

## 阵列雷达自适应多零点单脉冲群目标测角算法\*

王罗胜斌,徐振海,刘兴华,董 玮,王国玉

(国防科技大学 电子科学学院 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室,湖南 长沙 410073)

**摘要:**针对阵列体制雷达,由极大似然估计导出自适应多零点单脉冲测角原理。分析发现迭代步长过大导致双零点单脉冲技术在多目标条件下失效,因此提出加权步长改进角度估计的迭代过程,只需要较少计算量就能实现群内多个目标的精确测角。仿真结果表明:该算法在较高信噪比条件下可以精确测量群内三个目标角度,测角误差约为0.15倍波束宽度;当群目标数较多或者目标相位差接近于0时,算法性能下降明显。

**关键词:**群目标测角;极大似然估计;自适应多零点单脉冲;加权步长

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)03-001-06

## Angular estimation of group targets using adaptive multi-null monopulse for array radar

WANG Luoshengbin, XU Zhenhai, LIU Xinghua, DONG Wei, WANG Guoyu

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The adaptive multi-null monopulse principle of phased array radar, derived from the maximum likelihood estimation, was introduced. It was found that the failure of double-null monopulse technique in multiple group targets was caused by a large iteration step. In order to optimize the iteration in angular estimation, a method of weighted step was proposed. By the proposed method, an accurate angular estimation of multiple group targets was achieved with a few computations. Several simulation results demonstrate that the angular estimation error of three targets is about 0.15 beamwidth in medium signal to noise ratio. However, the performance will get worse when there are a large number of group targets or the phase offset of echoes is closed to 0.

**Keywords:** angular estimation of group targets; maximum likelihood estimation; adaptive multi-null monopulse; weighted step

位于同一距离单元、角度单元和多普勒单元内,在任何一维度,利用常规线性处理方法都难以分辨的多个目标集合称为群目标<sup>[1]</sup>,学术界也称为不可分辨目标。在雷达探测领域,尤其在远程预警中,群目标现象普遍存在。在防空背景下,编队飞机可构成群目标;在精确制导背景下,飞机和拖曳式诱饵也可构成群目标;在反导背景下,弹道导弹突防时释放的有源或无源诱饵、箔条以及分离过程中产生的碎片等亦可构成群目标。群目标特性复杂,严重影响雷达探测。精确测量群目标角度是跟踪、识别群目标的前提。

单脉冲技术具有测角精度高、工程易实现等优点,但在群目标条件下,测量的角度与任一目标均不对应,并随着目标间相对幅度和相位剧烈“抖动”,甚至超出雷达角度范围,这种测量误差

可能导致跟踪丢失<sup>[2]</sup>。针对此问题, Sherman等<sup>[2]</sup>、Lee等<sup>[3]</sup>将群目标单脉冲比作为确定量,提出利用两个脉冲的和、差信号求解双目标角度的方法,但此方法需要两个独立的脉冲。Zheng等<sup>[4]</sup>在此基础上提出利用四象限单脉冲分辨群内双目标方法,并推导了矩形阵列的双目标角度闭式解。Blair等<sup>[5-8]</sup>将群目标单脉冲比作为随机量,重点分析其统计特性,针对两个瑞利目标提出了基于瞬时匹配的角度估计方法。在此基础上, Sinha等<sup>[9]</sup>推导了Swerling I型和Swerling III型目标的似然函数,用栅格搜索得到角度的极大似然估计,但计算量巨大。最近, Glass等<sup>[8]</sup>提出利用相邻距离采样提高分辨精度。然而,单脉冲雷达处理自由度少,大多数方法需要多个脉冲增加时间上的处理维度,难以拓展至多个目标情况,

\* 收稿日期:2018-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61471372);天线与微波技术国家重点实验室基金资助项目(61424020301162402005)

作者简介:王罗胜斌(1992—),男,江西吉安人,博士研究生, E-mail: wangluoshengbin@163.com;

徐振海(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师, E-mail: drxzh930@sina.com

严重限制了群目标的测角性能。

另一种思路是利用阵列雷达多样式、多维度的信号处理方法实现群目标测角。众多方法中参数法<sup>[10]</sup>(极大似然估计)因为具有更强的鲁棒性而应用广泛。早在 20 世纪 70 年代, White<sup>[11]</sup>针对海面低角目标出现镜面反射时难以跟踪的问题,基于极大似然估计原理提出了阵列双零点单脉冲技术,并给出了该技术应用至空间多目标的思路与应用框架,但没有进一步的研究报道。文献[12]将双零点单脉冲技术进行完善,只需较少的计算量就能实现低角目标跟踪。文献[13]将此技术应用至空间双目标情况,获得了良好的分辨效果。

## 1 信号模型与估计方法

### 1.1 群目标回波模型

$N$  元均匀半波长线型阵列雷达主瓣内存在  $M$  个目标,接收信号为多个目标回波的线性叠加。经过信号放大、变频、采样等处理,群目标回波模型可表示为:

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^M A_i \mathbf{s}(u_i) + \mathbf{n} \quad (1)$$

下标  $i$  表示第  $i$  个目标;  $A_i$  表示回波复幅度;  $\mathbf{s}(u_i)$  表示阵列导向矢量,

$$\mathbf{s}(u_i) = \frac{1}{\sqrt{N}} [e^{j\frac{\pi(N-1)}{2}u_i}, e^{j\frac{\pi(N-3)}{2}u_i}, \dots, e^{-j\frac{\pi(N-1)}{2}u_i}]^T \quad (2)$$

$j$  表示纯虚数;  $u_i = \sin\theta_i$  为目标角度的正弦空间坐标,  $\theta_i$  为目标与阵面法向的夹角,  $u_i \in [-u_{3\text{dB}}/2, u_{3\text{dB}}/2]$ ,  $u_{3\text{dB}}$  为雷达主瓣波束宽度;  $\mathbf{n} \in \mathbf{C}^{N \times 1}$  表示阵列接收机热噪声矢量,服从零均值高斯分布,热噪声功率为  $\sigma^2$ 。当  $M=1$  时,信号模型退化为单目标情况。

### 1.2 极大似然估计

将群目标回波模型改写为矩阵形式:

$$\mathbf{x} = \mathbf{S}\mathbf{a} + \mathbf{n} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{S} = [\mathbf{s}(u_1) \ \mathbf{s}(u_2) \ \dots \ \mathbf{s}(u_M)]$ ,  $\mathbf{a} = [A_1 \ \dots \ A_M]^T$ 。待估计的未知参数有群目标角度正弦空间坐标  $u_i$  和复幅度  $A_i$ ,根据极大似然原理似然函数为:

$$p(\mathbf{x} | u_1, \dots, u_M, A_1, \dots, A_M) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right)^{\frac{N}{2}} \exp\left[-\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{S}\mathbf{a})^H(\mathbf{x} - \mathbf{S}\mathbf{a})}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

当回波数据与假设模型之间的均方误差最小时似然函数最大,所以极大似然估计可表示为:

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_1 & \dots & \hat{u}_M \\ \hat{A}_1 & \dots & \hat{A}_M \end{pmatrix} = \arg \min_{\substack{u_1, \dots, u_M \\ A_1, \dots, A_M}} Q = \|\mathbf{x} - \mathbf{S}\mathbf{a}\|^2 \quad (5)$$

复幅度  $\mathbf{a}$  的极大似然估计实际上是最小二乘问题<sup>[14]</sup>,估计值为:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{S}^H\mathbf{S})^{-1}\mathbf{S}^H\mathbf{x} = [\hat{A}_1 \ \hat{A}_2 \ \dots \ \hat{A}_M]^T \quad (6)$$

其中,  $\hat{A}_i$  为复幅度估计值。

目标函数  $Q$  关于  $u_1, \dots, u_M$  分别求偏导,得到方程组:

$$\text{Re}\{\mathbf{d}^H(u_i)[\mathbf{x} - \sum_{n=1, n \neq i}^M \hat{A}_n \mathbf{s}(u_n)]\} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{d}^H(u_i) = \text{ds}(u_i)/du_i$  为信号矢量关于角度的导数,与导向矢量正交,即  $\mathbf{d}^H(u_i)\mathbf{s}(u_i) = 0$ 。

式(7)为非线性方程组,难以直接求解,必须通过迭代逼近求解<sup>[11]</sup>。一种求解思路是利用凸优化方法求解目标函数  $Q$  的极小点,但此类方法需要求解梯度,计算量巨大,并且迭代步长难以控制;另一种思路是利用多维单脉冲测量<sup>[15]</sup>估计目标角度,这种方法是阵列单脉冲处理的一种多维扩展,计算量小。本文将采取第二种思路,实现群目标的角度估计。

## 2 群目标角度估计方法

### 2.1 自适应多零点单脉冲测量

将式(7)可改写为:

$$\begin{aligned} & \text{Re}\{\mathbf{d}^H(u_i)[\mathbf{x} - \sum_{n=1, n \neq i}^M \hat{A}_n \mathbf{s}(u_n)]\} \\ &= \text{Re}\{\mathbf{d}^H(u_i)[\mathbf{x} - \sum_{n=1}^M \hat{A}_n \mathbf{s}(u_n) + \hat{A}_i \mathbf{s}(u_i)]\} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

由于  $\mathbf{d}^H(u_i)\mathbf{s}(u_i) = 0$ ,式(7)可以进一步写为:

$$\text{Re}\{\mathbf{d}^H(u_i)[\mathbf{x} - \mathbf{S}\hat{\mathbf{a}}]\} = 0 \quad (9)$$

将式(6)代入式(9)可得:

$$\begin{aligned} & \text{Re}\{\mathbf{d}^H(u_i)[\mathbf{I} - \mathbf{S}(\mathbf{S}^H\mathbf{S})^{-1}\mathbf{S}^H]\mathbf{x}\} \\ &= \text{Re}\{\mathbf{d}^H(u_i)\mathbf{P}_{S^\perp}\mathbf{x}\} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{P}_{S^\perp} = [\mathbf{I} - \mathbf{S}(\mathbf{S}^H\mathbf{S})^{-1}\mathbf{S}^H]$ ,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。根据 Nickel 在文献[16]中对阵列广义单脉冲的分析可知,  $\hat{A}_i$  和  $\mathbf{d}^H(u_i)\mathbf{P}_{S^\perp}\mathbf{x}$  实际上是阵列单脉冲输出的和、差信号,可以用于角度测量。

利用数字波束形成技术生成  $M$  套单脉冲系统,分别指向  $u_{b1}, u_{b2}, \dots, u_{bM}$ 。令

$$\Sigma_i = \mathbf{w}_{\Sigma_i}^H \mathbf{x} \quad (11)$$

$$\Delta_i = \mathbf{w}_{\Delta_i}^H \mathbf{x} \quad (12)$$

其中,  $\Sigma_i$  和  $\Delta_i$  分别为第  $i$  套单脉冲系统输出的和

信号与差信号,  $\mathbf{w}_{\Sigma_i}^H$  和  $\mathbf{w}_{\Delta_i}^H$  分别为和、差波束权值。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{w}_{\Sigma_1}^H \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{\Sigma_M}^H \end{bmatrix} = (\mathbf{S}_b^H \mathbf{S}_b)^{-1} \mathbf{S}_b^H \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{w}_{\Delta_1}^H \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{\Delta_M}^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}^H(u_1) \\ \vdots \\ \mathbf{d}^H(u_M) \end{bmatrix} \mathbf{P}_{S^\perp} \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{S}_b = [\mathbf{s}(u_{b1}) \ \mathbf{s}(u_{b2}) \ \cdots \ \mathbf{s}(u_{bM})]$ 。

每套单脉冲系统和、差接收波束的方向图分别为:

$$F_{\Sigma_i}(u) = \mathbf{w}_{\Sigma_i}^H \mathbf{s}(u) \quad (15)$$

$$F_{\Delta_i}(u) = \mathbf{w}_{\Delta_i}^H \mathbf{s}(u) \quad (16)$$

由式(13)~(16)可以推出:

$$\Sigma_i(u_{bj}) = 0 \quad j \neq i; j = 1, 2, \dots, M \quad (17)$$

$$\Delta_i(u_{bj}) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (18)$$

式(17)、式(18)说明每套单脉冲系统会在其他系统的波束指向处自适应形成零点, 保证和波束输出能量最大, 抑制其他目标信号的影响, 故将此类单脉冲测量称为自适应多零点单脉冲测量。

## 2.2 迭代优化——步长加权法

根据自适应多零点单脉冲的测量结果无法直接测量目标角度。以第一套单脉冲系统为例, 输出的群目标单脉冲比为:

$$\frac{\Delta_1}{\Sigma_1} = \frac{\sum_{i=1}^M A_i F_{\Delta_1}(u_i)}{\sum_{i=1}^M A_i F_{\Sigma_1}(u_i)} = \frac{\sum_{i=1}^M A_i F_{\Sigma_1}(u_i) K_1 u_i}{\sum_{i=1}^M A_i F_{\Sigma_1}(u_i)} \quad (19)$$

式中,  $K_1$  表示第一套单脉冲系统的鉴角斜率。可以看出, 多维单脉冲系统输出的角度实际上是群目标的复指示角<sup>[2]</sup>, 不能像传统单脉冲一样“一步”测角, 只能通过更新迭代波束指向不断逼近目标角度, 所以这是一种次优估计<sup>[17]</sup>。

当目标数为2时, 根据单脉冲系统测量的角度, 文献[12-13]提出如式(20)所示角度迭代方式。

$$u'_{bi} = u_{bi} + \frac{1}{K_i} \operatorname{Re} \left[ \frac{\mathbf{w}_{\Delta_i}^H(u_{b1}, u_{b2}) \mathbf{x}}{\mathbf{w}_{\Sigma_i}^H(u_{b1}, u_{b2}) \mathbf{x}} \right] \quad (20)$$

其中,  $K_i$  和  $u'_{bi}$  分别表示第  $i$  ( $i = 1, 2$ ) 套系统的鉴角斜率和更新后的波束指向。

双目标条件下, 用复指示角直接更新波束指向能够迅速收敛于目标角度, 主要原因为: 对于第一套单脉冲系统, 和、差波束接收的主要能量来自第一个目标, 自适应零点抑制了第二个目标的干

扰, 更新后的波束指向更逼近于第一个目标, 使得接收到第二个目标的能量越来越弱。然而, 对于多个目标, 更新后的波束指向无法锁定同一目标, 导致迭代不收敛。

从优化的角度来看, 迭代步长过大导致双零点测角无法直接扩展至多个目标, 必须自适应调整迭代步长。当波束指向偏离目标时, 各单脉冲系统形成的零点也偏离目标, 无法起到抑制的效果, 此时更新步长应该较小; 当波束指向接近目标时, 抑制效果明显, 复指示角度接近真值, 此时更新步长应该较大。

通过以上分析, 提出一种步长加权的方式改善迭代过程, 其思路为: 用目标函数  $Q$  反映波束指向偏离目标的程度, 从而确定权值  $w$  的大小。此处, 令调整步长的权值  $w$  与目标函数的数量级  $\lg Q$  成正比关系, 即目标函数每下降一个数量级, 步长权值相应地线性增加。步长权值的表达式为:

$$w(Q) = \frac{\lg Q_0 - \lg Q}{\lg Q_0 - \lg \varepsilon} (1 - w_0) + w_0 \quad (21)$$

式中,  $Q_0$  表示用波束指向初值计算得到的目标函数取值,  $\varepsilon$  为收敛误差,  $w_0$  为权值初始点。权值  $w$  是关于  $Q$  的函数,  $Q$  越小, 波束指向越接近目标。 $w_0$  与信噪比有关, 信噪比越高,  $w_0$  越大。

利用加权的方式在式(20)的基础上改进波束指向更新:

$$u'_{bi} = u_{bi} + \frac{w}{K_i} \operatorname{Re} \left[ \frac{\mathbf{w}_{\Delta_i}^H(u_{b1}, \dots, u_{bM}) \mathbf{x}}{\mathbf{w}_{\Sigma_i}^H(u_{b1}, \dots, u_{bM}) \mathbf{x}} \right] \quad (22)$$

## 2.3 群目标角度估计算法流程

根据以上对自适应多零点单脉冲以及波束指向迭代更新的分析, 提出自适应多零点单脉冲群目标测角算法, 算法流程如图1所示。

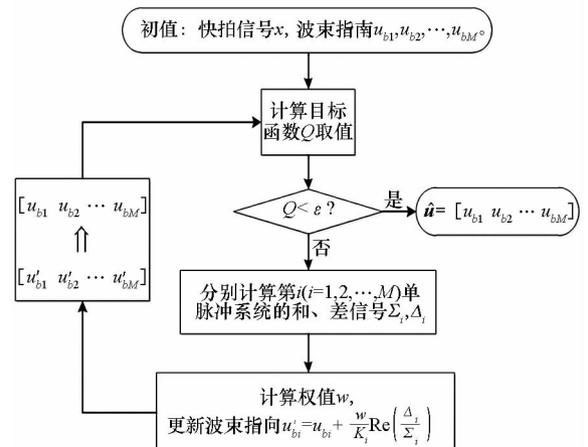
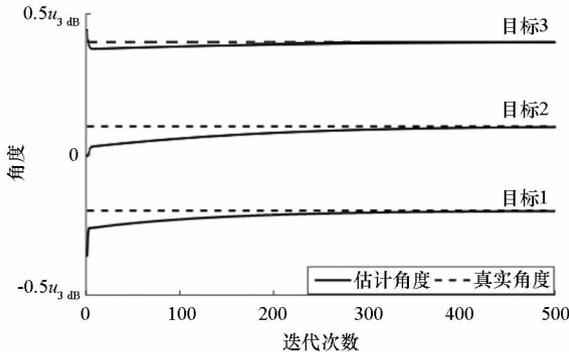


图1 算法流程图

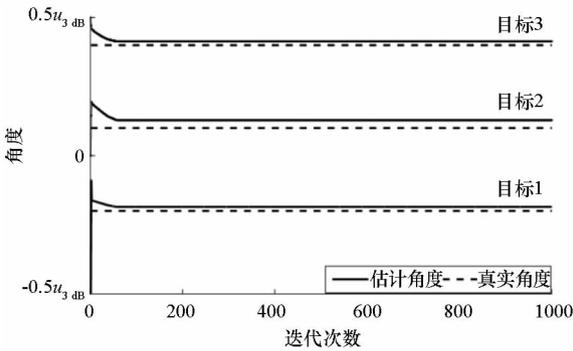
Fig. 1 Flowchart of algorithm

图 2 给出了自适应多零点单脉冲测角算法、交替投影法<sup>[18]</sup>、步长回溯法<sup>[19]</sup>三种方法在三个目标条件下( $u_1 = -0.2u_{3\text{dB}}, u_2 = 0.1u_{3\text{dB}}, u_3 = 0.45u_{3\text{dB}}$ )的迭代过程。由图可知,多零点单脉冲测角算法只需 300 次左右的迭代就能实现高精度的角度估计,而交替投影法需要 4000 次左右的迭代,步长回溯法虽然能迅速收敛,但估计值与真值存在明显偏差。相比之下,自适应多零点单脉冲测角迭代次数更少,并且只需计算单脉冲比,计算量远小于梯度的计算。因此,该测角算法更易于工程实现。



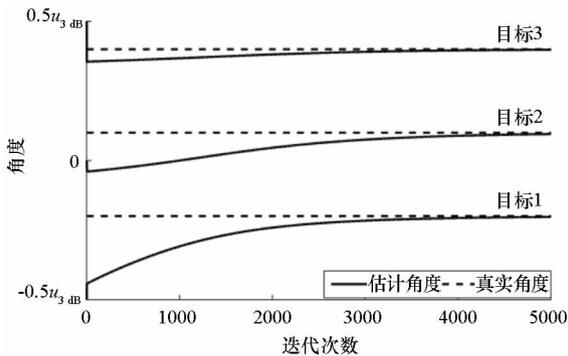
(a) 自适应多零点单脉冲测角算法

(a) Angular estimation of adaptive multi-null monopulse



(b) 交替投影法

(b) Alternating projection method



(c) 步长回溯法

(c) Step backtracking method

图 2 迭代收敛过程

Fig. 2 Iterative convergence process

### 3 仿真分析

考虑均匀半波长线阵,阵元数  $N = 16$ ,则波束宽度  $\theta_{3\text{dB}} \approx 6.35^\circ$ ,  $u_{3\text{dB}} = \sin\theta_{3\text{dB}} \approx 0.11$ 。假设群内存在三个目标,角度正弦空间坐标分别为  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ ,相对复幅度分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 。信噪比定义为第一个目标回波功率与阵元噪声方差之比,即:  $SNR = |A_1|^2/\sigma^2$ 。设波束指向初值为  $u_{b1} = -0.5u_{3\text{dB}}, u_{b2} = 0, u_{b3} = 0.5u_{3\text{dB}}$ 。图 3 给出了初始条件下的和、差波束方向图以及对应的鉴角曲线。可以看出,各单脉冲系统的和、差波束在其他波束指向处均形成了零陷,与 2.1 节中的分析一致。

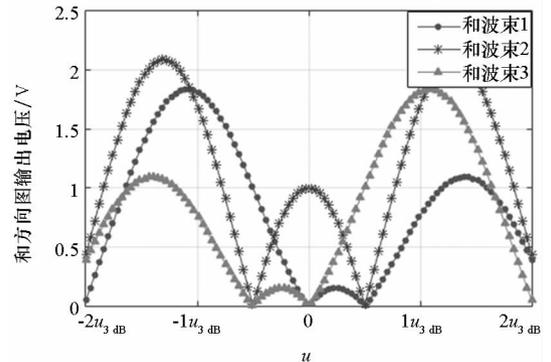
设最大迭代次数为 1000,收敛误差  $\varepsilon = 10^{-12}$ ,图 4 给出了多种信噪比下不同目标函数对应的步长权值。

定义角度估计均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{3}E\left[\sum_{i=1}^3(\hat{u}_i - u_i)^2\right]} \quad (23)$$

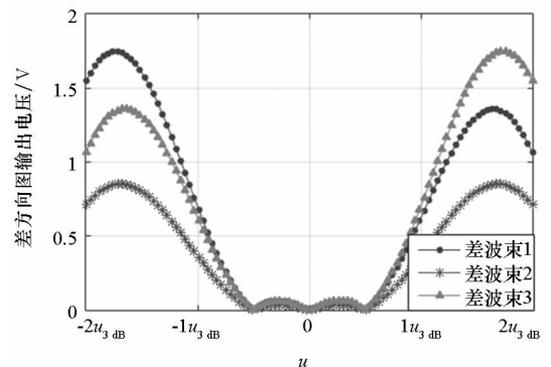
式中,  $E[\cdot]$  表示取均值。

进行 1000 次 Mont Carlo 仿真,分析算法性能。在假设已知准确群目标数的条件下,将本文方法与前后空间平滑的多重信号分类法(Front Back



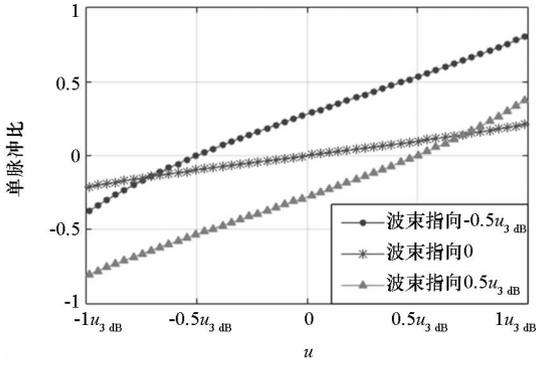
(a) 和波束方向图

(a) Sum beampattern



(b) 差波束方向图

(b) Difference beampattern



(c) 单脉冲比鉴别曲线  
(c) Monopulse ratio curve

图3 自适应多零点单脉冲和、差方向图以及单脉冲比鉴别曲线

Fig. 3 Sum/difference beampattern and monopulse ratio curve of adaptive multi-null

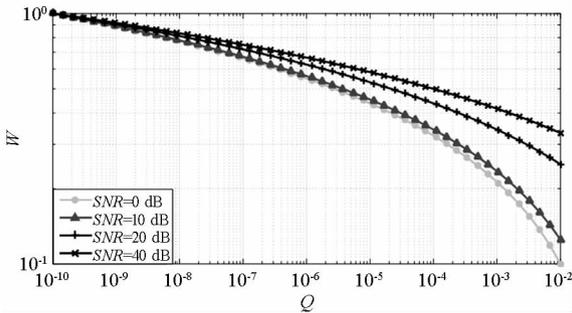


图4 步长权值曲线  
Fig. 4 Weighted step

Spatial Smoothing Multiple Signal Classification, FBSS-MUSIC)<sup>[14]</sup>(空间平滑预处理的MUSIC算法)以及交替投影法进行对比实验。

### 3.1 测角精度与信噪比的关系

在该实验中,设定三个目标的角度分别为  $u_1 = -0.2u_{3\text{ dB}}, u_2 = 0.1u_{3\text{ dB}}, u_3 = 0.45u_{3\text{ dB}}$ , 复幅度分别为  $A_1 = 1, A_2 = 0.9e^{j\pi/4}, A_3 = e^{j3\pi/2}$ 。图5给出了三种算法的RMSE与SNR关系曲线。

可以看出:随着信噪比的增大,三种算法的测角精度提高,这是普遍规律;在高信噪比条件下,本文方法的测角性能与交替投影法相近,测角误差约为  $0.15u_{3\text{ dB}}$ ;在低信噪比条件下,本文方法测角性能更优,并且精度远高于FBSS-MUSIC,说明本文方法的鲁棒性更强;FBSS-MUSIC在低信噪比条件下性能很差,其主要原因是MUSIC等子空间方法不适用于相干源,在单次快拍条件下需要空间平滑预处理,但这种处理损失了空间分辨率,难以精确估计信号协方差矩阵。

### 3.2 测角精度与角度间隔的关系

在该实验中,设定三个目标关于阵列法向对

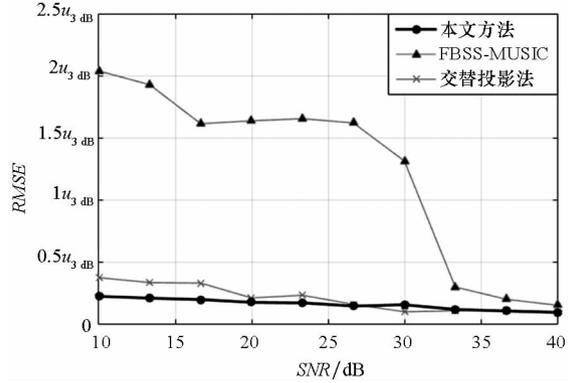


图5 测角精度与信噪比的关系

Fig. 5 Performance of angular estimation versus SNR

称分布,角度分别为  $u_1 = -\Delta u, u_2 = 0, u_3 = \Delta u$ , 复幅度分别为  $A_1 = 1, A_2 = 0.9e^{j\pi/4}, A_3 = e^{j3\pi/2}$ , 信噪比  $SNR = 30\text{ dB}$ 。图6给出了三种算法RMSE与 $\Delta u$ 的关系曲线。

可以看出:随着目标角度间隔的减少,测角精度下降,这是群目标测角的特有规律;当目标角度间隔低于  $0.25u_{3\text{ dB}}$  时,三种方法都无法精确测角;实际上,若目标角度间隔非常小,群目标可作为单个目标处理。

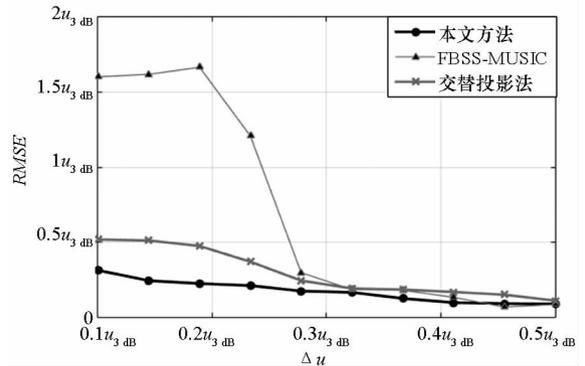


图6 测角精度与角度间隔的关系

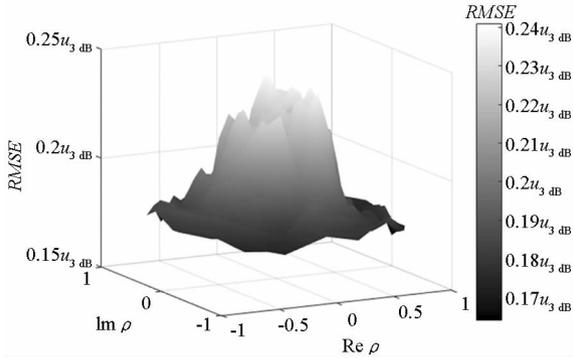
Fig. 6 Performance of angular estimation versus  $\Delta u$

### 3.3 测角精度与相对复幅度的关系

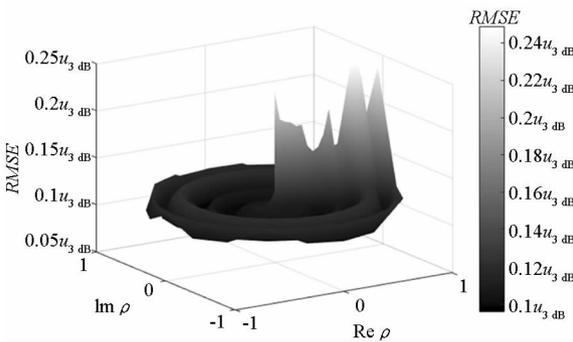
在该实验中,假设群内存在一个大目标与两个小目标,设定三个目标角度分别为  $u_1 = -0.2u_{3\text{ dB}}, u_2 = 0.1u_{3\text{ dB}}, u_3 = 0.45u_{3\text{ dB}}$ ; 信噪比  $SNR = 30\text{ dB}$ ; 三目标的相对复幅度分别为  $A_1 = 1, A_2 = \rho e^{j\Delta\varphi}, A_3 = \rho e^{j-\Delta\varphi}$ 。令  $\rho = \rho e^{j\Delta\varphi}$ , 只考虑FBSS-MUSIC与本文方法,图7给出了两种算法RMSE与 $\rho$ 的关系。可以看出:随着目标幅度差异的增大,FBSS-MUSIC的测角精度降低,但对目标的相对相位影响不大;而本文方法恰好相反,在目标相对相位为0时测角精度最低,在目标幅度差异较大时仍能保持较高的测角精度。

对于单次快拍,运用子空间方法之前需要进

行空间平滑得到满秩的协方差矩阵,这种预处理消除了目标之间的相位信息,测角精度只与目标幅度有关。当目标幅度差异较大时,小目标极易被大目标“遮掩”,在空间谱上难以分辨,严重影响测角精度。而运用参数法时,所有的参数均由极大似然估计得到,大目标对小目标的“遮蔽”影响得到极大的弱化。所以,当目标幅度相差较大时,参数法具有比子空间方法更好的测角性能。



(a) 对比算法  
(a) Algorithm for comparison



(b) 本文算法  
(b) Proposed algorithm

图 7 测角精度与相对复幅度的关系  
Fig. 7 Performance of angular estimation versus relative complex amplitude

### 3.4 测角精度与目标数的关系

在该实验中,考虑目标数从 1 增至 5。设定多个目标关于阵列法向对称分布,回波功率相同,信噪比均为  $SNR = 30$  dB,相邻目标的角度间隔均为  $\Delta u = 0.25u_{3\text{ dB}}$ ,相位差均为  $\Delta\varphi = \pi/6$ 。图 8 给出了本文方法 RMSE 与目标数的关系曲线。

可以看出:随着目标数的增多,测角精度急剧降低;当目标数为 1 时,自适应多零点单脉冲退化为阵列幅度和、差单脉冲,测角精度非常高;当目标数超过 4 时,估计误差接近于半个波束宽度。这是由于目标数增多,需要估计的参数更多,估计精度下降,当群目标数目较多时,只有在非常高的信噪比条件下才能实现精确测角。

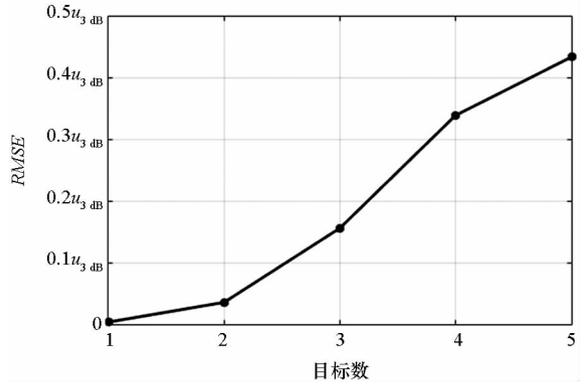


图 8 测角精度与群目标数的关系  
Fig. 8 Performance of angular estimation versus unresolved target number

## 4 结论

仿真结果表明:在较高信噪比条件下,本文所提算法可以精确测量三个目标角度,测角精度约为 0.15 倍波束宽度;但当群目标数较多或者目标相位差接近于 0 时,算法性能严重下降。在目标幅度相差较大的条件下,本文方法具有比子空间方法更好的测角性能。

无论是子空间方法还是参数化方法,都需要目标数目的先验信息,当目标数目估计不准时,测角性能将急剧下降。在群目标数目估计方面,参数化方法可以与目标参数模型匹配方法<sup>[15]</sup>相结合,通过估计的目标参数修正估计的目标数,以获得更好的目标数估计性能。

## 参考文献 (References)

- [1] 周万幸. 空间导弹目标的捕获和处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.  
ZHOU Wanxing. Capture and processing of spatial missile[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [2] Sherman S M, Barton D K. Monopulse principles and techniques[M]. 2nd ed. USA: Artech House, 2011: 187 - 223.
- [3] Lee S P, Cho B L, Lee S M, et al. Unambiguous angle estimation of unresolved targets in monopulse radar [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 2015, 51(2): 1170 - 1177.
- [4] Zheng Y B, Tseng S M, Yu K B. Closed-form four-channel monopulse two-target resolution [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 2003, 39(3): 1083 - 1089.
- [5] Blair W D, Brandt-Pearce M. Statistical description of monopulse parameters for tracking Rayleigh targets [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 1998, 33(4): 597 - 611.

## 参考文献 (References)

- [1] Munk B A. Frequency selective surfaces: theory and design [M]. USA: John Wiley & Sons, 2005: 1–46.
- [2] Joozdani M Z, Amirhosseini M K, Abdolali A. Wideband radar cross-section reduction of patch array antenna with miniaturised hexagonal loop frequency selective surface[J]. Electronics Letters, 2016, 52(9): 767–768.
- [3] Ruvio G, Leone G, Mattiello F. Analysis and characterization of finite-size curved frequency selective surfaces[J]. Studies in Engineering & Technology, 2015, 2(1): 9–21.
- [4] Costa F, Monorchio A, Manara G. Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2010, 58(5): 1551–1558.
- [5] Langley R J, Parker E A. Double-square frequency-selective surfaces and their equivalent circuit[J]. Electronics Letters, 1983, 19(17): 675–677.
- [6] Mittra R, Pelletti C, Tsitsas N L, et al. A new technique for efficient and accurate analysis of FSSs, EBGs and metamaterials [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2012, 54(4): 1108–1116.
- [7] Silva M W B, Kretly L C. An efficient method based on equivalent-circuit modeling for analysis of frequency selective surfaces [C]//Proceedings of the Microwave & Optoelectronics Conference, 2013.
- [8] 王秀芝, 高劲松, 徐念喜. 利用等效电路模型快速分析加载载集总元件的微型化频率选择表面[J]. 物理学报, 2013, 62(20): 421–425.
- [9] Han Y, Che W Q, Christopoulos C, et al. A fast and efficient design method for circuit analog absorbers consisting of resistive square-loop arrays [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(3): 747–757.
- [10] Costa F, Monorchio A, Manara G. Efficient analysis of frequency-selective surfaces by a simple equivalent-circuit model [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(4): 35–48.
- [11] Yang J, Shen Z X. A thin and broadband absorber using double-square loops [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6(11): 388–391.
- [12] Luo X F, Teo P T, Qing A, et al. Design of double-square-loop frequency-selective surfaces using differential evolution strategy coupled with equivalent-circuit model [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2005, 44(2): 159–162.
- [13] Shang Y P, Shen Z X, Xiao S Q. On the design of single-layer circuit analog absorber using double-square-loop array[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(12): 6022–6029.
- [14] Sudhendra C, Ramkumar M A, Rao K A R K. Design, analysis, and implementation of space cloth based on hexagonal resistor grid network of planar resistors [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2017, 27(11): 986–988.
- [9] Wang Xiuzhi, GAO Jinsong, XU Nianxi. Quick analysis of miniaturized-element frequency selective surface that loaded with lumped elements by using an equivalent circuit model[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 421–425. (in Chinese)
- [10] Costa F, Monorchio A, Manara G. Efficient analysis of frequency-selective surfaces by a simple equivalent-circuit model [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(4): 35–48.
- [11] Yang J, Shen Z X. A thin and broadband absorber using double-square loops [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6(11): 388–391.
- [12] Luo X F, Teo P T, Qing A, et al. Design of double-square-loop frequency-selective surfaces using differential evolution strategy coupled with equivalent-circuit model [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2005, 44(2): 159–162.
- [13] Shang Y P, Shen Z X, Xiao S Q. On the design of single-layer circuit analog absorber using double-square-loop array[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(12): 6022–6029.
- [14] Sudhendra C, Ramkumar M A, Rao K A R K. Design, analysis, and implementation of space cloth based on hexagonal resistor grid network of planar resistors [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2017, 27(11): 986–988.
- (上接第 6 页)
- [6] Blair W D, Brandt-Pearce M. Monopulse DOA estimation of two unresolved Rayleigh targets [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 2011, 37(4): 452–469.
- [7] Blair W D. Monopulse processing for tracking unresolved targets [M]. Dahlgren Division Naval Surface Warfare Center, 1997.
- [8] Glass J D, Blair W D. Detection of unresolved Rayleigh targets using adjacent bins [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2016.
- [9] Sinha A, Kirubarajan T, Bar-Shalom Y. Maximum likelihood angle extractor for two closely spaced targets [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 2002, 38(1): 183–203.
- [10] Stoica P, Nehorai A. Performance study of conditional and unconditional direction of arrival estimation [J]. IEEE Transaction on Acoustics Speech and Signal Processing, 1990, 38(10): 1783–1795.
- [11] White W D. Double null technique for low angle tracking [J]. Microwave Journal, 1976(19): 35–38.
- [12] 徐振海, 熊子源, 宋聃, 等. 阵列雷达双零点单脉冲低角跟踪算法[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(1): 130–135.
- XU Zhenhai, XIONG Ziyuan, SONG Dan, et al. Double-null monopulse low-angle tracking algorithm with array radar[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(1): 130–135. (in Chinese)
- [13] Wu J N, Xu Z H, Xiong Z Y, et al. Resolution of multiple unresolved targets via dual monopulse with array radar [C]//Proceedings of European Radar Conference, 2014.
- [14] Haykin S S, Litva J, Shepherd T J. Radar array processing[M]. Germany: Springer-Verlag, 1993: 73–74.
- [15] Nickel U. Application of superresolution for radar: example, problems and solutions [C]//Proceedings of 21st European Signal Processing Conference, 2015.
- [16] Nickel U. Overview of generalized monopulse estimation [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 2006, 21(6): 27–56.
- [17] Nickel U. Superresolution using an active antenna array [C]//Proceedings of the International Conference, 1982: 87–91.
- [18] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 159–161.
- WANG Yongliang, CHEN Hui, PENG Yingning, et al. Theory and algorithm of spatial spectrum estimation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 159–161. (in Chinese)
- [19] 粟塔山. 最优化计算原理与算法程序设计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003: 55–59.
- SU Tashan. Principle and algorithm program design of optimization calculation [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003: 55–59. (in Chinese)