优化后的阵元级幅度加权, 按照同样的逼近优化方法得到子阵级俯仰差、方位差波束和双差波束的幅度加权, 差波束的全阵参考权值通过 Bayliss 加权获得.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}_{\text{diff\_theta\_sub}}, \mathbf{w}_{\text{ele}}} & \|\mathbf{w}_{\text{diff\_theta\_sub}} + \mathbf{w}_{\text{ele}} - \mathbf{w}_{\text{ref\_diff\_theta}}\|^2 \\ \text{s. t.} & \|\mathbf{w}_{\text{diff\_theta\_sub}}\|_{\infty} \leq 1, \|\mathbf{w}_{\text{ele}}\|_{\infty} \leq 1 \\ \min_{\mathbf{w}_{\text{diff\_phi\_sub}}, \mathbf{w}_{\text{ele}}} & \|\mathbf{w}_{\text{diff\_phi\_sub}} + \mathbf{w}_{\text{ele}} - \mathbf{w}_{\text{ref\_diff\_phi}}\|^2 \\ \text{s. t.} & \|\mathbf{w}_{\text{diff\_phi\_sub}}\|_{\infty} \leq 1, \|\mathbf{w}_{\text{ele}}\|_{\infty} \leq 1 \\ \min_{\mathbf{w}_{\text{diff\_both\_sub}}, \mathbf{w}_{\text{ele}}} & \|\mathbf{w}_{\text{diff\_both\_sub}} + \mathbf{w}_{\text{ele}} - \mathbf{w}_{\text{ref\_diff\_both}}\|^2 \\ \text{s. t.} & \|\mathbf{w}_{\text{diff\_both\_sub}}\|_{\infty} \leq 1, \|\mathbf{w}_{\text{ele}}\|_{\infty} \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

测得副瓣干扰的入射角度后构造其子阵级导向矢量作为权矢量, 可由此得指向副瓣干扰的普通和波束.

## 3 双和三差通道同时抑制主副瓣干扰

### 3.1 双和/三差通道系统

在三通道单脉冲系统的基础上增加一个双差通道构成四通道单脉冲系统, 即和、俯仰差、方位差及双差通道<sup>[2]</sup>. 本文中, 全阵的参考和差及双差加权是通过直接加权法获得的, 子阵级和阵元级权联合优化后所得到的四通道幅度加权如图 2 所示.

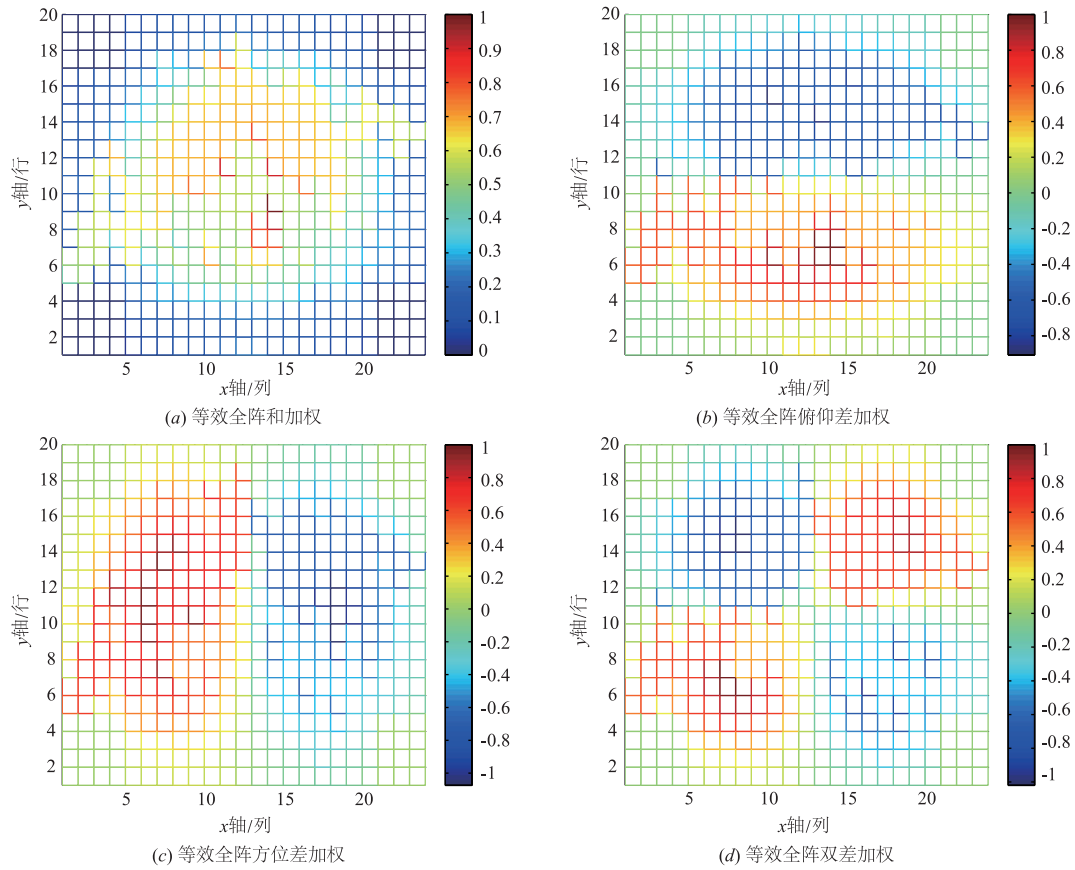


图2 权值逼近优化后和差及双差加权

在此四通道基础上,添加指向副瓣干扰和波束通道即可构造双和/三差通道. 权值逼近后形成的和、差、

双差及指向副瓣干扰的和波束方向图如图 3(a) ~ (e) 所示.

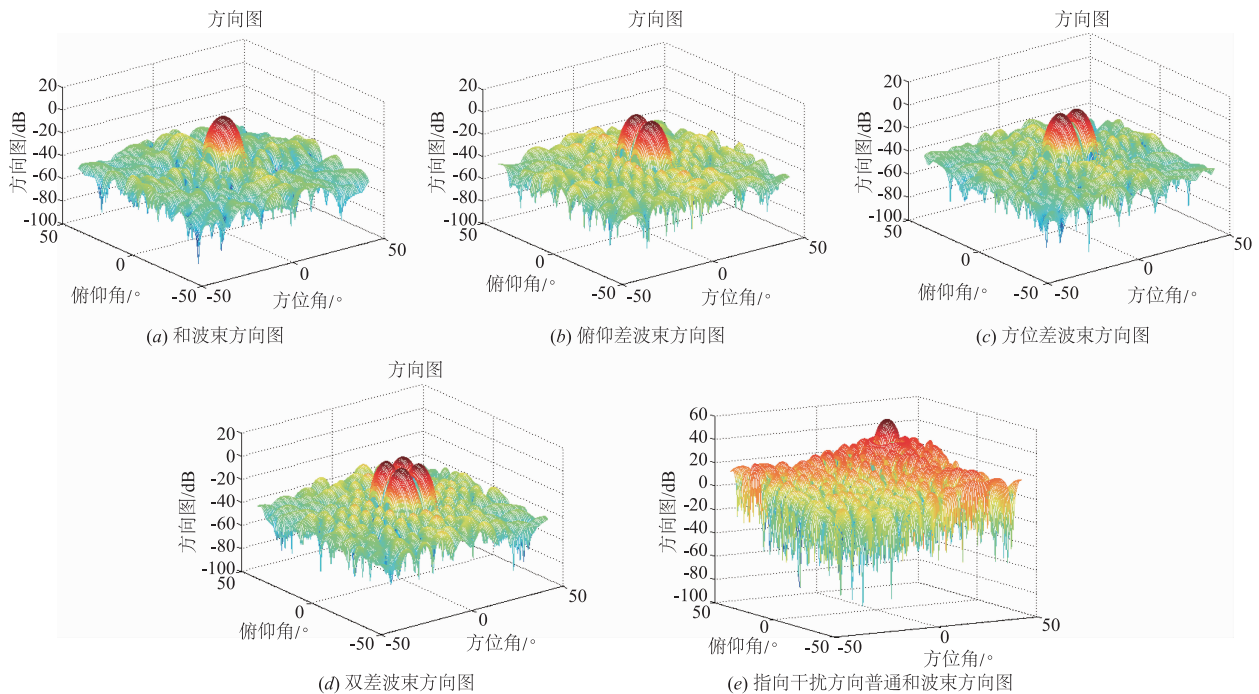


图3 权值逼近后全阵和、差、双差波束及指向副瓣干扰方向普通和波束方向图

### 3.2 构造调整辅助通道输出的自适应权值

在传统的四通道基础上,添加一个指向副瓣干扰的和通道. 利用权值逼近得到的子阵级和阵元级权值形成和、差及双差波束,在子阵级加副瓣干扰的导向矢量权形成指向副瓣干扰和波束. 双和/三差通道自适应单脉冲抗主副瓣干扰算法基本思想是:基于方位和俯仰向相互独立的假设,差通道和指向副瓣干扰的和通道作为和通道的辅助通道,同时双差通道作为差通道的辅助通道. 其出发点是沿一个方向(俯仰或方位)抑制干扰并形成自适应零点,同时沿另一方向(方位或俯仰)保持非自适应的和、差波束,从而在抑制一个方向的主瓣干扰同时,使另一方向的单脉冲比幅保持不变. 指向副瓣干扰的和波束在静态和波束半波束宽度范围内增益很小,对和差鉴角曲线的影响很小.

和、俯仰差、方位差、双差及指向副瓣干扰和波束的五个通道的输出为

$$\begin{aligned} y_{\Sigma}(t) &= \mathbf{w}_{\Sigma}^H \mathbf{x}(t) \\ y_{\Delta_e}(t) &= \mathbf{w}_{\Delta_e}^H \mathbf{x}(t) \\ y_{\Delta_i}(t) &= \mathbf{w}_{\Delta_i}^H \mathbf{x}(t) \\ y_{\Delta_s}(t) &= \mathbf{w}_{\Delta_s}^H \mathbf{x}(t) \\ y_i(t) &= \mathbf{w}_{\Sigma_i}^H \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

和波束、俯仰差波束、方位差波束和双差波束的方向性函数为

$$\begin{aligned} F_{\Sigma}(u, v) &= f_{\Sigma_e}(u) f_{\Sigma_e}(v) \\ F_{\Delta_e}(u, v) &= f_{\Sigma_e}(u) f_{\Delta_e}(v) \\ F_{\Delta_i}(u, v) &= f_{\Delta_i}(u) f_{\Sigma_e}(v) \\ F_{\Delta_s}(u, v) &= f_{\Delta_s}(u) f_{\Delta_e}(v) \end{aligned} \quad (7)$$

指向副瓣干扰的和波束的方向性函数为  $F_i(u, v)$ .

考虑沿方位方向抑制主瓣干扰与副瓣干扰的情况. 沿方位方向抑制主副瓣干扰后,俯仰方向和、差通道输出:

$$\begin{aligned} y_{E_s}(t) &= y_{\Sigma}(t) - w_{E_s, \Delta_e} y_{\Delta_e}(t) - w_{E_s, i} y_i(t) \\ y_{E_{\Delta_s}}(t) &= y_{\Delta_e}(t) - w_{E_{\Delta_s}, \Delta_s} y_{\Delta_s}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

令  $\mathbf{w}_{E_s} = [w_{E_s, \Delta_e}^* \ w_{E_s, i}^*]^T$ ,  $\mathbf{y}_{\text{side}}(t) = [y_{\Delta_e}(t) \ y_i(t)]^T$ , 则式(8)变为

$$\begin{aligned} y_{E_s}(t) &= y_{\Sigma}(t) - \mathbf{w}_{E_s}^H \mathbf{y}_{\text{side}}(t) \\ y_{E_{\Delta_s}}(t) &= y_{\Delta_e}(t) - w_{E_{\Delta_s}, \Delta_s} y_{\Delta_s}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{w}_{E_s}$  和  $w_{E_{\Delta_s}, \Delta_s}$  为用于抑制方位方向主瓣干扰和副瓣干扰的自适应权值,当干扰功率较大时,  $w_{E_s, \Delta_e} \approx w_{E_{\Delta_s}, \Delta_s}$ . 使输出数据方差最小,从而抑制干扰.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}_{E_s}} \|y_{\Sigma}(t) - \mathbf{w}_{E_s}^H \mathbf{y}_{\text{side}}(t)\|^2 \\ \min_{w_{E_{\Delta_s}, \Delta_s}} \|y_{\Delta_e}(t) - w_{E_{\Delta_s}, \Delta_s} y_{\Delta_s}(t)\|^2 \end{aligned} \quad (10)$$

根据维纳滤波<sup>[11]</sup>原理求解:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{E_s} &= \mathbf{R}_{\text{side}}^{-1} \mathbf{r}_{\text{side}, \Sigma} \\ w_{E_{\Delta_s}, \Delta_s} &= \frac{R_{\Delta_e, \Delta_s}}{R_{\Delta_s, \Delta_s}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $\mathbf{R}_{\text{side}} = E[\mathbf{y}_{\text{side}}(t) \mathbf{y}_{\text{side}}^H(t)]$ , 是辅助通道输出数据  $\mathbf{y}_{\text{side}}(t)$  的自相关,  $\mathbf{r}_{\text{side}, \Sigma} = E[\mathbf{y}_{\text{side}}(t) y_{\Sigma}(t)^*]$ , 是  $\mathbf{y}_{\text{side}}(t)$  与和通道输出数据  $y_{\Sigma}(t)$  的互相关. 同时令  $R_{\Delta_e, \Delta_s} = E[y_{\Delta_e}(t) y_{\Delta_s}^*(t)]$ ,  $R_{\Delta_s, \Delta_s} = E[y_{\Delta_s}(t) y_{\Delta_s}^*(t)]$ . 同理可得沿俯仰方向抑制主副瓣干扰的自适应权值  $\mathbf{w}_{A_s} = [w_{A_s, \Delta_e}^* \ w_{A_s, i}^*]^T$  和  $\mathbf{w}_{A_{\Delta_s}, \Delta_s}$ , 以及方位和、方位差通道输出数据  $y_{A_s}(t)$ 、 $y_{A_{\Delta_s}}(t)$ . 当干扰功率较大时,  $w_{E_s, \Delta_e} \approx w_{E_{\Delta_s}, \Delta_s}$ ,  $w_{A_s, \Delta_e} \approx w_{A_{\Delta_s}, \Delta_s}$ , 为了简化推导及应用,本文中直接限定  $w_{E_s, \Delta_e} = w_{E_{\Delta_s}, \Delta_s}$ ,  $w_{A_s, \Delta_e} = w_{A_{\Delta_s}, \Delta_s}$ .

### 3.3 自适应和差鉴角曲线

在抑制主瓣与副瓣干扰后,俯仰方向和、差波束的自适应方向图函数为

$$\begin{aligned} F_{E_s}(u, v) &= F_{\Sigma}(u, v) - w_{E_s, \Delta_e} F_{\Delta_e}(u, v) - w_{E_s, i} F_i(u, v) \\ F_{E_{\Delta_s}}(u, v) &= F_{\Delta_e}(u, v) - w_{E_{\Delta_s}, \Delta_s} F_{\Delta_s}(u, v) \end{aligned} \quad (12)$$

方位方向向和、差波束的自适应方向图函数为

$$\begin{aligned} F_{A_s}(u, v) &= F_{\Sigma}(u, v) - w_{A_s, \Delta_e} F_{\Delta_e}(u, v) - w_{A_s, i} F_i(u, v) \\ F_{A_{\Delta_s}}(u, v) &= F_{\Delta_e}(u, v) - w_{A_{\Delta_s}, \Delta_s} F_{\Delta_s}(u, v) \end{aligned} \quad (13)$$

由于指向副瓣干扰的和波束在静态和波束的半功率波束宽度范围内的增益很小,对和、差鉴角曲线斜率的影响可以忽略,沿俯仰方向的自适应单脉冲比为

$$\begin{aligned} K_E &= \frac{F_{E_s}(u, v)}{F_{E_{\Delta_s}}(u, v)} \\ &= \frac{F_{\Delta_e}(u, v) - w_{A_s, \Delta_e} F_{\Delta_s}(u, v)}{F_{\Sigma}(u, v) - w_{A_s, \Delta_e} F_{\Delta_e}(u, v) - w_{A_s, i} F_i(u, v)} \\ &= \frac{f_{\Delta_e}(v) [f_{\Sigma_e}(u) - w_{A_s, \Delta_e} f_{\Delta_e}(u)]}{f_{\Sigma_e}(v) [f_{\Sigma_e}(u) - w_{A_s, \Delta_e} f_{\Delta_e}(u)] - w_{A_s, i} F_i(u, v)} \\ &\approx \frac{f_{\Delta_e}(v) [f_{\Sigma_e}(u) - w_{A_s, \Delta_e} f_{\Delta_e}(u)]}{f_{\Sigma_e}(v) [f_{\Sigma_e}(u) - w_{A_s, \Delta_e} f_{\Delta_e}(u)]} \\ &= \frac{f_{\Delta_e}(v)}{f_{\Sigma_e}(v)} \end{aligned} \quad (14)$$

同理可得沿俯仰方向抑制主瓣干扰后,方位方向的自适应和差比为  $K_A = f_{\text{sub}, \Delta_e}(u) / f_{\text{sub}, \Sigma_e}(u)$ . 根据和差比幅值,利用四个主通道也就是俯仰和、方位和、俯仰差、方位差通道的输出数据即可测得目标信号入射角度.

### 3.4 算法流程

综上所述,在主副瓣干扰存在的情况下,利用双差/三和通道自适应地同时抑制主副瓣干扰并利用最终单脉冲比幅进行测角的算法流程可以归纳如下(如图4所示).

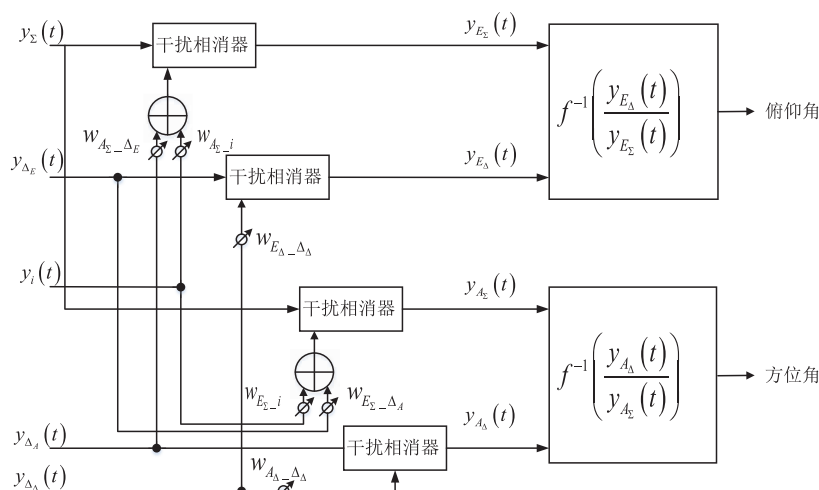


图4 双差/三和通道自适应单脉冲系统流程图

**步骤 1** 在阵列降维的基础上,利用权值逼近方法得到子阵及阵元级的和、俯仰差、方位差、双差的直接加权,形成和、差及双差波束;在子阵级加副瓣干扰的导向矢量权,形成指向副瓣干扰的和波束,最终得到双和/三差通道的五通道输出数据。

**步骤 2** 俯仰差通道、指向副瓣干扰的和通道作为和通道的辅助通道,双差通道作为俯仰差通道的辅助通道,根据维纳滤波准则优化自适应权值,通过权值自适应调节辅助通道的输出,使其最大程度地对消掉主通道中的主副瓣干扰信号,输出抑制干扰后的俯仰和、俯仰差数据。

**步骤 3** 同步骤 2,可以获得抑制干扰后的方位和、方位差数据。

**步骤 4** 在和、俯仰差、方位差、双差、指向副瓣干扰和波束方向图上,得到自适应单脉冲鉴角曲线,利用单脉冲比和步骤 2、步骤 3 中所得输出数据进行俯仰向和方位向的测角。

#### 4 仿真实验和性能分析

设定  $M = 24$ 、 $L = 20$  的平面井字形阵列,通过粒子群优化算法优化降维得到  $N_{\text{sub}} = 65$  个子阵。参考和、差加权分别采用  $-30\text{dB}$  Taylor 和  $-30\text{dB}$  Bayliss 加权。载波中心频率  $1\text{GHz}$ ,波束指向为  $(0^\circ, 0^\circ)$  设有 1 个信号和 2 个干扰:信号来向为  $(-0.5^\circ, 0.5^\circ)$ ,频率为  $150\text{MHz}$ ,信噪比  $\text{SNR} = 0\text{dB}$ ;主瓣干扰来向为  $(1^\circ, 1^\circ)$ ,频率为  $151\text{MHz}$ ;旁瓣干扰来向为  $(20^\circ, 25^\circ)$ ,频率为  $159\text{MHz}$ ,干噪比均为  $\text{INR} = 40\text{dB}$ 。非均匀子阵划分阵型图如图 5 所示。

权值逼近后得到全阵的和、差及双差波束方向如图 3(a) ~ (d) 所示。利用差波束、指向干扰的和波束作为辅助波束抑制和波束中的主副瓣干扰后的和波束沿

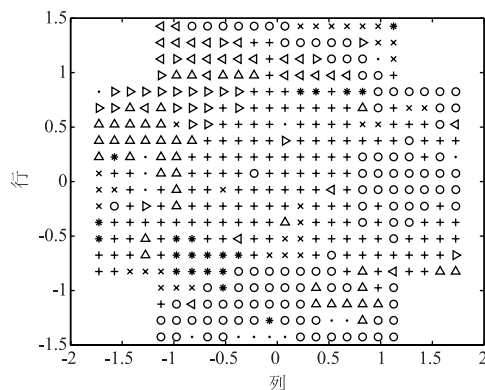


图5 非均匀子阵划分阵型图

俯仰维、方位维的切面图如图 6 所示,在主瓣范围内与静态和波束俯仰维、方位维的方向图完全吻合,同理,利用双差波束作为辅助波束抑制主瓣干扰后的俯仰差、方位差波束与静态差波束方向图吻合,差比和得到方位维和俯仰维的鉴角曲线,如图 7(a)、(b) 所示,在半波束宽度的线性和差测角范围内,自适应鉴角曲线与静态鉴角曲线重合无畸变。1000 次蒙特卡洛实验后,方位维、俯仰维测角误差分别为  $(0.17^\circ, 0.024^\circ)$ 。方位维的测角误差较大,方位维的半功率波束宽度为  $4.2^\circ$ ,因此误差小于波束宽度的  $1/20$ 。

俯仰维、方位维和波束沿主瓣干扰方向的切面图如图 8 所示,可以看出在主瓣干扰方向形成深凹口,可以有效零陷掉干扰。

在图 9 中与原四通道抑制干扰方法的仿真结果对比可以得知,原四通道方法由于没有足够的自由度抑制副瓣干扰,在副瓣干扰方向无法形成精准的深零陷,而本文提出的双和三差通道方法在抑制主瓣干扰的同时,可有效抑制副瓣干扰。

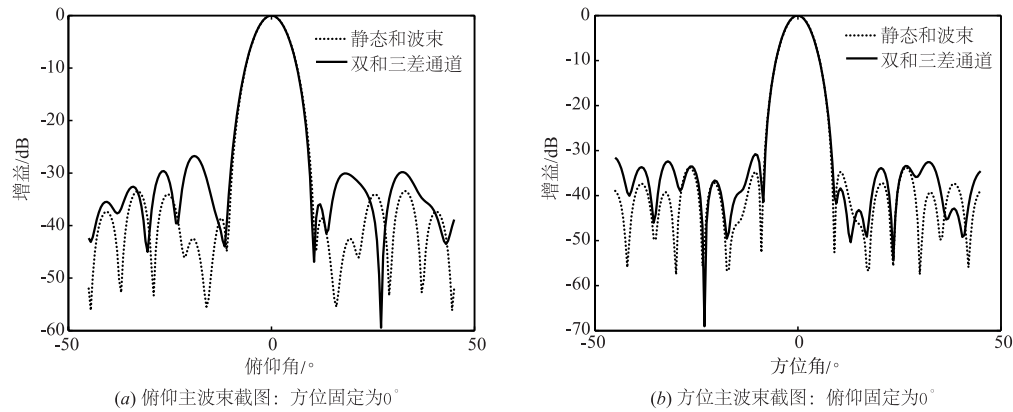


图6 静态和波束与自适应和波束俯仰维、方位维切面图

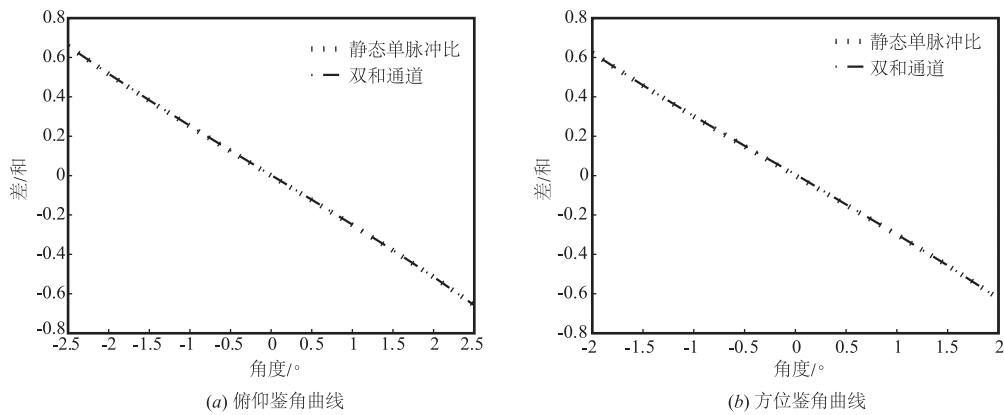


图7 自适应和差鉴角曲线与静态和差鉴角曲线

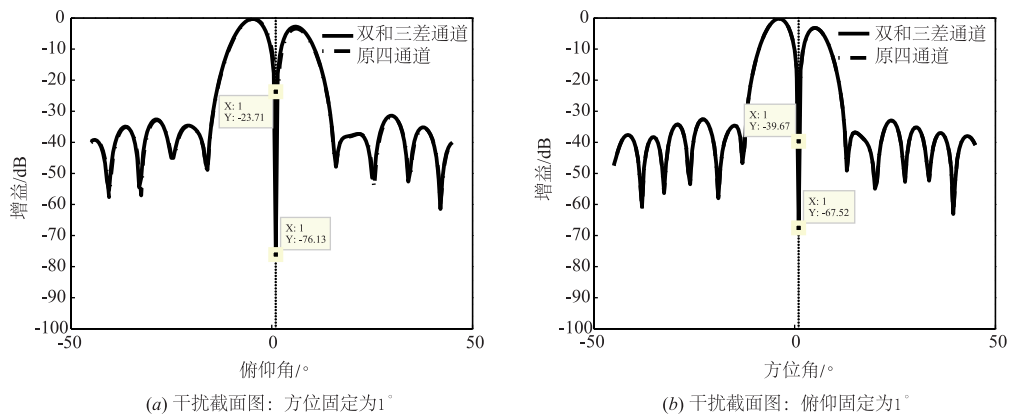


图8 俯仰维、方位维和波束沿主瓣干扰方向切面图

当副瓣干扰测向不够精准导致指向副瓣干扰的和波束的指向发生偏差时此方法对于副瓣干扰的抑制仍然有效,且对鉴角曲线无影响.如图 10 仿真所示,偏差角度设定为  $5^\circ$ .

设定角度误差范围为  $(-5^\circ, 5^\circ)$ , 1000 次蒙特卡洛实验后和差测角误差曲面如图 11 所示.

指向副瓣干扰的辅助和波束的角度偏差  $5^\circ$  范围内时不影响干扰抑制和和差跟踪的性能,这是因为即使角度有偏差,辅助波束在副瓣干扰方向仍有较高的增益,而且权矢量  $w_{E_s}$  和  $w_{A_s}$  可以自适应地调节主波束与辅助波束相消.

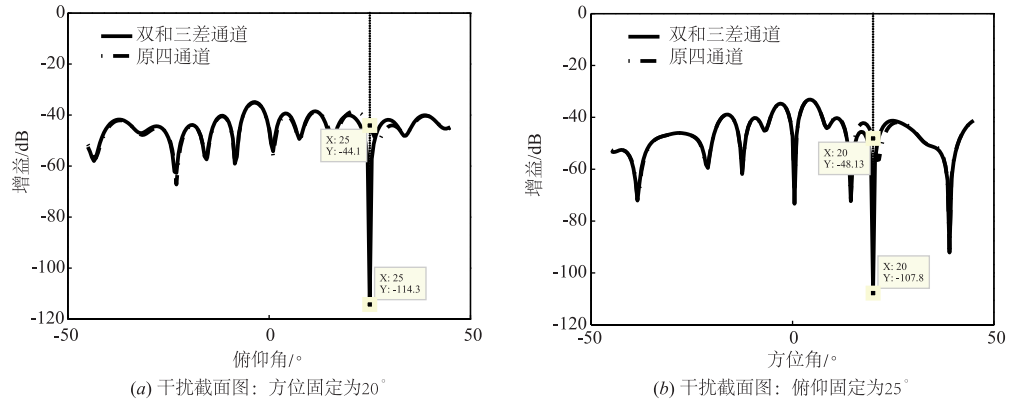


图9 和波束沿副瓣干扰方向切面图

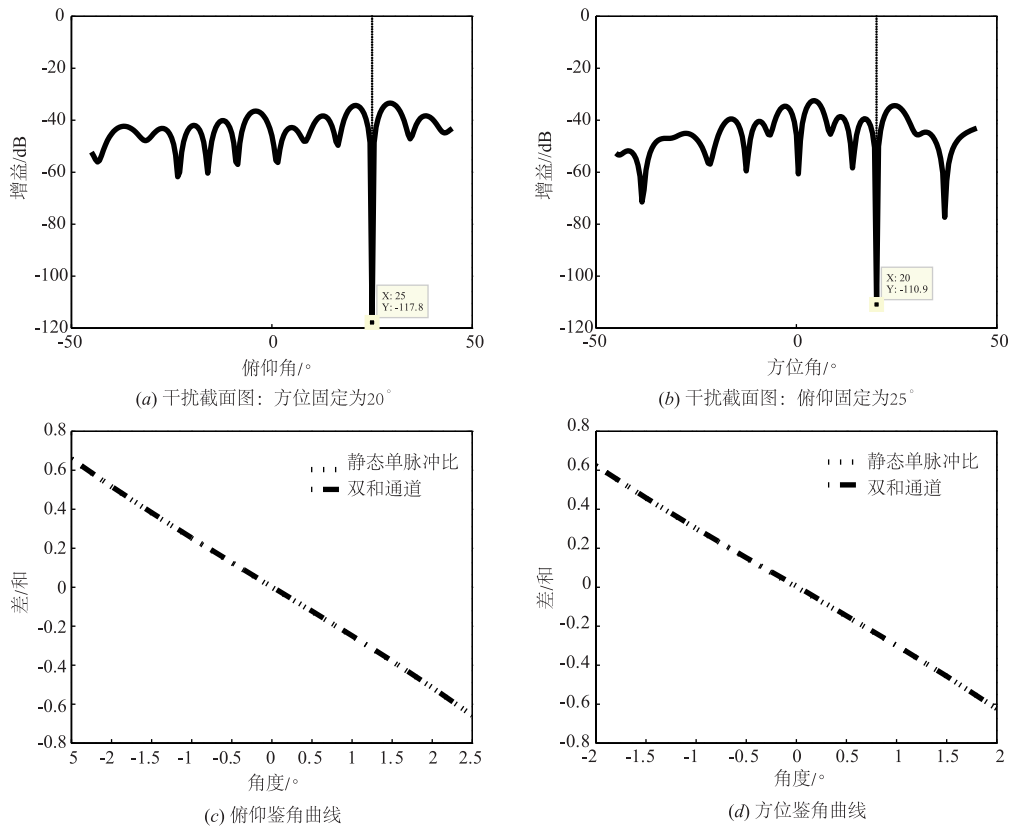


图10 辅助和波束指向偏差时的副瓣干扰方向和波束切面图及鉴角曲线

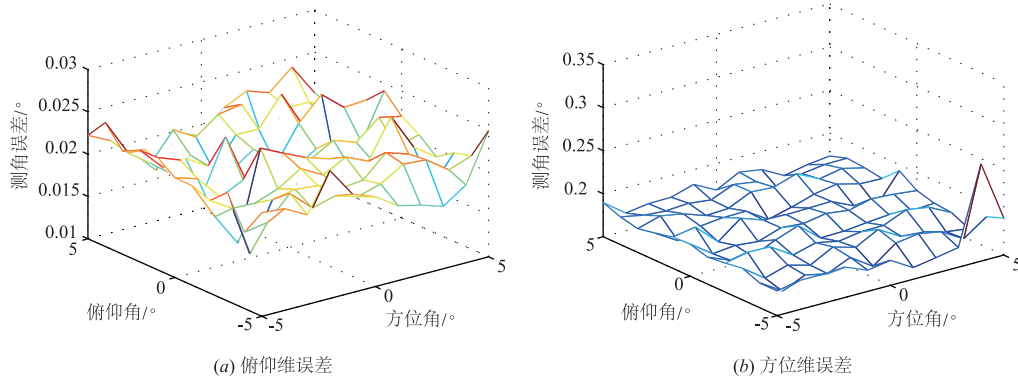


图11 辅助和波束指向偏差时的和差测角误差

## 5 结论

在传统和、差和双差四通道系统中,差波束与双差波束分别作为和波束与差波束的辅助通道,抑制和、差波束中的主瓣干扰.针对大型阵列,本文在优化子阵划分与和差低副瓣加权逼近优化后,在已有原四通道的基础上,添加指向副瓣干扰方向的和波束通道,作为静态和波束的辅助通道,在抑制主瓣干扰的同时抑制和波束通道中的副瓣干扰.以输出最小均方误差为准则,优化辅助波束的加权,自适应地调整辅助波束的分量以最大程度抑制和、差波束通道中的干扰信号.最后的仿真实验验证了所提方法的有效性和可行性,在主瓣和副瓣干扰方向和波束方向图中形成精确的深凹口,并且保证鉴角曲线不失真;即使副瓣干扰方向辅助和波束指向有所偏差时,亦能有效地准确抑制干扰,保证单脉冲测角精度.

### 参考文献

- [1] Ulrich R O NICKEL, Eric CHAUMETTE, Pascal LARZ-ABAL. Statistical performance prediction of generalized monopulse estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 381 - 404.
- [2] SP APPLEBAUM, R WASIEWICZ. Adaptive arrays with main beam constraints[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1976, 24(5): 650 - 662.
- [3] YU Kai-Bor, MURROW D J. Adaptive digital beamforming radar for monopulse angle estimation in jamming[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2): 508 - 523.
- [4] 胡航,张皓.一种改进的两级子阵级自适应单脉冲方法[J].电子学报,2009,37(9):1996 - 2003.  
HU Hang, ZHANG Hao. An improved two-stage processing approach of adaptive monopulse at subarray level[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1996 - 2003. (in Chinese)
- [5] Mostafa RAHMANI, Mohammad Hasan BASTANI. Robust and rapid converging adaptive beamforming via a subspace method for the signal-plus interferences covariance matrix estimation[J]. IET Signal Processing, 2014, 8(5): 507 - 520.
- [6] 苏保伟,王永良,李荣峰,周良柱.阻塞矩阵方法对消主瓣干扰[J].系统工程与电子技术,2005,27(11):1830 - 1832.  
SU Bao-wei, WANG Yong-liang, LI Rong-feng, ZHOU Liang-zhu. Mainlobe interference cancelling method via block matrix[J]. System Engineering and Electronics, 2005, 8(5): 507 - 520. (in Chinese)
- [7] Arash KHABBAZIBASMENJ, Sergiy A VOROBYOV, Aboulnasr HASSANIEN. Robust adaptive beamforming based on steering vector estimation with as little as possible prior information[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(6): 2974 - 2987.
- [8] 孙晨伟,陶海红,王莹,吕红丽.大型阵列降维-和差多波束形成的联合优化算法[J].电子学报,2013,41(3):519 - 525.  
SUN Chen-wei, TAO Hai-hong, WANG Ying, LÜ Hong-li. Dimensionality reduction of large scale phased array-joint optimization of sum and difference multiple beams[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 519 - 525. (in Chinese)
- [9] 何学辉,吴兆平,吴顺君.一种任意阵的方向图模值综合方法[J].电子学报,2010,38(10):2292 - 2296.  
HE Xue-hui, WU Zhao-ping, WU Shun-jun. Pattern synthesis with desired magnitude response for arbitrary arrays[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2292 - 2296. (in Chinese)
- [10] LOFBERG J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB[A]. 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No. 04CH37508)[C]. Taiwan: CACSD, 2004. 284 - 289.
- [11] 束宇翔,廖桂生,杨志伟.维纳滤波最优权修正导向矢量的 SAR-GMTI 动目标径向速度估计方法[J].电子学报,2011,39(9):1986 - 1991.  
SHU Yu-xiang, LIAO Gui-sheng, YANG Zhi-wei. Radial velocity estimation of moving targets based on modifying the steering vector with Wiener optimal weights in SAR-GMTI Radar system[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 1986 - 1991. (in Chinese)

### 作者简介



**孙晨伟** 女,1988年7月出生于山东省济南市.现在西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室攻读博士.研究方向为阵列信号处理.

E-mail: sun\_chenwei@163.com



**陶海红** 女,1976年4月生于安徽省亳州市.西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室教授、博士生导师,从事信号与信息处理的研究与教学工作.主要研究方向为阵型优化设计和自适应波束形成及智能方法在信号处理中的应用.

E-mail: hhtao@xidian.edu.cn