

# 平面天线阵快速正交投影波束形成算法

王悦, 盛卫星, 陈向炜

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094)

**摘要:** 针对大型平面天线阵列下样本数据含有期望信号时, 正交投影(OP)波束形成算法不再适用的问题, 提出一种新的基于阻塞矩阵的正交投影快速波束形成算法。该算法首先构造阻塞矩阵从样本信号中阻塞掉期望信号, 再对阻塞后的样本信号进行施密特(GS)正交化得到重构后的干扰子空间, 最后在此基础上实现正交投影波束形成。新算法适用于任意阵型的二维均匀平面阵, 在小快拍数下能快速计算出自适应权重。仿真结果表明, 无论是弱干扰信号还是强干扰信号, 该算法都具有很好的抗干扰性能。

**关键词:** 平面阵; 阻塞矩阵; 正交投影; 快速波束形成

中图分类号: TN957.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2019)03-0339-06

## A Fast Orthogonal Projection Beamforming Algorithm for Planar Array

WANG Yue, SHENG Weixing, CHEN Xiangwei

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** For antenna array with large number of elements, the traditional orthogonal projection (OP) algorithm is no longer applicable in the case that the expected signal is contained in sample data. To solve this problem, a new fast orthogonal projection algorithm based on block matrix is proposed in this paper. First, a block matrix is developed to block the expected signal in sample signal. Secondly, the sample signals after blocking process are employed to reconstruct interference subspace utilizing Gram-Schmidt orthogonalization. Lastly, traditional orthogonal projection algorithm is followed. The new algorithm applies to uniform planar array of arbitrary structure and adaptive weights can be computed rapidly. Simulation results show that the new algorithm provides good performance whether for strong interference signal or weak interference signal with few snapshots.

**Key words:** planar array; block matrix; orthogonal projection; fast beamforming

## 0 引言

阵列信号处理中常采用自适应数字波束形成技术对各阵元加权, 达到增强期望信号, 抑制干扰信号的目的。近年来, 自适应数字波束形成在雷达、地震勘测、医疗、无线通信、语音处理等方面得到了越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。雷达系统中常采用大型平面天线阵列来获得大的天线增益, 提高作用距离, 但这导致了自适应算法运算量很大。为了满足雷达系统的实时性处理要求, 许多学者开展了快速数字波束形成算法研究。

大型天线阵列常采用子阵级自适应阵列处理

和降秩自适应阵列处理等部分自适应波束形成算法来减少计算量, 提高收敛速度<sup>[2]</sup>。文献[3]利用阵列接收的快拍数据来构造降秩矩阵中的干扰子空间, 具有很好的实时性, 然而该方法不适用于接收信号中含有期望信号的场景。文献[4]提出的基于GSC的快速降秩算法, 适用于接收信号中含有微弱期望信号的场景, 但当信噪比升高时, 下支路中阻塞矩阵无法完全阻塞期望信号, 导致输出信干噪比下降。部分自适应波束形成算法虽然能够快速计算出自适应权重, 但在快拍数据较多的情况下, 算法输出信干噪比性能明显降低。

针对接收信号含有期望信号的问题, 文献[5]提出了基于DOA估计的波束形成算法。然而当

干扰个数增加时,计算量也会随之增大。此外,当期望信号和干扰信号强度相当时,由于无法分辨出干扰信号和期望信号,DOA 估计失效,该方法不再适用。传统的正交投影波束形成<sup>[6]</sup>是一种快速波束形成算法,但是该方法只适用于接收信号中不含期望信号的场景。文献[7]提出用二项式对消构造阻塞矩阵的方法来阻塞掉期望信号,然后再进行正交投影波束形成。然而该阻塞矩阵构造方法只适用于一维线阵。

本文提出了一种适用于二维面阵的基于阻塞矩阵的正交投影快速数字波束形成算法,该方法适用于连续波体制、HPRF-PD 体制和 LFM 脉冲压缩等体制雷达。算法首先将采样数据进行二维阻塞矩阵预处理变换剔除掉期望信号,在此基础上再进行正交投影。该方法在低信噪比和高信噪比下均适用,计算量较小,能满足大型阵列实时性较高的要求。

## 1 信号模型

考虑一  $M$  行  $N$  列的矩形均匀平面阵列,如图 1 所示,图中黑点表示天线单元。从第一行第一个阵元开始向右以蛇形对阵元进行编号,共有  $MN$  个阵元。各阵元横向间距为  $d_x$ ,纵向间距为  $d_y$ 。有一个期望信号和  $L$  个互不相关的窄带干扰信号入射,则天线阵列在  $t$  时刻接收到的信号可表示为

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=0}^L s_i(t) \mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i) + \mathbf{N}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i) = [e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\beta_{1,i}} \cdots e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\beta_{n,i}} \cdots e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\beta_{MN,i}}]^T \quad (2)$$

$$\beta_{n,i} = A_{n,1}u_i + A_{n,2}v_i \quad (3)$$

$$u_i = \sin(\theta_i) \cos(\varphi_i) \quad (4)$$

$$v_i = \sin(\theta_i) \sin(\varphi_i) \quad (5)$$

式中,  $s_i(t)$  为干扰信号的复包络;  $\mathbf{N}(t)$  为噪声,这里假定为高斯白噪声;  $\mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i)$  为方位角、俯仰角分别为  $\theta_i$  和  $\varphi_i$  的干扰信号的导向矢量;  $A_{n,1}$  为第  $n$  个阵元的横坐标,  $A_{n,2}$  为第  $n$  个阵元的纵坐标;  $\lambda$  为接收信号波长。

阵列接收数据的相关矩阵为

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\} \quad (6)$$

实际应用中,通常用  $K$  次快拍数据估计协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H \quad (7)$$

式中,  $K$  为快拍数。

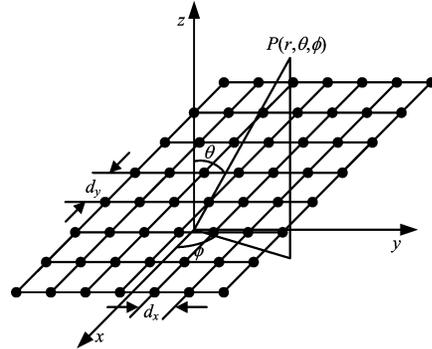


图 1 天线坐标系下平面阵列示意图

## 2 正交投影算法

在传统的正交投影算法中,接收信号不含有期望信号。考虑一  $M$  行  $N$  列的矩形均匀平面阵列,有  $L$  个互不相关的窄带干扰信号入射。由式(1)可知,天线阵列在  $t$  时刻接收到的信号可表示为

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^L s_i(t) \mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i) + \mathbf{N}(t) \quad (8)$$

文献[6]首先对快拍数据  $\mathbf{X}$  进行施密特正交化,施密特正交化过程如下:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_1 = \mathbf{X}(1) / \|\mathbf{X}(1)\| \\ \mathbf{V}'_n = \mathbf{X}(n) - \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{V}_i^H \mathbf{X}(n) \mathbf{V}_i \quad (2 \leq n \leq N) \\ \mathbf{V}_n = \mathbf{V}'_n / \|\mathbf{V}'_n\| \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\|\mathbf{X}(1)\|$  表示  $\mathbf{X}(1)$  的二范数,  $\mathbf{X}(n)$  表示第  $n$  个快拍数据,  $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1 \ \mathbf{V}_2 \ \cdots \ \mathbf{V}_N]$  为归一化正交基。

正交化后的  $\mathbf{V}_n$  可用于重构信号子空间,当训练数据中含有  $L$  个干扰源时,进行  $L$  次正交化即可得到由  $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1 \ \mathbf{V}_2 \ \cdots \ \mathbf{V}_N]$  重构的干扰子空间。干扰子空间重构完毕后,第  $(L+1)$  次正交化得到的是可以重构噪声子空间的正交向量,其能量理论上趋于 0。由于噪声的存在是一个映射于噪声子空间的较小值,因此选择适当的门限可以确定重构干扰子空间所需的  $\mathbf{V}_n$ <sup>[8]</sup>。即若

$$\|\mathbf{V}'_n\| \leq \Delta(k), 1 < k < N \quad (10)$$

停止正交化,则  $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1 \ \mathbf{V}_2 \ \cdots \ \mathbf{V}_N]$  为重构的干扰子空间的一组正交基。正交化自适应门限可以通过式(11)确定:

$$\begin{cases} \Delta(k) = (1.5\sigma_R)^2 \cdot 2N(1 + \sum_{i=1}^L \beta_{ki}^2) \\ \beta_{ki}^2 = \frac{|(\mathbf{X}(k), \mathbf{V}_i)|^2}{|\mathbf{V}'_i|^2} \end{cases} \quad (11)$$

最后将静态权矢量往干扰子空间上投影得到自适应权重,这就是正交投影波束形成算法:

$$w = w_q - \sum_{n=1}^L V_n^H w_q V_n \quad (12)$$

式中,  $w_q$  为阵列静态权矢量,  $V_n$  为干扰子空间的正交基。

由式(12)可以看出,自适应权重向量与干扰子空间正交,有信号对消的作用,因此当自适应权作用在快拍数据上,能够抑制干扰信号。若接收信号中含有期望信号时,重构的信号子空间为干扰信号子空间的期望信号子空间的和空间,  $w$  在对消干扰信号的同时,对期望信号也会有抑制作用。因此,正交投影波束形成算法只适用于采样数据中不含有期望信号的场景。然而许多雷达应用场景中,接收信号中除了干扰信号外,不可避免地存在期望信号。为了保证正交投影波束形成算法在小快拍数下的优良性能,本文提出了一种新的平面阵列阻塞矩阵的构造方法。将接收数据通过预处理,阻塞掉期望信号,在此基础上实现正交投影波束形成算法。

### 3 基于阻塞矩阵的快速正交投影波束形成算法

#### 3.1 阻塞矩阵

二维面阵中常见的阻塞矩阵构造方法如基于Householder变换的阻塞矩阵<sup>[9]</sup>、基于正交基变换的阻塞矩阵<sup>[10]</sup>、基于投影的阻塞矩阵<sup>[11]</sup>,作用于期望信号使其变为0的同时,也作用在干扰信号上,使干扰子空间发生变化,并不适用于正交投影

算法。这里以阻塞矩阵  $B = I - \frac{a_0 \times a_0^H}{\|a_0\|^2}$  为例,  $I$  为  $N \times N$  维的单位阵,  $a_0$  为期望信号导向矢量,  $\|\cdot\|$  为向量求模。该矩阵将接收信号投影到期望信号子空间的正交补空间,满足  $B \times a_0 = 0$ ,期望信号被阻塞,阻塞后的信号中只含有干扰和噪声,进行GS正交化后可以得到重构的干扰子空间。然而此时,干扰子空间已经发生了变化,如图2所示。将原接收信号(期望信号、干扰和噪声)  $OE$  往期望信号子空间的正交补空间投影时,干扰子空间也被投影到了期望信号的正交补空间上,即  $BE$ ,因此将静态权向量向现在的干扰子空间  $BE$  的正交补

空间投影时,投影错误,得到的还是静态权向量。因为与原干扰子空间  $OD$  相比,干扰子空间已经发生了变化。

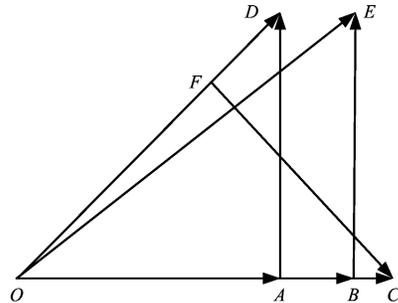


图2 信号子空间向量示意图

图2中  $OD$  为原干扰子空间,  $OE$  为原接收信号子空间(包含期望信号),  $BE$  为现干扰子空间,  $OC$  为期望信号子空间,  $FC$  为OP算法自适应权重。

如图3所示,本文提出的阻塞矩阵构造原理是:将阵元  $R$  接收数据(期望信号、干扰信号和噪声信号)与相位补偿后的阵元  $Q$ 、 $P$  的接收数据相对消得到阵元  $R$  接收数据中的干扰信号和噪声信号分量,以此来阻塞期望信号。

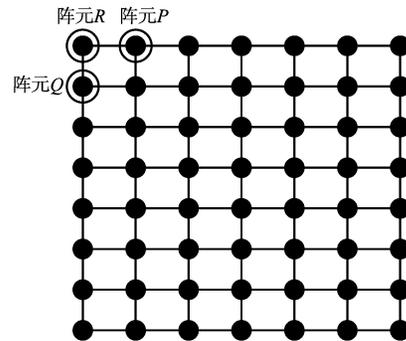


图3 二维平面阵列阵元分布

在  $M$  行  $N$  列矩形均匀面阵模型下,假设  $t$  时刻接收到的快拍数据矢量为  $x(t)$ ,则第  $R$  个阵元接收到的数据  $x_R$  可表示为

$$x_R = \sum_{i=0}^L s_i e^{j\beta_{R,i}} + n_R, R=1,2,\dots,MN \quad (13)$$

对  $x_R$  作如下处理:

$$x'_R = x_R - \frac{1}{2} x_Q e^{j(\beta_{R,0} - \beta_{Q,0})} - \frac{1}{2} x_P e^{j(\beta_{R,0} - \beta_{P,0})} = \sum_{i=0}^L s_i e^{j\beta_{R,i}} - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^L s_i e^{j\beta_{Q,i}} \cdot e^{j(\beta_{R,0} - \beta_{Q,0})} - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^L s_i e^{j\beta_{P,i}} \cdot e^{j(\beta_{R,0} - \beta_{P,0})} + n_R -$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \mathbf{n}_Q e^{j(\beta_{R,0} - \beta_{Q,0})} - \frac{1}{2} \mathbf{n}_P e^{j(\beta_{R,0} - \beta_{P,0})} = \\ & \sum_{i=1}^L \mathbf{s}_i e^{j\beta_{R,i}} \left[ 1 - \frac{1}{2} e^{j[(\beta_{Q,i} - \beta_{R,i}) + (\beta_{R,0} - \beta_{Q,0})]} - \right. \\ & \left. \frac{1}{2} e^{j[(\beta_{P,i} - \beta_{R,i}) + (\beta_{R,0} - \beta_{P,0})]} \right] + \mathbf{n}_R - \\ & \frac{1}{2} \mathbf{n}_Q e^{j(\beta_{R,0} - \beta_{Q,0})} - \frac{1}{2} \mathbf{n}_P e^{j(\beta_{R,0} - \beta_{P,0})} \quad (14) \end{aligned}$$

每个阵元都与相同位置的两个相邻阵元相消,当矩形阵列有均匀的横向和纵向间距时,1—

$$\mathbf{B}_{MN \times MN} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} e^{j(\beta_{1,0} - \beta_{2,0})} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} e^{j(\beta_{1,0} - \beta_{N+1,0})} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{1}{2} e^{j(\beta_{2,0} - \beta_{3,0})} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} e^{j(\beta_{2,0} - \beta_{N+2,0})} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -\frac{1}{2} e^{j(\beta_{n,0} - \beta_{n+1,0})} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & -\frac{1}{2} e^{j(\beta_{n,0} - \beta_{n+N,0})} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\beta_{n,0} = A_{n,1} u_0 + A_{n,2} v_0 \quad (17)$$

$$u_0 = \sin(\theta_0) \cos(\varphi_0) \quad (18)$$

$$v_0 = \sin(\theta_0) \sin(\varphi_0) \quad (19)$$

$\mathbf{B}$  为阻塞矩阵,  $A_{n,1}, A_{n,2}$  分别为第  $n$  个阵元的横纵坐标,  $(\theta_0, \varphi_0)$  为期望信号的指向。

该阻塞矩阵适用于任意阵型的二维面阵,利用填充的方式构造阻塞矩阵,计算量很小。

### 3.2 算法总结

现将基于阻塞矩阵预处理的正交投影算法的具体步骤归纳如下:

- 1) 取大于干扰数  $L$  的快拍数即可;
- 2) 用二项式对消法构造阻塞矩阵  $\mathbf{B}$  阻塞掉期望信号;
- 3) 直接对阻塞后的快拍数据进行施密特正交化,并同时用阈值判别法判断出干扰的个数,得到标准正交向量构成的干扰子空间;
- 4) 将期望信号的导向矢量向干扰子空间的正交补空间上投影得到自适应权重向量。

### 3.3 计算量分析

表 1 列出了本文算法的计算复杂度。传统的

$$\frac{1}{2} e^{j[(\beta_{Q,i} - \beta_{R,i}) + (\beta_{R,0} - \beta_{Q,0})]} - \frac{1}{2} e^{j[(\beta_{P,i} - \beta_{R,i}) + (\beta_{R,0} - \beta_{P,0})]}$$

为一个常数。因此,对于每个阵元数据,阻塞后的信号中只含有干扰和噪声,且干扰信号的相位没有改变,只是干扰信号的复包络乘上了一个常数值。对于均匀面阵而言,阻塞后有  $(MN - M - N + 1)$  个有效阵元数据。将式(14)写成矩阵形式:

$$\mathbf{x}(t)' = \mathbf{B} \cdot \mathbf{x}(t) \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{x}(t)' = [\mathbf{x}'_1 \ \mathbf{x}'_2 \ \mathbf{x}'_3 \ \cdots \ \mathbf{x}'_{MN}]^T$  为阻塞后的训练数据。

SMI<sup>[12]</sup>、ESB<sup>[13]</sup>算法,由于需要特征值分解,计算复杂度为  $O(N^3)$ ,十分不利于工程实现。本文算法复杂度为  $O(L^2 N)$ ,与 OP 算法相当,能够在有限时间内快速计算出自适应权重,在实际应用中具有更优的实时性,有利于算法的工程实现。

表 1 本文算法的计算复杂度

过程	复杂度
(1) 阻塞矩阵 $\mathbf{B}$ 构建	$O(N)$
(2) 阻塞矩阵预处理 $\mathbf{x}' = \mathbf{B} \cdot \mathbf{x}$	$O(KN)$
(3) 施密特正交化和阈值比较	$O(L^2 N)$
(4) 正交投影计算自适应权重	$O(LN)$

注:  $N$  为阵元数,  $L$  为干扰数,  $K$  为快拍数。

## 4 计算机仿真实验和性能分析

仿真一 考虑  $32 \times 32$  的矩形平面阵列,假定来自不同方向的远场窄带信号互不相关,信号与加性噪声也不相关。期望信号的到达方向为  $(10^\circ, 0^\circ)$ ,两个干扰的方向分别为  $(-25^\circ, 0^\circ)$ ,  $(50^\circ, 0^\circ)$ ,信噪比为 0 dB,干噪比为 30 dB。

图 4 为  $32 \times 32$  的矩形平面阵列的三维方向图。图 5 给出了接收信号中含有期望信号时用本

文算法、SMI 算法、ESB 算法和降秩 GSC 算法仿真得到的输出信干噪比随快拍数变化的曲线。为了更好地验证本文算法的有效性,还给出了接收信号中不含期望信号时 OP 算法的 SINR 曲线。

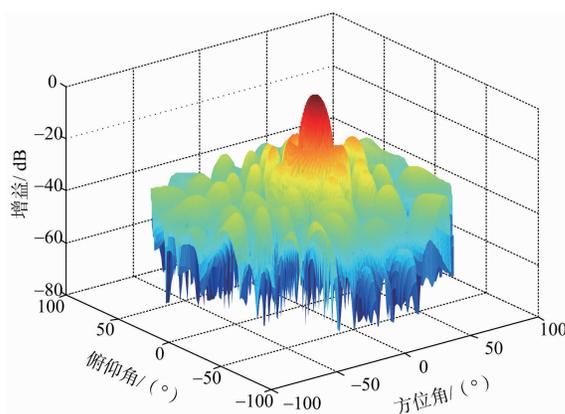


图4 32×32 矩形平面阵列三维方向图

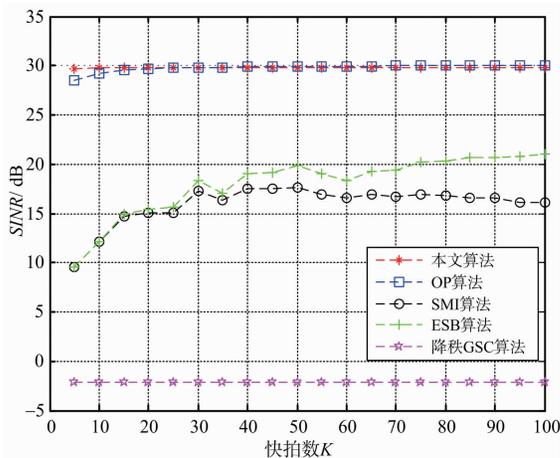
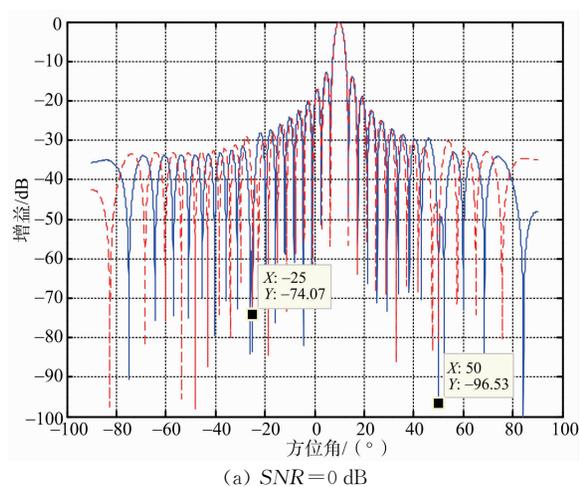


图5 阵列输出 SINR 随快拍数  $K$  变化曲线

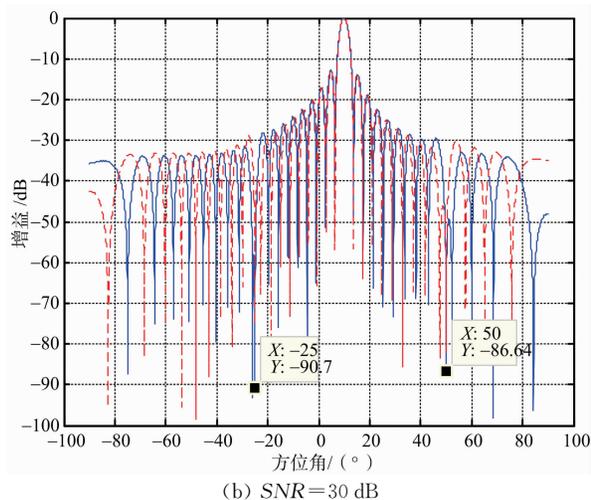
从图中可以看出,本文算法在小快拍数下 SINR 要优于 SMI 算法、ESB 算法,与传统的 OP 算法差不多,甚至比 OP 算法更为稳定,因为基于二项式对消法的阻塞矩阵对数据有平滑作用。由于在较高输入信噪比时,降秩 GSC 下支路的阻塞矩阵不能完全阻塞期望信号,导致上下支路对消时损失部分期望信号分量,输出信干噪比较低。

仿真二 考虑一  $32 \times 32$  的矩形平面阵列,假定来自不同方向的远场窄带信号互不相关,信号与加性噪声也不相关。期望信号的到达方向为  $(10^\circ, 0^\circ)$ ,两个干扰的方向分别为  $(-25^\circ, 0^\circ)$ ,  $(50^\circ, 0^\circ)$ ,干噪比为 30 dB,快拍数为 20。在不同信噪比下比较了样本信号中含有期望信号时采用本文算法和不含期望信号时采用正交投影算法得到的方向图,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,本文算法在零陷深度和旁瓣



(a) SNR=0 dB



(b) SNR=30 dB

图6 不同信噪比下阵列方向图

幅度方面,与不含期望信号时的 OP 算法性能相当。对比图 6(a)、图 6(b),在小快拍数下,无论是强信号还是弱信号,用本文算法都能得到良好的抗干扰性能,干扰处零深达到  $-70$  dB 以下。

## 5 结束语

传统的正交投影(OP)自适应数字波束形成算法计算量小,收敛速度快,但该算法只适用于采样信号中不含期望信号的场景,限制了其在雷达中的应用。本文针对平面阵列天线提出采用阻塞矩阵对接收信号进行预处理,阻塞掉期望信号,然后构造新的协方差矩阵,再进行正交投影波束形成。新算法适用于接收信号中含有期望信号的场景,无论是强信号还是弱信号下,输出 SINR 和方向图都能在小快拍数下迅速收敛,具有与接收信号中不含期望信号的 OP 算法相当的性能。

## 参考文献:

- [1] JARRETT D P, HABETS E A P, NAYLOR P A. Signal-Dependent Array Processing [M]. Germany: Springer, 2017:150-151.
- [2] 格西 J R. 雷达空时自适应信号处理[M]. 北京:北京理工大学出版社,2016:98-99.
- [3] 黄飞. 阵列天线快速自适应波束形成技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2010.
- [4] 黄飞,盛卫星,马晓峰. 基于广义旁瓣相消器的快速降秩自适应波束形成算法[J]. 兵工学报,2010,31(12):1637-1642.
- [5] ABOUTANIOS E, HASSANIEN A, AMIN M G, et al. Fast Iterative Interpolated Beamforming for Accurate Single-Snapshot DOA Estimation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(4):574-578.
- [6] HUNG E K I, TURNER R M. A Fast Beamforming Algorithm for Large Arrays [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 19(4):598-607.
- [7] 李宁涛,陶海红,廖桂生. 样本含有期望信号时的正交投影波束形成算法[J]. 雷达科学与技术,2007,5(4):246-249.
- [8] 肖丹,顾德仁. GS 正交算法中正交化次数的自动确定[J]. 电子科学学刊, 1995,17(1):79-85.
- [9] 王纯. 卫星导航接收机自适应抗干扰方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [10] 谢斌斌,王晓宇,姚懿玲. 基于正交基变换的旁瓣对消算法研究[J]. 导航定位与授时,2017, 4(4):87-91.
- [11] 王永良,丁前军,李荣锋. 自适应阵列处理[M]. 北京:清华大学出版社,2009:148-149.
- [12] AL-SADOON M, ABD-ALHAMEED R, ELFERGANI I T, et al. Weight Optimization for Adaptive Antenna Arrays Using LMS and SMI Algorithms[J]. Wseas Trans on Communications, 2016,15(10):206-214.
- [13] 李宇鹏. 基于 GPS 接收机的稳健波束形成技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.

## 作者简介:



王悦女,1998年生,江苏盐城人,南京理工大学阵列天线与阵列信号处理实验室硕士研究生,主要研究方向为阵列信号处理和自适应波束形成算法。  
E-mail:wangyue\_r@163.com

盛卫星男,1966年生,江苏南通人,南京理工大学工程与光电技术学院副院长,教授、博士生导师,主要研究方向为数字波束形成与智能天线和电磁散射特性建模及其应用。

陈向炜男,1992年生,江苏丹阳人,南京理工大学阵列天线与阵列信号处理实验室博士研究生,主要研究方向为阵列信号处理。

(上接第 338 页)

了利用窗函数截取具有功率互补特性的平方根升余弦函数来获取滤波器系数,进而设计出原型低通滤波器的方法。与传统单参数优化法相比,每一次迭代不需要重新设计滤波器,设计复杂度降低,同时原型滤波器的过渡带具有余弦滚降特性,滤波器组可以获得更好的重构性能。通过理论分析和仿真验证表明,本文的算法设计的原型滤波器在重构误差上优于传统的单参数优化法,具有良好的重构特性。

## 参考文献:

- [1] 杨宏飞. 宽带数字侦察接收机技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2015.
- [2] 胡君朋. 宽带无线信号侦测中的动态信道化技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2016.
- [3] 邵凯,计翔,庄陵,等. 认知无线电系统中调制滤波器组的设计[J]. 计算机应用,2014,34(2):329-332.
- [4] 杨玉琳,蒋俊正. 近似完全重构的 DFT 调制滤波器组迭代设计方法[J]. 桂林电子科技大学学报,2018,38(1):7-11.
- [5] 朱坤伦,孙鹏. 无源滤波器参数优化设计方法的研究[C]//第十三届沈阳科学学术年会,沈阳:[出版者不详],2016.
- [6] 张天骐,谭方青,高春霞,等. 一种新的窗函数法设计余弦调制滤波器组系统[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(12):2737-2742.
- [7] DATAR A, JAIN A, SHARMA P C. Performance of Blackman Window Family in M-Channel Cosine Modulated Filter Bank for ECG Signals[C]//2009 International Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies, Aligarh, India:IEEE,2009:98-101.
- [8] 王光宇. 多速率数字信号处理和滤波器组理论[M]. 北京:科学出版社,2013.

## 作者简介:



张超男,1993年生于陕西西安,中国人民解放军航天工程大学硕士研究生,主要研究方向为航天测控、高速数字信号处理。  
E-mail:zhangchao\_1003@163.com

马宏男,1976年生于新疆石河子,中国人民解放军航天工程大学副教授,主要研究方向为飞行器测控技术。

焦义文男,1985年生于河北香河,中国人民解放军航天工程大学讲师,主要研究方向为航天测控。