

一种基于加权 TOPS 的宽带 DOA 估计新方法

陈明建 胡振彪 陈林

(国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230037)

摘要: 针对投影子空间正交性测试 (Test of orthogonality of projected subspaces, TOPS) 对宽带信号波达方向估计 (Direction-of-arrival, DOA) 存在角度分辨率较低, 且易出现伪峰的问题, 提出了一种加权 TOPS 的宽带 DOA 估计新方法。该方法通过最大化各频率点信号子空间与噪声子空间特征值区分度选择参考频点, 同时利用信号子空间投影代替其零空间投影; 然后利用正交频率子空间测试法 (Test of orthogonality of frequency subspaces, TOFS) 对平方 TOPS 法的判定矩阵进行加权修正; 最后对判定矩阵求迹实现宽带 DOA 估计, 避免了奇异值分解。与现有的 TOPS 法、平方 TOPS 以及 TOFS 相比, 该方法提高 DOA 估计精度, 能够有效剔除伪峰, 降低了算法复杂度, 且对间隔相近信源 DOA 估计分辨率更高。仿真实验结果验证了该方法的有效性。

关键词: 阵列信号处理; 波达方向估计; 宽带信号; 正交投影子空间

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

New Direction-of-Arrival Estimation Method for Wideband Sources Using Weighted TOPS

Chen Mingjian, Hu Zhenbiao, Chen Lin

(College of Electrical Engineering, National University of Defense Technology, Hefei, 230037, China)

Abstract: Classical test of orthogonality of projected subspaces (TOPS) method is exposed to performance breakdown as the spurious peaks can largely appear in the pseudo spectrum. Here a new direction-of-arrival estimation method for wideband sources using weighted TOPS is introduced. First, it uses the single signal subspace of the reference frequency, where the difference between the smallest signal eigenvalue and the largest noise eigenvalue is the maximum. The proposed weighted TOPS uses the squared TOPS method and test of orthogonality of frequency subspaces (TOFS) method to improved DOA estimation performance, which can obtain the weighted matrix by suitable modification to extend the effectiveness of TOPS. Moreover, the weighted TOPS method uses signal subspace projection instead of null-space projection. Finally, direction-of-arrival estimation for wideband sources are estimated by using trace as performance metric instead of singular value decomposition in TOPS. Comparison of TOPS, squared TOPS and TOFS method, the proposed weighted TOPS can achieve reduction in spurious peaks, improve DOA estimation accuracy, and obtain better computational efficiency and resolution performance for closely spaced sources. Numerical simulations validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: array signal processing; direction of arrival (DOA) estimation; wideband signal; test of

orthogonality of projected subspaces (TOPS)

引言

宽带信号由于具有抗干扰能力强、分辨率高等特点,已在雷达、声纳、医学成像等领域得到了广泛应用。宽带信号波达方向(Direction of arrival, DOA)估计一直是阵列信号处理的重要内容^[1]。传统基于子空间类的空间谱估计技术,如多信号分类法(Multiple signal classification, MUSIC)^[2]、旋转子空间不变法(Estimation of signal parameters via rotational invariant techniques, ESPRIT)^[3-4]以及子空间拟合法^[5]均假设信源为窄带信号。针对宽带信号的DOA估计主要分为两类:非相干子空间法(Incoherent signal-subspace method, ISSM)和相干子空间处理法(Coherent signal-subspace method, CSSM)^[6],其中ISSM方法只有在高信噪比条件下具有较好的估计效果,且不能处理相干信源;CSSM方法在低信噪比条件下估计性能优于ISSM法,但该方法需要角度预估计和预选参考频点,DOA估计准确性易受这些先验信息影响。近些年来,学者们基于阵列信号空间稀疏特性,将稀疏重构的思想应用到DOA估计中,提出了很多基于稀疏表示与重构的DOA估计方法^[7-10],具有很好的估计精度和空间分辨能力。但这类方法的关键在于如何正确建立宽带信号稀疏模型和选择合适稀疏重构算法,算法的性能依赖于模型参数。

Yoon等^[11]提出了一种投影子空间正交性测试(Test of orthogonality of projected subspaces, TOPS)算法,该算法无需角度预估计,但该方法若选择参考频点处信号子空间估计不准确,会造成谱峰搜索过程中出现伪峰。Shaw等^[12]对TOPS法进行了修正,一定程度上降低了噪声对谱峰搜索影响,但伪峰问题依旧存在。Okane等^[13]提出了平方TOPS方法,提高了DOA估计精度;Hayashi等^[14]对平方TOPS进行加权修正,进一步改善了算法性能,避免了伪峰,但该方法复杂度较高。Yu等^[15]提出了基于频域子空间正交性测试的宽带DOA估计方法,避免了TOPS方法中常见的伪峰,但该方法在低信噪比时DOA估计不准确,且对空间信源间隔相近时分辨率较差。

针对传统TOPS算法DOA估计精度不高,且易出现伪峰问题,提出了一种基于加权TOPS宽带DOA估计新方法。该方法首先通过选择最优频率点的信号子空间,同时利用信号子空间投影代替其零空间投影;然后根据导向矢量与噪声子空间的正交性,结合TOPS方法优点,对平方TOPS判定矩阵进行加权处理,得到修正后TOPS算法;最后对判断矩阵求迹运算实现宽带DOA估计。该方法无须奇异值分解,极大减少了运算量,能够有效剔除伪峰,提高DOA估计精度,且对信源来波方向相近时分辨能力更高。

1 宽带信号模型

考虑远场空间存在 K 个宽带信号,信号带宽均为 $B=[f_L, f_H]$,以角度 $\theta=[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K^T]$ 入射到由 M 阵元组成的均匀线阵上,阵元间距 d 为最高频率对应半波长,则第 m 号阵元接收到的信号为

$$x_m(t) = s_k(t - \nu_m \sin \theta_k) + n_m(t) \quad m = 1, \dots, M \quad (1)$$

式中: $s_k(t)$ 为第 k 个宽带信号, $\nu_m = (m-1)d/c$, c 为光速, $n_m(t)$ 为零均值,方差为 σ_n^2 的复高斯白噪声。

对接收数据 $x_m(t)$ 做离散时间傅里叶变换,将其划分为 J 个子带,即表示为

$$X_m(f_j) = S_k(f_j) \exp(-j2\pi f_j \nu_m \sin \theta_k) + N_m(f_j) \quad j = 1, \dots, J \quad (2)$$

将所有阵元输出 $X_m(f_j)$ 写成矩阵形式为

$$X(f_j) = A(f_j, \theta)S(f_j) + N(f_j) \quad (3)$$

式中 $A(f_j, \theta)$ 表示频点 f_j 处阵列流型矩阵, 其列向量为 $a(f_j, \theta_k)$ 可表示为

$$a(f_j, \theta_k) = [\exp\{-j2\pi f_j \nu_1 \sin\theta_k\}, \dots, \exp\{-j2\pi f_j \nu_M \sin\theta_k\}]^T \quad (4)$$

则 $X(f_j)$ 的协方差矩阵为

$$R(f_j) = E[X(f_j)X^H(f_j)] = A(f_j, \theta)R_s(f_j)A^H(f_j, \theta) + \sigma_n^2 I_M \quad (5)$$

式中: $R_s(f_j) = E[S(f_j)S^H(f_j)]$, I_M 为 $M \times M$ 维单位矩阵。

若 K 个信源互不相关, 则对 $R(f_j)$ 特征分解, 可得信号子空间 F_j 、噪声子空间 W_j 分别为

$$F_j = [u_{j,1} \ u_{j,2} \ \dots \ u_{j,K}], W_j = [u_{j,K+1} \ u_{j,1} \ \dots \ u_{j,M}] \quad (6)$$

式中 $u_{j,m}$ 为 $R(f_j)$ 特征分解对应的特征向量, 对应的特征值由大到小降序排列。

2 投影子空间正交性测试方法

2.1 TOPS 算法

假定对角酉变换矩阵 $\Phi(f_i, \theta_i)$ 为

$$\Phi(f_i, \theta_i) = \text{diag}\{\exp(-j2\pi f_i \nu_1 \sin\theta_i), \dots, \exp(-j2\pi f_i \nu_M \sin\theta_i)\} \quad (7)$$

则新的阵列方向向量为

$$a(f_k, \theta_k) = \Phi(f_i, \theta_i)a(f_j, \theta_j) \quad (8)$$

式中 $f_k = f_i + f_j$, $\sin\theta_k = (f_i/f_k)\sin\theta_i + (f_j/f_k)\sin\theta_j$ 。若 $\theta_i = \theta_j$, 则有 $\theta_k = \theta_j$, 即导向矢量可由频点 f_j 变换到 f_k , 而不改变其 DOA 信息。

假定 $\Delta f = f_j - f_i$, 文献[11]证明了下列两个矩阵的值域是相等, 即

$$\mathcal{R}\{\Phi(\Delta f_i, \theta)F_i\} = \mathcal{R}\{A(f_j, \hat{\theta})\} \quad (9)$$

式中新角度 $\hat{\theta}$ 依赖于 θ , 满足如下关系

$$[\hat{\theta}]_i = \arcsin\left\{\frac{f_i}{f_j}\sin\theta_i + \frac{\Delta f}{f_j}\sin\theta\right\} \quad (10)$$

式中符号 $[\cdot]_i$ 表示矢量的第 i 个元素。若假定 $2K \leq M, K+1 \leq J$, 定义 $M \times K$ 的矩阵 $\bar{U}_{ij}(\theta)$ 为

$$\bar{U}_{ij}(\theta) = \Phi(\Delta f, \theta)F_i \quad (11)$$

式中 θ 为可能的到达角。

假定参考频点为 f_1 , 定义 $K \times (J-1)(M-K)$ 矩阵 $D(\theta)$ 为

$$D(\theta) = [\bar{U}_{12}^H W_2 \mid \bar{U}_{13}^H W_3 \mid \dots \mid \bar{U}_{1J}^H W_J] \quad (12)$$

为了行文简洁 $a(f_j, \theta_j)$ 简写为 $a_j(\theta)$, 定义 $a_j(\theta)$ 零空间的投影矩阵为 $P_{a_j}^\perp$

$$P_{a_j}^\perp = I_M - a_j(\theta)(a_j^H(\theta)a_j(\theta))^{-1}a_j^H(\theta) = I_M - P_{a_j} \quad (13)$$

式中 P_{a_j} 为 $a_j(\theta)$ 的投影矩阵。

为了减少 U_j 估计误差, 利用 $P_{a_j}^\perp$ 修正 $\bar{U}_{ij}(\theta)$ 得到 $U_{ij}(\theta)$, 即

$$U_{ij}(\theta) = P_{a_j}^\perp \bar{U}_{ij}(\theta) \quad (14)$$

将 $U_{ij}(\theta)$ 代替 $\bar{U}_{ij}(\theta)$ 重新计算矩阵 $D(\theta)$, 同时为了提高 DOA 估计精度, 文献[13]提出平方 TOPS 方法, 即

$$D(\theta) = [U_{12}^H W_2 W_2^H U_{12} \mid U_{13}^H W_3 W_3^H U_{13} \mid \dots \mid U_{1J}^H W_J W_J^H U_{1J}] \quad (15)$$

对矩阵 $D(\theta)$ 进行奇异值分解, 由最小奇异值 $\sigma_{\min}(\theta)$ 对应的角度可得到 DOA 估计值, 即

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmax}_{\theta} \frac{1}{\sigma_{\min}(\theta)} \quad (16)$$

利用式(16)进行谱峰搜索得到DOA估计。

2.2 TOFS算法

由子空间理论可知,当假定的来波方向 θ 等于某个真实的信号波达方向时,满足

$$\mathbf{a}_j^H(\theta) \mathbf{W}_j \mathbf{W}_j^H \mathbf{a}_j(\theta) = 0 \quad (17)$$

由于有限快拍数和噪声的影响,等式(17)可能不成立,但 $\mathbf{a}_j^H(\theta) \mathbf{W}_j \mathbf{W}_j^H \mathbf{a}_j$ 为接近0的数值。因此可以构造判决矩阵为

$$\mathbf{d}(\theta) = [\mathbf{a}_1^H(\theta) \mathbf{W}_1 \mathbf{W}_1^H \mathbf{a}_1(\theta) | \cdots | \mathbf{a}_J^H(\theta) \mathbf{W}_J \mathbf{W}_J^H \mathbf{a}_J(\theta)] \quad (18)$$

同理,TOFS算法可以根据下式估计信源DOA,即

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmax}_{\theta} \frac{1}{\|\mathbf{d}(\theta)\|} \quad (19)$$

式中 $\|\cdot\|$ 表示对向量求 ℓ_2 范数。

3 加权TOPS算法

3.1 信号子空间构造投影矩阵

在TOPS算法中,利用信号子空间的零空间投影矩阵以消除信号子空间 F_1 估计误差,仍无法避免伪峰存在,且算法DOA估计精度不高。

由式(11)可知:

(1)当 $\theta \in \theta$ 时,矩阵 $\mathbf{P}_{a_j}^\perp$ 与信号子空间 F_1 正交,即理想情况下 $\bar{\mathbf{U}}_{1j}(\theta)$ 某一行向量将退化为零向量,即式(16)在来波方向能够出现峰值的原因。

(2)当 $\theta \notin \theta$ 时, $\mathbf{P}_{a_j}^\perp$ 与 $\bar{\mathbf{U}}_{1j}(\theta)$ 非正交,此时 $\mathbf{D}(\theta)$ 中的部分列向量可表示为

$$\mathbf{U}_{1j}^H(\theta) \mathbf{W}_j = [\mathbf{P}_{a_j}^\perp \bar{\mathbf{U}}_{1j}(\theta)]^H \mathbf{W}_j = \bar{\mathbf{U}}_{1j}^H(\theta) \mathbf{P}_{a_j}^\perp \mathbf{W}_j \quad (20)$$

式中 $\mathbf{P}_{a_j}^\perp \mathbf{W}_j$ 项进一步加强了噪声子空间,即加剧了 $\mathbf{D}(\theta)$ 中信号子空间 F_1 估计误差的影响,这可能是TOPS算法出现伪峰的原因。

为了解决该问题,利用信号子空间投影替代其零空间投影,即

$$\mathbf{U}_{1j}(\theta) = \mathbf{P}_{a_j} \bar{\mathbf{U}}_{1j}(\theta) \quad (21)$$

当 $\theta \in \theta$,假定没有噪声,利用关系式 $\mathbf{P}_{a_j} = \mathbf{P}_{a_j}^H, \mathbf{P}_{a_j} \mathbf{W}_j = 0$,则

$$\mathbf{U}_{1j}^H(\theta) \mathbf{W}_j = (\mathbf{P}_{a_j} \bar{\mathbf{U}}_{1j}(\theta))^H \mathbf{W}_j = \bar{\mathbf{U}}_{1j}^H(\theta) \mathbf{P}_{a_j} \mathbf{W}_j = 0 \quad (22)$$

因此,利用信号子空间投影矩阵代替其零空间投影矩阵,并不影响真实信源的DOA估计,且进一步降低了噪声对空间谱估计影响,部分解决了伪峰问题。

3.2 利用TOFS加权构造矩阵

上一节讨论了基于信号子空间投影方法降低了噪声对DOA估计的影响,但仍然没有彻底解决伪峰问题。TOFS方法是根据方向矢量与噪声子空间的正交性得到构造矩阵,避免了伪峰出现,因此考虑利用TOFS加权得到修正的平方TOPS方法。

令 $\mathbf{b}_j(\theta) = \mathbf{a}_j^H(\theta) \mathbf{W}_j \mathbf{W}_j^H \mathbf{a}_j(\theta)$, $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{U}_{ij}^H(\theta) \mathbf{W}_j \mathbf{W}_j^H \mathbf{U}_{ij}(\theta)$, 由于 $0 \leq \mathbf{b}_j(\theta) \leq M$, $\mathbf{A}_{ij} \in \mathbb{C}^{M \times M}$, 因此选择如下加权组合,即

$$\mathbf{C}_{ij} = \mathbf{A}_{ij} + \mathbf{B}_j \quad (23)$$

式中 $B_j = \frac{b_j(\theta)}{M} I_M$ 。

修正后的加权 TOPS 构造矩阵为

$$D_i(\theta) = [C_{i2} | C_{i3} | \cdots | C_{ij} \cdots | C_{iJ}] \quad i \neq j, 1 \leq j \leq J \quad (24)$$

3.3 最优参考频点的选取

若假定在频带 f_j 内信号子空间和噪声子空间对应的最小和最大特征值分别为 $\lambda_{j,s} = \min\{\lambda_{j,1}, \dots, \lambda_{j,K}\}$, $\lambda_{j,n} = \max\{\lambda_{j,K+1}, \dots, \lambda_{j,M}\}$ 。定义特征值区分度为 $\eta_j = \lambda_{j,s} - \lambda_{j,n}$, 则最优参考频点可由式(25)求得

$$k_0 = \arg \max_j \{\eta_j\} \quad (25)$$

因此,基于最优参考频点的加权 TOPS 构造矩阵为

$$D(\theta) = [C_{k_01} | C_{k_02} | \cdots | C_{k_0j} \cdots | C_{1J}] \quad k_0 \neq j, 1 \leq j \leq J \quad (26)$$

3.4 基于矩阵迹的判决函数

加权 TOPS 法通过 $D(\theta)$ 的秩缺程度估计 DOA, 即式(16), 等价求解如下约束优化问题

$$\min_{\theta} \text{rank}\{D(\theta)\} \quad \text{s.t. } \theta \in \Theta \quad (27)$$

式中: $\text{rank}\{\cdot\}$ 表示矩阵秩; Θ 为 DOA 搜索空间范围。

式(27)是个 NP 优化问题, 传统算法通过对 $D(\theta)$ 的最小奇异值来判断其秩缺情况, 因此需要奇异值分解, 计算量较大。为了解决该问题, 本文利用近似松弛的方法, 式(27)可近似等价于

$$\min_{\theta} \|D(\theta)\|_* \quad \text{s.t. } \theta \in \Theta \quad (28)$$

式中符号 $\|\cdot\|_*$ 表示矩阵的核范数, 等价于矩阵所有奇异值之和, 即

$$\min_{\theta} \text{trace}(D(\theta) D^H(\theta)) \quad \text{s.t. } \theta \in \Theta \quad (29)$$

式中符号 $\text{trace}(A)$ 表示矩阵 A 的迹。

因此加权 TOPS 算法可表示为

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{\text{argmax}} \frac{1}{\text{trace}(D(\theta) D^H(\theta))} \quad (30)$$

3.5 算法复杂度分析

为了便于讨论, 分析 TOPS 法^[11]、平方 TOPS 法^[13]、WTOPS^[14]、TOFS 法^[15]和本文方法的计算复杂度, 假定阵元数为 M 、信源数为 K 、宽带分解的子带数为 J 、频域快拍数为 N , WTOPS 算法选择的频点数为 J' , 一般情况下满足 $\min\{J, N\} > M > K$ 。对于 $M \times M$ 维矩阵奇异值或者特征值分解的运算量为 $O(M^3)$ 。本文算法计算主要由以下 4 个步骤决定: (1) 计算协方差矩阵 $R(f)$: $O(M^2 NJ)$; (2) 对 $R(f)$ 特征分解: $O(JM^3)$; (3) 计算判决矩阵 $D(\theta)$: $O(2KM(M-K) + K^2(M-K)(J-1))$; (4) 矩阵求迹 $\text{trace}(D(\theta) D^H(\theta))$: $O(2K^3(J-1))$; 而 TOPS 法、平方 TOPS 法、WTOPS 法^[14]以及 TOFS 法的复杂度主要包括 4 个步骤, 其中前两个步骤与本文算法相同, 即计算协方差矩阵 $R(f)$: $O(M^2 NJ)$; (2) 对 $R(f)$ 特征分解: $O(JM^3)$, 而后两个步骤分别为 (3) 计算判决矩阵 $D(\theta)$, TOPS: $O(KM(M-K)(J-1))$ 、平方 TOPS: $O(2KM(M-K) + K^2(M-K)(J-1))$ 、WTOPS: $O(2KM(M-K) + K^2(M-K)(J-1))J'$ 、TOFS:

$O(2KM(M-K))$; (4)对 $D(\theta)$ 奇异值分解, TOPS: $O(K^2(M-K)(J-1))$ 、平方 TOPS: $O(K^3(J-1))$ 、WTOFS: $O(K^3(J-1)J')$ 、TOFS: $O(M^3(J-1))$ 。由于本文算法谱峰搜索无需奇异值分解,而是利用矩阵求迹得到谱估计,相比于其他类方法,可见本文算法在算法复杂度上有较大优势。

综上所述,本文算法计算步骤如下:

- (1) 对阵列接收到宽带信号数据进行分段,对每段数据进行离散傅里叶变换 DFT;
- (2) 求得各频点处的协方差矩阵 $R(f_j)$,对其特征分解得到信号子空间 F_j 和噪声子空间 W_j ;
- (3) 利用式(25)判决式选取最优参考频率,求得 $\bar{U}_{k_0j}(\theta)$;
- (4) 利用信号子空间投影矩阵 P_{a_j} ,修正得到矩阵 $U_{k_0j}(\theta)$;
- (5) 利用式(26)得到修正的 TOPS 法的构造矩阵 $D(\theta)$;
- (6) 利用式(30)进行谱峰搜索,得到 K 的局部极大值点,即为宽带信号的来波方向。

4 仿真实验

实验条件:均匀线阵阵元数为 $M=12$,阵元间距为宽带信号最高频率对应的半波长。远场独立宽带信号带宽为 $B=200$ MHz,阵列噪声矢量为复高斯白噪声。DFT 点数为 256, Monte-Carlo 实验次数为 200 次。

实验 1 不同信噪比情形下空间谱

若 3 个独立远场宽带信号的到达角 DOA 分别为 $-12^\circ, 30^\circ, 35^\circ$, 图 1 是信噪比 SNR 分别为 5, 20 dB 时 DOA 估计的空间谱。

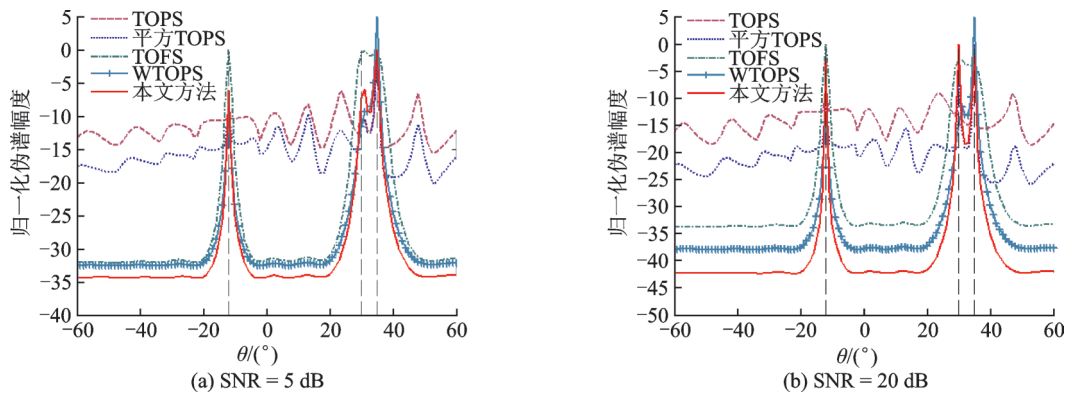


图 1 不同算法空间谱比较

Fig.1 Spectrum comparison between five different approaches

由图 1 可知,传统 TOPS 法、平方 TOPS 法由于仅仅利用某一个频点的信号子空间得到构造矩阵,若信号子空间与噪声子空间有误差(根本原因是协方差矩阵估计误差导致),则导向矢量与噪声子空间的正交性不能得到保证,即易出现多个伪峰,WTOFS 由于利用导向矢量与噪声子空间的正交特性,因此有效避免了伪峰问题,但 TOFS 法对角度相近的信源分辨率较差,如当两个信源来波方向为 $30^\circ, 35^\circ$, TOFS 伪谱几乎无法分辨,而 WTOFS 和本文方法继承了 TOFS 法的优点,且本文方法利用信号子空间投影修正了传统 TOPS,进一步减少了噪声对谱峰搜索的影响,剔除了伪峰,对分辨角度相近的信源分辨率更好。

实验 2 不同信噪比情形下信号 DOA 估计精度与有效估计概率

考虑两个独立宽带信号源入射方位角分别为 $\theta_1 = 9^\circ, 14^\circ$, 定义 DOA 估计平均均方根误差

$RMSE = \sqrt{E\left\{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\hat{\theta}_k - \theta_k|^2\right\}}$, 假定真实宽带信号 DOA 集合为 Θ , 估计值集合为 $\hat{\Theta}$, 若 $\text{card}\{\Theta\} = \text{card}\{\hat{\Theta}\} = K$ (符号 $\text{card}\{\cdot\}$ 表示集合的势, 即集合包含元素的个数), 且 $|\hat{\theta}_k - \theta_k| \leq 1^\circ, \theta_k \in \Theta, \hat{\theta}_k \in \hat{\Theta}, k \in [1, K]$, 则表示为有效估计。图 2 为不同信噪比条件下 DOA 估计的均方根误差。图 3 为不同信噪比条件下 DOA 有效估计概率。

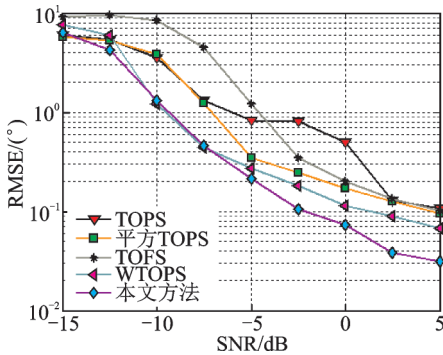


图 2 不同信噪比 SNR 时算法均方根误差 RMSE
Fig.2 Root mean square error (RMSE) v.s. SNR

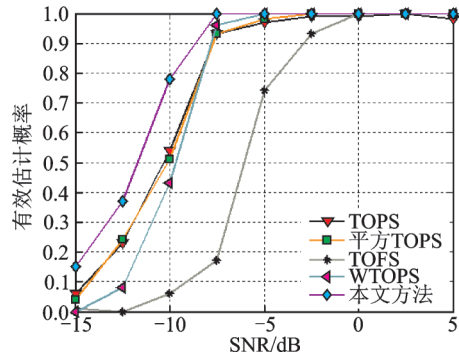


图 3 不同信噪比 SNR 时算法有效估计概率
Fig.3 Probability of effective estimate v.s. SNR

由图 2 可知, 在 SNR 小于 -7.5 dB 时, 由于噪声影响较大, 对传统 TOPS 构造函数“平方”处理对 DOA 估计性能改善有限, 因此平方 TOPS 法与 TOPS 法的 DOA 估计 RMSE 几乎相同; 而当 SNR 大于 -7.5 dB 时, 由于伪峰的存在, TOPS 法表现出性能不稳定, 而平方 TOPS 法对 DOA 估计精度优势逐渐体现出来; 由于 TOFS 利用方向向量与噪声子空间正交特性, 避免了伪峰, 且提高了 DOA 估计 RMSE 性能, 此时平方 TOPS 法与 TOFS 法 DOA 估计 RMSE 类似; 在 SNR 大于 -10 dB 时, 本文所提的加权 TOPS 法和 WTOPS 算法的 RMSE 均小于其他 3 类算法, 这是由于这两类算法均继承了 TOFS 法和平方 TOPS 法各自的优点, 提高了 DOA 估计精度, 且本文算法性能更优, 算法复杂度更低。

由图 3 可知, TOFS 法对角度相近的信源分辨性能较差, TOPS 法、平方 TOPS 法以及 WTOPS 的有效估计性能类似; 相比较而言, 加权 TOPS 法对角度相近的信源分辨性能相对最优。

实验 3 不同角度间隔时信号 DOA 估计精度与成功分辨概率

考虑两个独立宽带信号源入射方位角为 $\theta_1 = 10^\circ, \theta_2 = 10^\circ + \Delta\theta$, 信噪比 SNR 为 5 dB。假定宽带信号 DOA 的估计值分别为 $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$, 若 $|\hat{\theta}_i - \theta_i| < |\theta_2 - \theta_1|/2, i = 1, 2$, 则认为成功分辨两相近目标。图 4 为在不同角度间隔下 DOA 估计 RMSE 性能。图 5 为在不同角度间隔下目标成功分辨概率。

由图 4, 5 可知, 随着 $\Delta\theta$ 的增大, 5 类算法对角度相近目标分辨性能逐渐增强, WTOPS 法与本文方法的性能优于其他 3 类算法, 且本文方法的 RMSE 性能相对最优; 当 $\Delta\theta$ 为 1.5° 时, 其他 4 类方法均无法正确估计, 而本文算法成功估计概率达到 90% 以上, 即具有更高的分辨临近目标的能力。需要说明的是, 在图 4 中 TOFS、WTOPS 与本文方法在角度间隔小于某一定值时, 由于无法分辨相近信源, 因此出现有些数据点“丢失”现象。

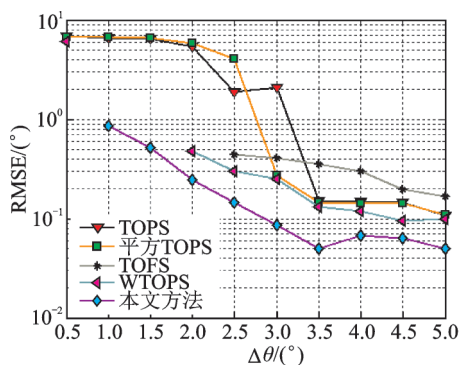


图4 不同角度间隔下算法RMSE

Fig.4 Root mean square error (RMSE) v.s. different angle intervals

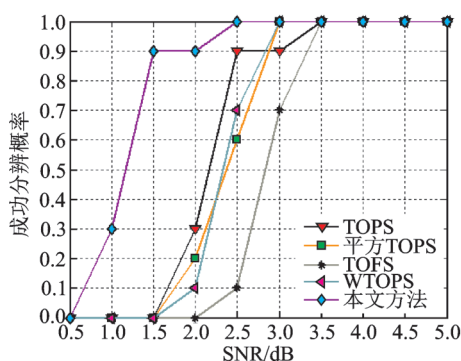


图5 不同角度间隔下算法成功分辨概率

Fig.5 Probability of resolution v.s. different angle intervals

5 结束语

针对传统 TOPS 算法 DOA 估计精度较差,易出现伪峰问题,本文提出了加权 TOPS 宽带信号 DOA 估计方法,该方法继承了 TOFS 和平方 TOPS 法各自优点,且通过选取最优参考频点,利用信号子空间投影代替其零空间投影,进一步解决子空间估计误差引起的伪峰问题,然后通过矩阵求迹搜索谱峰,避免了特征值分解,减小了计算量。最后的仿真实验验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 曹国侯,宁强.圆形传感器阵列运动多目标 2D DOA 估计[J].兵器装备工程学报,2016(1): 78-81.
Cao Guohou, Ning Qiang. 2D DOA estimation of moving target based on round sensor array[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(1): 78-81.
- [2] Zhang D, Zhang Y, Zheng G, et al. Improved DOA estimation algorithm for co-prime linear arrays using root-MUSIC algorithm[J]. Electronics Letters, 2017, 53(18): 1277-1279.
- [3] Zheng W, Zhang X, Sun H, et al. Non-circular generalised-ESPRIT algorithm for direction of arrival estimation[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2017, 11(5): 736-744.
- [4] 叶中付,罗大为,韦进强,等.相干信号波达方向估计技术综述[J].数据采集与处理,2017,32(2): 258-265.
Ye Zhongfu, Luo Dawei, Wei Jinqiang, et al. Review for coherent DOA estimation technique[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2017, 32(2): 258-265.
- [5] 尤国红,邱天爽,兰天.脉冲噪声环境下宽带循环平稳信号 DOA 估计算法[J].数据采集与处理,2012,27(4): 399-403.
You Guohong, Qiu Tianshuang, Lan Tian. DOA estimation algorithm of wideband cyclostationary signals in impulsive noise environment[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2012, 27(4): 399-403.
- [6] Sellone F. Robust auto-focusing wideband DOA estimation[J]. Signal Processing, 2006, 86(1): 17-37.
- [7] Zhao Y, Zhang L, Gu Y, et al. Efficient sparse representation method for wideband DOA estimation using focusing operation [J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2017, 11(11): 1673-1678.
- [8] 曾帆,黄惠祥,童峰.采用压缩感知的麦克风阵列远场声源方位估计[J].兵器装备工程学报,2018,39(5): 134-138.
Zeng Fan, Huang Huixiang, Tong Feng. Far field compressed sensing microphone array DOA estimation[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(5): 134-138.
- [9] Shen Q, Liu W, Cui W, et al. Focused compressive sensing for underdetermined wideband DOA estimation exploiting high-order difference co-arrays[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017(99): 86-90.
- [10] Wang Y, Chen B, Zheng Y, et al. Joint power distribution and direction of arrival estimation for wideband signals using sparse Bayesian learning[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2017, 11(1): 52-59.

- [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] Shaw A K. Improved wideband DOA estimation using modified TOPS (mTOPS) algorithm[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(12): 1697-1701.
- [13] Okane K, Ohtsuki T. Resolution improvement of wideband direction-of-arrival estimation “squared-TOPS”[C]//2010 IEEE International Conference on Communications Foundations of Computational Mathematics. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010: 1550-3607.
- [14] Hayashi H, Ohtsuki T. DOA estimation for wideband signals based on weighted squared TOPS[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2016(1): 243-254.
- [15] Yu H, Liu J, Huang Z, et al. A new method for wideband DOA estimation[C]//International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai, China: IEEE, 2007: 598-601

作者简介:



陈明建(1983-),男,博士,讲师,研究方向:雷达信号处理、阵列信号处理,E-mail: cdcmj@126.com。



胡振彪(1978-),男,博士,副教授,研究方向:运筹学、效能评估和计算。



陈林(1982-),男,博士,讲师,研究方向:通信信号处理、效能评估。

(编辑:张彤)