

基于波束域的子空间正交性测试 宽带 DOA 估计方法研究

李 焜 方世良

(东南大学水声信号处理教育部重点实验室, 南京 210096)

摘 要: 投影子空间正交性测试 (Test of Orthogonality of Projected Subspace; TOPS) 算法通过测试宽带信号各频率点上噪声子空间和信号子空间之间的正交性对目标方位进行到达角估计 (DOA: direction-of-arrival)。此算法对参考频点上的信号子空间的估计依赖性较大, 因此存在较多伪峰, 低信噪比条件下性能差等缺点。针对该问题, 提出一种基于波束域的宽带 DOA 估计方法。该方法通过将阵列接收信号转换到波束域, 在波束域中利用信号带宽内各频率分量的波束域方向向量与噪声子空间之间的正交关系构造判决向量, 根据判决向量搜索空间谱的极大值对应的角度进行 DOA 估计。该方法不需要进行角度预估, 避免了 TOPS 算法中常出现的伪峰, 降低了信噪比分辨门限, 减少了计算量, 具有较好的估计效果。将该方法分别运用到均匀圆阵和线阵上, 通过仿真对比和海试实验数据的处理, 证明了本文所提方法的有效性。

关键词: 阵列信号处理; 宽带信号; 到达角估计; 波束域方法; 投影子空间正交性测试算法

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)01-0131-08

Research on the wideband DOA estimation with test of orthogonality of subspace based on beamspace

LI Kun FANG Shi-liang

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Signal Processing of Ministry of Education,
Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The direction-of-arrival (DOA) can be estimated by measuring the orthogonal relation between the signal and the noise subspaces of multiple frequency components of the wideband signal with Test of Orthogonality of Projected Subspace (TOPS) algorithm. This algorithm largely depends on estimation of signal subspace of the reference frequency; therefore, it has some shortcomings such as more fake peaks, poor performance under low SNR and so on. To avoid these problems, a new direction of arrival (DOA) estimation method for wideband sources based on beamspace is proposed in this paper. In the proposed method, the array receiving data is firstly transformed to beamspace by beamspace transformation, and then the decision vector can be constructed by the orthogonal relation between the noise subspaces and steering vector of multiple frequency components of the wideband sources in beamspace, finally, the DOA can be estimated by searching the maxima of the pseudo spatial spectrum according to decision vector. The new method does not require initial focusing angles and avoid the fake peaks that often appear in TOPS algorithm. At the same time, the new method reduces not only the SNR resolution threshold but also the computational burden so that it has better performance than TOPS algorithm. Applying the method on a uniform linear array and circular array respectively, simulation results and sea-experiment demonstrate the effectiveness of the proposed method by comparing it with some wideband DOA estimation methods.

Key words: array signal processing; wideband sources; direction-of-arrival estimation; beamspace method; test of orthogonality of projected subspace algorithm

1 引言

在阵列信号处理中,对宽带信号源进行 DOA 估计已成为雷达、声纳等领域中一个很重要的研究方向。相对于窄带信号,宽带信号具有更宽的频带范围,因而较窄带信号处理方式更为复杂。对于宽带信号的 DOA 估计,主要有基于子空间的非相干处理方式和相干处理方式。非相干信号子空间 (ISS)^[1] 方法是将信号频带划分成若干窄子带,对每一个子带使用窄带信号子空间处理方法,然后再对各窄带估计效果进行组合得到宽带信号的方位。ISS 算法在高信噪比条件下具有很好的估计效果,但是在低信噪比条件下估计效果很差。Wang 和 Kaveh 等人提出了相干信号子空间算法 (CSS)^[2],该算法将宽带数据化成多个窄带分量,通过聚焦矩阵将各频率分量聚焦到参考频率上,再应用窄带子空间处理方式进行方位估计。CSS 算法相对 ISS 算法性能有了很大的提升,但该算法需要通过角度预估来构造聚焦矩阵,预估精度不高则聚焦效果会很差,从而影响 CSS 算法的性能。为更有效地进行 DOA 估计,人们对此种算法进行了广泛的研究,提出了一些不同的聚焦矩阵构造方法^[3-6],但大多数仍需要进行角度预估。文献[7-10]通过设计具有恒定主瓣响应的波束形成矩阵来进行 DOA 估计。但是设计具有恒定主瓣宽度的波束形成矩阵是一种较为困难的事情,很难真正做到在整个频段内都具有一致的主瓣响应且该方法一般所需要的阵元个数较大。

文献[11]针对非相干信号提出了一种新的称为投影子空间正交性测试 (TOPS) 的 DOA 估计算法。该方法通过构造一个与频率和角度有关的变换矩阵,由变换矩阵将参考频点上的信号子空间投影到各个频率和角度,再由这些投影构成新的矩阵,通过判断新矩阵的缺秩程度来进行 DOA 估计。该方法与以往的宽带 DOA 估计方法不同,它同时利用各个频点上的信息且不需要进行方位预估;但是参考频点处的信号子空间估计不准会影响到整个算法的性能,因此该算法极易出现伪峰。针对此问题,文献[12]提出了一种称为频域子空间正交性测试 (TOFS) 的算法,该方法根据构造的搜索向量与各频点噪声子空间的正交性来得到空间谱,避免了 TOPS 算法中常出现的伪峰。但是该方法只在高信噪比条件下有好的估计效果,在低信噪比条件下估计效果很差。本文借鉴文献[12]的思路,在其基础上,将波束域的方法引

入 TOFS 中,提出采用波束域的方法先对阵列信号进行预处理,再通过测试波束域方向向量与各频点噪声子空间之间的正交性进行目标方位角估计。新方法降低了信噪比分辨门限,使估计效果有了很大提高,同时减少了运算量。

2 宽带信号阵列模型

阵元数为 N 的传感器阵列接收到位于远场的 D 个信号源发出的信号,则第 m 个阵元接收的信号可以表示为:

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^D s_i(t - \tau_{i,m}) + n_m(t) \quad (1)$$

式中, $\tau_{i,m}$ 为第 i 个信号到达第 m 个阵元相对参考阵元的时间延迟, $n_m(t)$ 为阵元 m 上的加性噪声。将接收数据进行适当长度分段后,对每段数据作傅里叶变换,则阵列的输出可用频域表示为:

$$X(f_j) = A(f_j, \Theta_D) S(f_j) + N(f_j), \quad j=1, 2, \dots, J \quad (2)$$

式中, $X(f_j)$, $N(f_j)$, $S(f_j)$ 分别为频率 f_j 处的阵列输出信号向量,加性噪声向量以及原信号的傅里叶变换。 $A(f_j, \Theta_D) = [a(f_j, \theta_1), a(f_j, \theta_2), \dots, a(f_j, \theta_D)]$ 为阵列流形矩阵, $a(f_j, \theta_i) = [e^{-j2\pi f_j \tau_{i1}}, e^{-j2\pi f_j \tau_{i2}}, \dots, e^{-j2\pi f_j \tau_{iN}}]^T$ 为频率分量 f_j 对应的阵列流形向量。式(2)即为阵列接收宽带信号的模型。

3 投影子空间正交性测试 (TOPS) 算法

投影子空间正交性测试算法 (TOPS)^[11] 是一种新的宽带非相干信号 DOA 估计方法。该方法利用信号带宽内各频点信号子空间与噪声子空间的正交性来进行方位估计。TOPS 算法的处理方式与基于信号子空间的 ISS 算法和 CSS 算法不同,它同时利用了信号带宽内所有频点上的信息且不需要进行角度预估。文献[11]中指出频率和角度满足如下关系式时

$$f_k = f_i + f_j \quad (3)$$

$$\sin \theta_k = \frac{f_i}{f_k} \sin \theta_i + \frac{f_j}{f_k} \sin \theta_j \quad (4)$$

则对于阵列流形向量 $a(f_i, \theta_i)$, 存在矩阵 $\Phi(f_j, \theta_j)$ 使得

$$a(f_k, \theta_k) = \Phi(f_j, \theta_j) a(f_i, \theta_i) \quad (5)$$

式中 $\Phi(f_j, \theta_j) = \text{diag}\{a(f_j, \theta_j)\}$ 称为变换矩阵,通过变换矩阵 $\Phi(f_j, \theta_j)$, 就可以将给定频率和角度处的阵列流形向量转换为另一频率处的阵列流形向量。

令 $\Delta f = f_j - f_i$, F_i 为频率 i 处的信号子空间, ϕ 为可能的到达方向角,则由于 F_i 和 $A(f_i, \theta)$ 的列空间相同,

因此存在满秩矩阵 G_i , 使得

$$\Phi(\Delta f, \phi) F_i = \Phi(\Delta f, \phi) A(f_i, \theta) G_i = A(f_j, \hat{\theta}) G_i \quad (6)$$

从而有如下的等式成立

$$\Re\{\Phi(\Delta f, \phi) F_i\} = \Re\{A(f_j, \hat{\theta})\} \quad (7)$$

即 $\Phi(\Delta f, \phi) F_i$ 与 $A(f_j, \hat{\theta})$ 具有相同的值域, 式中 $\hat{\theta}$ 的取值与 ϕ 有关。

定义 $U_i(\phi)$ 是维数为 $N \times D$ 的矩阵, $U_i(\phi) = \Phi(\Delta f_i, \phi) F_0$, $\Delta f_i = f_i - f_0$, F_0 为所选参考频点上的信号子空间, 则可构造如下的矩阵 $D(\phi)$

$$D(\phi) = [U_1^H W_1 \quad U_2^H W_2 \cdots U_{J-1}^H W_{J-1}] \quad (8)$$

式中, W_i 为第 i 个频点的噪声子空间。

可以证明^[11], 当 ϕ 为阵列流矩阵中的某一角度时, 矩阵 $D(\phi)$ 将缺秩, 通过矩阵的最小奇异值来度量秩的缺损情况从而进行目标方位的判断, 这就是 TOPS 算法的基本思想。

4 基于波束域的 TOFS 算法

由以上的分析可知, TOPS 算法构造的矩阵与参考频点处的信号子空间 F_0 有关, F_0 估计的好坏直接影响整个算法的性能。因此, 使用 TOPS 算法进行 DOA 估计会出现较多的伪峰, 在低信噪比条件下估计性能较差。文献[12]提出了称为 TOFS 的算法, 此算法不需要满足 TOPS 算法中关于频率和角度的限制条件, 用来消除伪峰, 取得了一定的效果。但此方法只有在较高的信噪比条件下才能达到一定的估计效果, 低信噪比条件下性能很差。针对这一问题, 本文在文献[12]的基础上提出采用波束域的方法进行预处理来提高估计的性能, 通过对数据进行波束域预处理, 可以减小计算量, 降低信噪比分辨门限, 从而获得良好的估计效果。

采用基于波束域的 TOFS 算法首先对某空间区域形成 B 个波束, 对宽带信号中的第 k 个频率分量, 构造对应于频率 f_k 的波束形成加权矩阵 T_k , 通过矩阵变换将阵元域数据转化成波束域数据

$$\begin{aligned} Y(f_k) &= T_k^H X(f_k) \\ &= T_k^H A(f_k, \Theta_D) S(f_k) + T_k^H N(f_k) \\ &= B(f_k, \Theta_D) S(f_k) + N_B(f_k) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $B(f_k, \Theta_D) = [b_k(\theta_1) \quad b_k(\theta_2) \cdots b_k(\theta_D)]$ 为波束域响应矩阵, $b_k(\theta_i)$ 为相应的波束域响应向量, $N_B(f_k)$ 是波束域噪声向量。则频率 f_k 处波束域数据的协方差矩阵可以表示为

$$\begin{aligned} R_y(f_k) &= E\{Y(f_k) Y^H(f_k)\} \\ &= B(f_k, \Theta_D) R_s(f_k) B^H(f_k, \Theta_D) + \sigma^2 I D_k^H T_k \\ &= B(f_k, \Theta_D) R_s(f_k) B^H(f_k, \Theta_D) + R_v(f_k) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $R_v(f_k)$ 为频率 f_k 处的波束域噪声的协方差矩阵。对波束域的矩阵束 $(R_y(f_k), R_v(f_k))$ 进行特征值分解求出较大的 D 个特征值对应的波束域信号子空间 F_{Bk} 与较小的 $B-D$ 个特征值对应的波束域噪声子空间 W_{Bk} 。将波束域的响应向量与噪声子空间相乘, 则在波束域中有如下的正交性条件成立

$$b_k^H(\theta) W_{Bk} = 0^T \quad (11)$$

由于噪声的影响上式结果不会成立, 因此需要根据其到 0 的距离来进行方位估计, 可构造各个频点的标量 $U_{k,\theta}^B = b_k^H W_{Bk} W_{Bk}^H b_k$, 通过 $U_{k,\theta}^B$ 生成新的判决向量 $D(\theta)$:

$$D(\theta) = [U_{1,\theta}^B, U_{2,\theta}^B, \cdots, U_{J,\theta}^B] \quad (12)$$

根据 $D(\theta)$ 中各元素与零之间的距离来对目标进行方位角估计。

综上, 本文所提的基于波束域的宽带 TOFS 算法的步骤可以描述如下:

1. 对阵列接收数据分段并对各段数据作 FFT 变换, 得到频域数据快拍;
2. 对每个频点设计覆盖观测方位的 B 个波束, 构造波束形成矩阵 T_k ;
3. 利用波束形成矩阵 T_k 将阵元域数据转换成波束域数据, 估计出波束域数据协方差矩阵 R_y 和波束域噪声协方差矩阵 R_v ;
4. 对各频点的波束域数据协方差矩阵 R_y 和噪声协方差矩阵 R_v 进行特征值分解, 得到各频点的波束域信号子空间 F_{Bk} 与噪声子空间 W_{Bk} ;
5. 由波束域响应向量及噪声子空间, 对波束域内每一个可能的到达方位角构造判决向量 $D(\theta) = [U_{1,\theta}^B, U_{2,\theta}^B, \cdots, U_{J,\theta}^B]$, 其中, $U_{k,\theta}^B = b_k^H W_{Bk} W_{Bk}^H b_k$;
6. 根据判决向量在波束空间中搜索 $\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \frac{1}{\sigma(\theta)}$, 完成目标方位的估计, $\sigma(\theta)$ 的取值为 $D(\theta)$ 中各元素平方和的平方根。

5 实验

为说明本方法更具有一般性, 我们对水声阵列中常用到的均匀圆形阵列进行计算机仿真并对一组线列阵接收到的海试数据进行处理。考虑一个由 $N=16$ 的全向阵元组成的均匀圆阵, 阵列所接收的宽带信号的频率范围为 1KHz ~ 2KHz, 覆盖一个倍频程, 中心频率

为 1.5 KHz。圆阵半径为 $\lambda_{\min}/(4\sin(\pi/N))$, λ_{\min} 为最高频率对应的波长。宽带源信号为高斯平稳随机过程, 噪声为空域不相关的高斯白噪声。将阵列接收到的数据划分成 50 段, 每段数据进行 256 点 FFT 后划分成 33 个频率分量。在 $[-\frac{4}{16}, \frac{4}{16}]$ 的区域内以 $\frac{2}{16}$ 弧度为间隔形成 5 个指向波束方向的常规预处理波束。

实验 1 去除伪峰值的效果比较

考虑三个等功率的信号源信噪比均为 15 dB, 入射方位为 -4° 、 1° 和 20° 。分别对本文提出的方法(图中标记为 BTOFS)和 TOPS 方法以及文献[12]所提的 TOFS 方法进行仿真, 观察去除伪峰值的效果, 如图 1 所示。

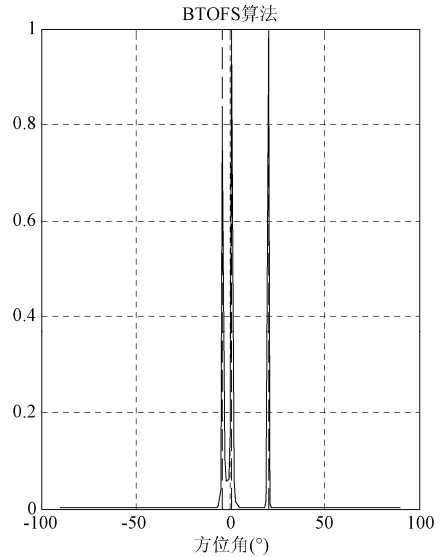
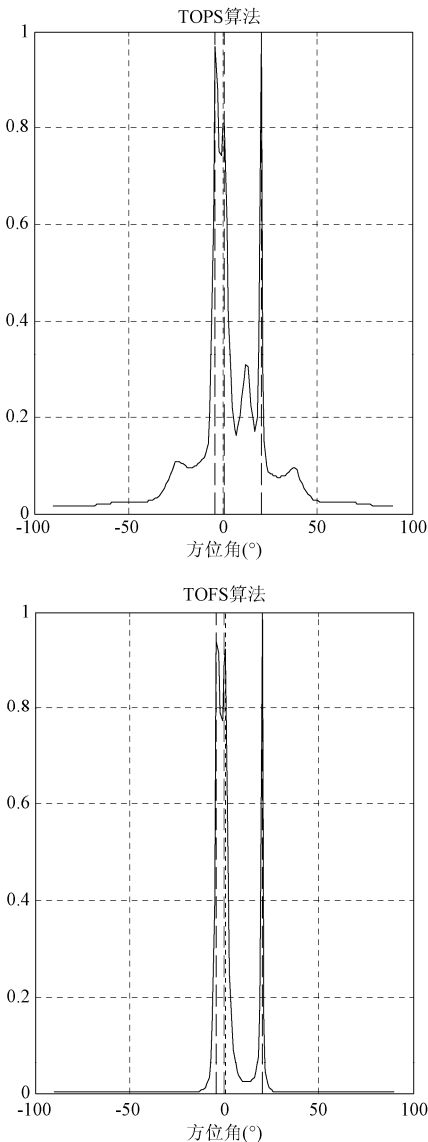


图 1 三种算法的方位估计结果

Fig. 1 DOA estimation result of three algorithms

由图所示, TOPS 方法虽然可以获得较为准确的估计效果, 但此算法存在较多的伪峰, 而 TOFS 方法与 BTOFS 方法都没有出现伪峰, 但 BTOFS 方法的峰值更为尖锐。

实验 2 分辨率及估计精度的比较

考虑两个信号源, 入射方向分别为 -4° 和 1° , 比较本文的方法和 TOFS 方法以及 TOPS 方法在不同信噪比条件下的分辨概率以及均方根误差。作为对比, 仿真中也对宽带信号估计中的 ISS 算法、CSS 算法进行了仿真。每种算法进行 200 次独立试验。其中, CSS 算法采用文献[3]所提到的酉聚焦来构造聚焦矩阵, 使用常规波束形成进行角度预估, 取预估附近的三个点作为聚焦角度来进行 DOA 估计。图 2 为两信号源在不同信噪比条件下的分辨概率和均方根误差。其中分辨概率的定义为: 对于某单次试验, 若估计出的两信号源的方位 $\hat{\theta}_1$ 和 $\hat{\theta}_2$ 满足如下的关系式成立时

$$|\hat{\theta}_1 - \theta_1| + |\hat{\theta}_2 - \theta_2| < |\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2| \quad (13)$$

则称该试验中两信号源能够正确分辨。对于均方根误差, 取值为两信号源在能够正确分辨时方位估计均方根误差的平均值。

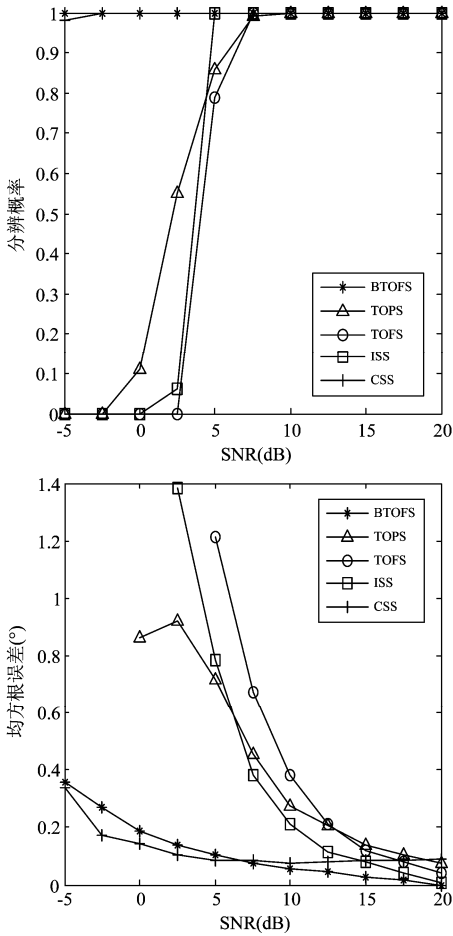


图 2 不同信噪比条件下五种算法的分辨概率以及均方根误差
 Fig. 2 RMSE and Probability of resolution of five algorithms for different SNR values

由图 2 可以看出五种方位估计算法中,当信噪比较高时都具有好的估计效果;但当信噪比较低时, TOPS 算法和 TOFS 算法以及 ISS 算法无法对目标进行正确的分辨,而 CSS 算法和本文提出的 BTOFS 算法都具有较低的信噪比分辨门限,低信噪比目标方位分辨概率要高于其余三种算法,同时均方根误差也小于其余三种算法。但是 CSS 算法的性能是建立在准确的预估方位之上的,预估角度的好坏直接影响方位估计的性能,而 BTOFS 算法无需进行角度预估。

为了进一步考察本文的方法在低信噪比条件下的性能,将两信号源之间的角度间隔增大到 10° ,入射方位改为 -5° 和 5° ,进行 100 次独立试验,图 3 给出了信噪比为 -5dB 时三种算法正确估计目标方位次数的统计直方图。

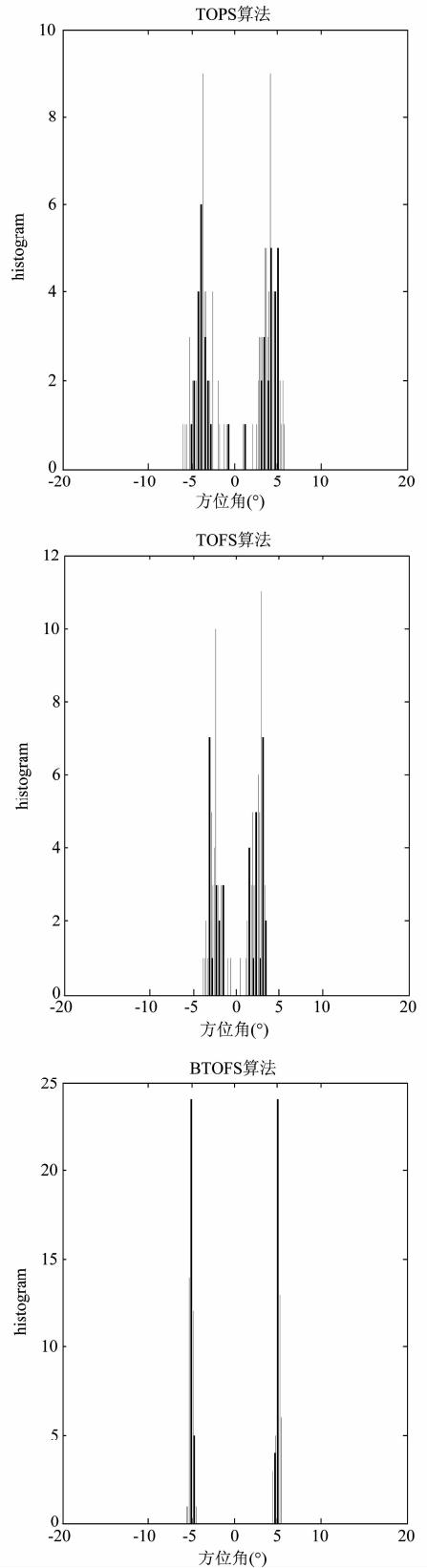


图 3 三种算法方位估计的直方图
 Fig. 3 Histogram of the DOA estimation for three algorithms

由图3可以明显地看出,在低信噪比的条件下, TOPS算法和 TOFS算法的估计效果较差,而 BTOFS算法仍能正确地反映目标方位。表1给出了方位间隔为 10° ,信噪比为 -10dB ,入射角度分别为 -5° 和 5° 以及 -3° 和 7° 时, BTOFS算法方位估计的均值(Mean)、方差(Var)和标准差(Std)。当信噪比变为 -10dB 时,对于 TOPS算法和 TOFS算法已无法对两源进行分辨,从而不能进行正确的方位角估计,故没有统计相应的方位估计结果,而 BTOFS算法仍可获得一定的估计效果。

表1 BTOFS算法方位估计的均值、方差和标准差

Tab.1 Mean, Var and Std for the BTOFS algorithm

DOA	BTOFS		
	Mean	Var	Std
-5°	-4.463	3.0076	1.7342
5°	4.542	1.9223	1.3865
-3°	-2.586	1.0109	1.0054
7°	6.528	1.2687	1.1264

实验3 复杂度分析

此实验考虑本文提出的方法与 TOPS和 TOFS算法在计算量上的差异。对于 TOPS算法需要进行 $J \times K$ 次特征值分解和 K 次奇异值分解(其中 K 为观测区域

内的方位点数)再进行一次谱搜索,由于是在阵元域中进行处理,则特征值分解的计算量为 $O(N^3)$; TOFS算法同样需要在阵元域中进行 $J \times K$ 次特征值分解,由于所构造的判决矩阵变为向量因此不需要进行奇异值分解,运算量有了一定的下降;本文提出的基于波束域的 BTOFS算法需要进行 $J \times K$ 特征值分解再进行一次谱搜索,同样不需要奇异值分解,但由于是在波束域中进行处理,因此运算量降为 $O(B^3)$,大大地降低了运算所需的时间。

实验4 本方法与宽带波束域方位估计算法的区别

考虑两种宽带波束域方位估计算法:波束域非相干子空间算法(BS-ISS)和波束域相干子空间算法(BS-CSS),比较它们方位估计的结果与本方法的差异。对于 BTOFS算法而言,在进行方位估计时,对观测区域中的每一个方位角需要用到频带内所有频点上的信息来进行判决,充分利用了宽带信号多个频点的信息;而 BS-ISS算法则是在各频点上使用窄带波束域 MUSIC算法进行方位估计,最后进行统计平均得到宽带信号方位,由于未充分利用宽带信号的全部信息,估计结果会有一定的影响。图4给出了 BTOFS算法和 BS-ISS算法在信噪比分别为 0dB 和 10dB 时的空间谱。由图可以看出, BTOFS算法方位谱的谱峰要比 BS-ISS算法更加的尖锐;在低信噪比条件下,比 BS-ISS算法估计效果要好。

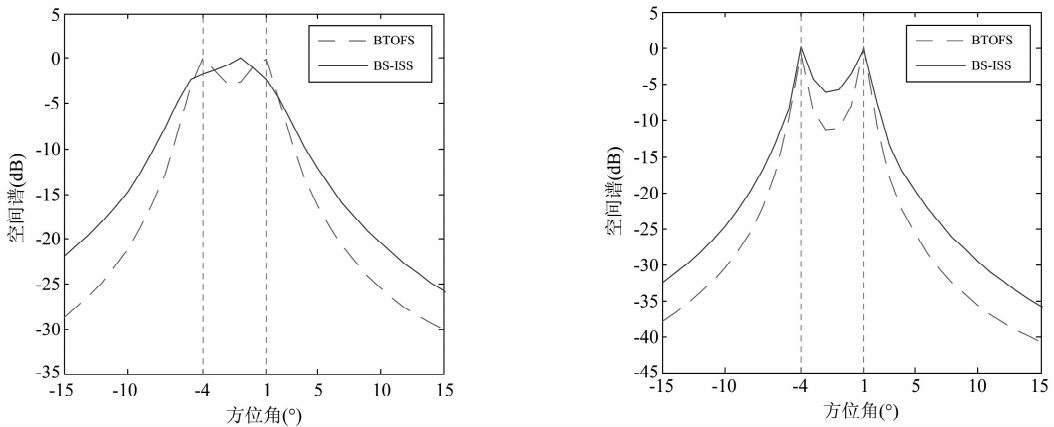


图4 两种算法方位估计的空间谱(左 0dB ,右 10dB)

Fig.4 DOA estimation result for the BS-ISS and BTOFS algorithm (left: SNR=0dB, right: SNR=10dB)

对于 BS-CSS算法,我们借鉴文献[8]和文献[9]的方法,对均匀圆阵设计具有恒定主瓣响应的波束形成加权矩阵来进行方位估计,图5给出了 $\text{SNR}=0\text{dB}$ 时两种方法的仿真结果。

从仿真结果可以看出,在本文的仿真参数条件下,两种方法的方位估计结果均出现了不同程度的偏差。

文献[8]利用 Bessel 函数近似表示各频点信号方向向量,在求解时会出现矩阵奇异的现象,导致所设计的恒定束宽波束出现偏差,影响最终的方位估计结果。而文献[9],采用了凸优化的方法来设计波束域加权矩阵,性能上比文献[8]有了提高。但是采用此种方式设计具有恒定主瓣响应的波束计算量很大,且在具

体操作时,所需的约束参数选择没有统一的标准,会造成凸优化问题无解的情况发生,当不能保证在整

个频段内都具有一致的主瓣响应时,方位估计的效果会下降。

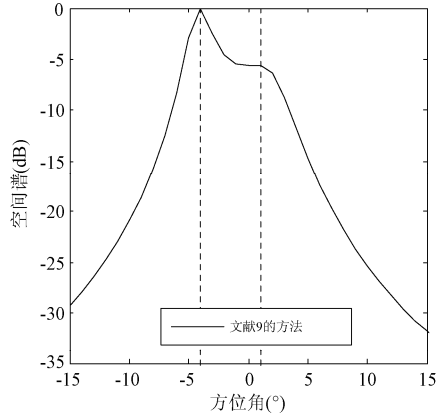
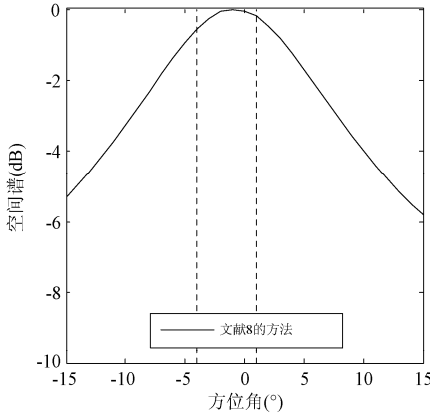


图 5 两种 BS-CSS 算法方位估计结果的空间谱

Fig. 5 DOA estimation result for the BS-CSS algorithm

实验 5 海试数据处理

为检验本文提出的方法在实际中的应用效果,对某次实验的海试数据进行处理来验证本文所提算法的性能。海水深度为 1800m,声速 $c=1500\text{m/s}$,阵列结构为均匀线列阵,阵元个数为 40,阵列深度为 50m,工作频率为 1KHz ~ 2KHz,接收远场的多个目标源辐射的信号。该数

据的功率谱如图 6(左)所示。由功率谱图可以看出,在处理频段内该谱具有每倍频程约 6dB 的衰减,两目标源入射方位分别为 5°和 14°。使用 BTOFS 算法对此数据进行处理,相应的结果如图 6(右)所示,便于比较图中也给出了 TOPS 算法和 TOFS 的空间谱。由图 6 可以看出,使用 BTOFS 算法方位估计的峰值较为尖锐且不易出现伪峰。

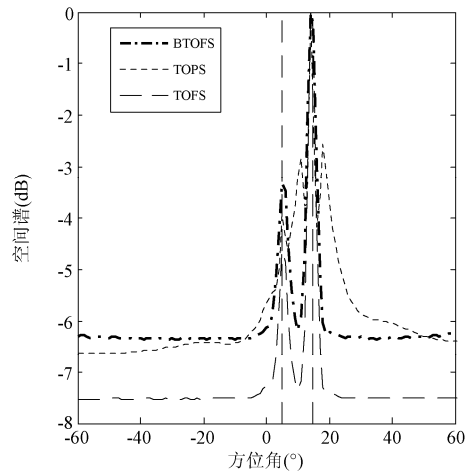
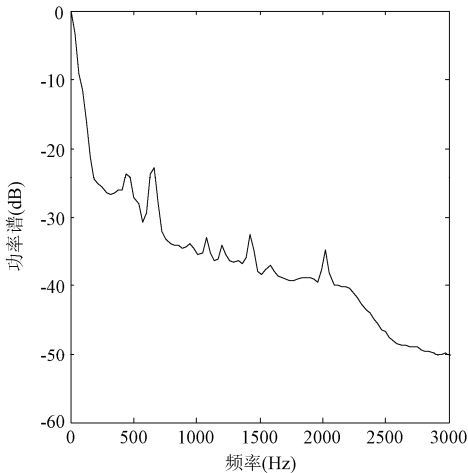


图 6 目标源辐射的功率谱(左)以及方位估计的空间谱(右)

Fig. 6 Power spectrum from the underwater target radiated noise(left) and spatial spectrum of the DOA estimation(right)

6 结论

本文针对 TOPS 算法存在较多伪峰且低信噪比条件下估计效果不理想提出一种基于波束域的子空间正交性测试宽带 DOA 估计方法。该方法将阵列接收数据变换到波束域,在波束域中对观测区域内的每一个

方位角通过测试各频点上波束域搜索向量与噪声子空间之间的正交性来实现对目标方位的估计。计算机仿真表明,该方法降低了信噪比分辨门限,较 TOPS 算法和 TOFS 算法性能有了很大的提高,在低信噪比条件下可获得较好的估计效果;在中高信噪比条件下与相干信号子空间方法估计效果相当,但是不需要进行角

度预估和构造聚焦矩阵,极大地降低了计算量,减少了运算时间。本方法在进行方位估计时同时利用宽带信号多个频点上的信息,估计效果要优于波束域非相干子空间算法;同时在计算量以及处理方式上也比波束域相干子空间算法简单。另外,仿真中采用了水声阵列中常用到的均匀圆形阵列并对线阵的海试数据进行了处理,证明了本文提出的方法不受阵列结构的限制,可以处理对于非相干信源目标方位估计的问题。

参考文献

- [1] Wax M, Shan T J, Kailath T. Spatio-temporal spectral analysis by eigenstructure methods [J]. IEEE Trans on ASSP, 1984, 32(4):817-827.
- [2] Wang H, Kaveh M. Coherent signal-subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wideband sources [J]. IEEE Trans, on ASSP, 1985, 33(4):823-831.
- [3] Hung H, Kaveh M. Focusing matrices for coherent signal-subspace processing [J]. IEEE Trans. On ASSP, 1988, 36(8):1272-1281.
- [4] Doron, M A, Weiss A J. On focusing matrices for wideband array processing [J]. IEEE Trans. on SP, 1992, 40(6):1295-1302.
- [5] Valaee S, Champagne B, Kabal P. Localization of wideband signals using least-squares and total least-squares approaches [J]. IEEE Trans. on SP, 1999, 47(5):1213-1222.
- [6] Sellone F. Robust Auto-focusing Wideband DOA Estimation [J]. Signal Processing, 2006, 86:17-37.
- [7] Ward D B, Ding Z, Kennedy R A. Broadband DOA estimation using frequency invariant beamforming [J], IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(5):1463-1469.
- [8] Yang Y X, Sun C, Wan C R. Theoretical and experimental studies on broadband constant beamwidth beamforming for circular arrays [C]. IEEE Oceans 2003 Conference Proceedings, San Diego, USA, 2003, 3:1647-1653.
- [9] Yan S F. Broadband Beamspace DOA Estimation: Frequency-Domain and Time-Domain Processing Approaches [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2007, 1-10.
- [10] Chan S C, Chen H H. Uniform concentric circular arrays with frequency-invariant characteristics-theory, design, adaptive beamforming and DOA estimation [J], IEEE Trans on Signal Processing, 2007, 55(1):165-177.
- [11] Yoon Y S, Kaplan L M, McClellan J H. TOPS: New DOA Estimator for Wideband Signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(6):1977-1989.
- [12] 于红旗, 徐欣, 黄知涛, 周一宇. 一种新的宽带 DOA 估计方法 [J]. 信号处理, 2009, 25(1):118-121.
Yu Hong-Qi, Xu Xin, Huang Zhi-Tao, Zhou Yi-Yu. A New Method for Wideband DOA Estimation [J]. Signal Processing. 2009, 25(1):118-121 (in Chinese).

作者简介



李焜(1981-),男,山西太原人,东南大学信息与通信工程专业博士研究生,主要研究方向为水声信号处理等。
E-mail:kunzai_007@163.com



方世良(1959-),男,江苏常州人,东南大学水声信号处理教育部重点实验室教授,博士生导师。
E-mail:sllfang@seu.edu.cn