

# 基于平滑相干变换处理的分裂孔径波束形成方法

范泽亚, 徐雅南, 陈伏虎

(杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310012)

✉crazyfzy@126.com; xuyanan20009@126.com; cfh302@sina.com



**摘要:** 传统声呐系统通常将全阵波束形成结果直接送显输出, 且全阵波束处理往往未有效利用信号的相关性, 针对此特点, 本文结合平滑相干变换(Smoothed Coherence Transform, SCOT)处理原理, 提出一种基于SCOT预白化处理的分裂孔径波束形成处理方法。该方法首先将阵列孔径一分为二, 其次对两子孔径波束输出进行SCOT、互谱处理, 最后获得最终的波束输出。与常规全阵波束处理方法相比, 本文所提出的方法能有效抑制高噪声频率成分, 同时提高目标的方位分辨能力。仿真结果表明, 该方法能有效改善波束的输出效果。

**关键词:** SCOT; 分裂孔径; 噪声抑制; 方位分辨

**中图分类号:** TP391.7 **文献标识码:** A

## A Split Aperture Beamforming Method based on Smooth Coherence Transformation

FAN Zeya, XU Yanan, CHEN Fuhu

(Hangzhou Applied Acoustic Research Institute, Hangzhou 310012, China)

✉crazyfzy@126.com; xuyanan20009@126.com; cfh302@sina.com

**Abstract:** Traditional sonar systems tend to directly display and output to send the results of full-array beamforming. The full-array beam processing does not make effective use of signal correlation. In view of this feature, this paper proposes a split aperture beamforming processing method based on Smoothed Coherence Transform (SCOT) pre-whitening processing principles. This method first divides the array aperture into two, and then performs SCOT and cross-spectrum processing on the output of the two sub-aperture beams. Finally, it obtains the final beam output. Compared with the conventional full-array beam processing method, the method proposed in this paper can effectively suppress high-noise frequency components while improving the target's azimuth resolution ability. The simulation results show that this method can effectively improve the beam output effect.

**Keywords:** SCOT; split aperture; noise suppression; azimuth resolution

## 1 引言(Introduction)

在传统声呐系统中, 通常将全阵波束形成结果经积分处理后直接送显输出, 目标方位估计性能完全取决于所选择的波束形成算法, 常见的有常规波束形成<sup>[1]</sup>、最小方差无畸变波束形成<sup>[2]</sup>等。这种处理方式虽然过程简单, 在近似平稳噪声条件下性能优异, 但其不太适用于背景杂波丰富的情况。Cater等人<sup>[3]</sup>最早提出了SCOT处理框架, 由于该处理过程本质上是一种预白化加互相关处理方法, 因而对噪声具有明显的抑制作用, 其在精确时延估计<sup>[4]</sup>当中有着广泛的应用。随着分裂波束处理技术的发展<sup>[5,6]</sup>, 将SCOT预白化处理原理与分裂波束处理技术相结合有着较为实际的应用意义。

综上所述, 在全阵波束处理基础之上, 为了进一步提高阵列对噪声的抑制作用和对目标的方位分辨效果, 本文提出一种基于SCOT预白化处理的分裂孔径波束形成处理框架, 与全阵波束形成相比, 该方法能获得更高的信号处理增益, 同时实现简单, 适于工程应用。

## 2 SCOT原理(SCOT theory)

考虑两宽带平稳离散接收信号:

$$\begin{cases} x_1(n) = s(n) + n_1(n) \\ x_2(n) = s(n-D) + n_2(n) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $D$  表示两接收信号之间的时延;  $s(n)$  为源信号,  $n_1(n)$  和  $n_2(n)$  为加性噪声, 且三者互不相关。

基于  $s(n)$ 、 $n_1(n)$  和  $n_2(n)$  之间互不相关的假设, 对两接收信号和进行相关分析, 计算二者之间的互相关函数:

$$R_{x_1x_2}(m) = E[x_1(n)x_2(n+m)] = R_{x_1x_2}(m-D) \quad (2)$$

显然, 当  $D=m$  时,  $R_{x_1x_2}(m)$  取得最大值, 即获得对应的时延估计值。

通常情况下, 互相关函数  $R_{x_1x_2}(m)$  由互功率谱经傅立叶逆变换求得:

$$R_{x_1x_2}(m) = F^{-1}[G_{x_1x_2}(f)] \quad (3)$$

其中,  $G_{x_1x_2}(f)$  为两接收信号的互功率谱,  $F^{-1}(\bullet)$  表示傅立叶逆变换。

在实际应用中, 为了提高时延估计精度, 引入广义互相关时延估计方法<sup>[7,8]</sup>, 图1给出该方法对应频域滤波处理模型:

将信号  $x_1(n)$  和  $x_2(n)$  分别经过滤波器  $H_1(f)$  和  $H_2(f)$  滤波, 获得输出  $y_1(f)$  和  $y_2(f)$ , 然后对  $y_1(f)$  和  $y_2(f)$  的互功率谱求傅立叶逆变换, 并经峰值检测获得最终的时延估值。其中,  $s(f)$ 、 $n_1(f)$ 、 $n_2(f)$ 、 $x_1(f)$ 、 $x_2(f)$ 、 $y_1(f)$  和  $y_2(f)$  分别表示原始信号、噪声1、噪声2、信号1、信号2、信号1滤波输出和信号2滤波输出所对应的频谱。

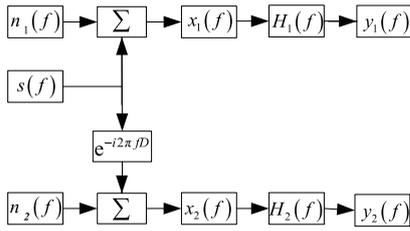


图1 频域滤波处理模型

Fig.1 Filter processing model in frequency domain

SCOT定义为互相关函数的加权傅立叶逆变换:

$$R_{y_1y_2}(m) = F^{-1}[W_{SCOT}(f)G_{x_1x_2}(f)] \quad (4)$$

式中,

$$W_{SCOT}(f) = H_1(f)H_2(f) = \frac{1}{[G_{x_1x_1}(f)G_{x_2x_2}(f)]^{1/2}} \quad (5)$$

可以看出, 当噪声分量  $n_1(f)$  或  $n_2(f)$  较大时, 会引起信号自谱分量  $G_{x_1x_1}(f)$  或  $G_{x_2x_2}(f)$  较大, 进而使得  $W_{SCOT}(f)$  较小, 即达到了抑制高噪声频率分量的目的。

### 3 SCOT处理分裂孔径波束形成方法(Split aperture beamforming method based on SCOT)

为了利用SCOT处理对噪声良好的抑制特性, 获得更优的波束输出结果, 提出基于SCOT预白化处理的分裂孔径波束形成框架, 如图2所示。首先, 将阵列孔径一分为二, 两子孔径在处理带宽各频率点上独立同步做各向波束形成, 形成宽带方位谱; 其次, 将两子孔径对应的宽带方位谱进行SCOT处理、互谱处理, 获得宽带方位输出系数; 最后, 利用SCOT处理所得到的宽带方位输出系数点乘全阵波束形成所得的宽带方位谱, 形成最终的宽带方位波束输出结果。

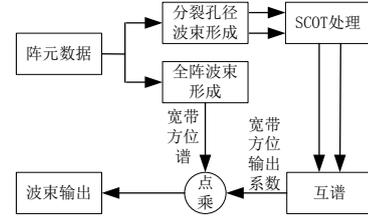


图2 基于SCOT处理的分裂孔径波束形成框架

Fig.2 Split aperture beamforming frame based on SCOT processing

以  $M$  元阵为例 ( $M$  为偶数), 采用阵元接收数据频域快照模型:

$$\mathbf{x}(f) = [x_1(f), x_2(f), \dots, x_M(f)]^T \quad (6)$$

将线阵均分为二, 则前后半阵对应的接收数据分别为:

$$\mathbf{x}_{Fore}(f) = [x_1(f), x_2(f), \dots, x_{M/2}(f)]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_{Aft}(f) = [x_{M/2+1}(f), x_{M/2+2}(f), \dots, x_M(f)]^T \quad (8)$$

那么, 前后半阵及全阵的波束形成输出结果分别为:

$$y_{Fore}(\theta, f) = \mathbf{w}_{Fore}^H(\theta, f) \mathbf{x}_{Fore}(f) \quad (9)$$

$$y_{Aft}(\theta, f) = \mathbf{w}_{Aft}^H(\theta, f) \mathbf{x}_{Aft}(f) \quad (10)$$

$$y(\theta, f) = \mathbf{w}^H(\theta, f) \mathbf{x}(f) \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{w}_{Fore}(\theta, f)$ 、 $\mathbf{w}_{Aft}(\theta, f)$  和  $\mathbf{w}(\theta, f)$  取决于所选择的波束形成算法。

累积  $K$  次频域快照数据所对应的前后半阵及全阵的波束输出结果为:

$$\mathbf{y}_{Fore-K}(\theta, f) = [y_{Fore,1}(\theta, f), y_{Fore,2}(\theta, f), \dots, y_{Fore,K}(\theta, f)] \quad (12)$$

$$\mathbf{y}_{Aft-K}(\theta, f) = [y_{Aft,1}(\theta, f), y_{Aft,2}(\theta, f), \dots, y_{Aft,K}(\theta, f)] \quad (13)$$

$$\mathbf{y}_K(\theta, f) = [y_1(\theta, f), y_2(\theta, f), \dots, y_K(\theta, f)] \quad (14)$$

则, 前后半阵对应的SCOT滤波系数分别为:

$$H_{Fore}(\theta, f) = \frac{1}{[\mathbf{x}_{Fore-K}(\theta, f) \mathbf{x}_{Fore-K}^H(\theta, f)]^{1/2}} \quad (15)$$

$$H_{Aft}(\theta, f) = \frac{1}{[\mathbf{x}_{Aft-K}(\theta, f) \mathbf{x}_{Aft-K}^H(\theta, f)]^{1/2}} \quad (16)$$

那么, 前后半阵对应的SCOT滤波输出分别为:

$$\mathbf{Y}_{Fore-K}(\theta, f) = H_{Fore}(\theta, f) \mathbf{y}_{Fore-K}(\theta, f) \quad (17)$$

$$\mathbf{Y}_{Aft-K}(\theta, f) = H_{Aft}(\theta, f) \mathbf{y}_{Aft-K}(\theta, f) \quad (18)$$

然后, 求  $\mathbf{Y}_{Fore-K}(\theta, f)$  和  $\mathbf{Y}_{Aft-K}(\theta, f)$  的互功率谱, 获得对应的输出系数:

$$coef(\theta, f) = \mathbf{Y}_{Fore-K}(\theta, f) \mathbf{Y}_{Aft-K}^H(\theta, f) \quad (19)$$

将上述宽带方位输出系数点乘全阵宽带方位谱, 即可得到  $K$  次快照数据所对应的宽带方位波束输出:

$$beam_K(\theta, f) = coef(\theta, f) \times \mathbf{y}_K(\theta, f) \quad (20)$$

最后, 将宽带方位波束输出各频点、各快照结果累加,

即可得到各扫描角度对应的最终波束输出结果。

### 4 仿真结果(Test result)

取24元均匀线阵列，阵元间距0.6m。构造0°方向入射的随机白噪声信号，设置信噪比0dB，采样频率12kHz，声速1500m/s，处理带宽设定为500—2 000Hz，扫描角度设定为-90°:0.1°:90°，采用72快拍的频域数据进行仿真处理。

图3对应前后半阵首先采用CBF算法处理，然后在不同方位频率上进行SCOT、互谱处理后输出的宽带方位系数，可以看出越接近目标真实方位，前后半阵的输出相关性越强。图4为CBF算法与基于SCOT处理的CBF算法对应的波束输出结果，可以看出基于SCOT处理的CBF算法波束旁瓣更低，主瓣更窄。图5对应前后半阵首先采用MVDR算法处理，然后在不同方位频率上进行SCOT、互谱处理后输出的宽带方位系数，可以看出基于SCOT处理的MVDR算法较全阵MVDR算法波束旁瓣更低，主瓣更窄。

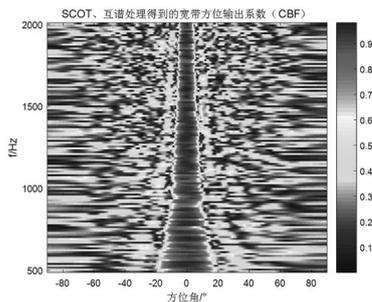


图3 SCOT、互谱处理输出宽带方位系数(CBF)

Fig.3 Broadband azimuth coefficient result of SCOT and cross spectrum processing(CBF)

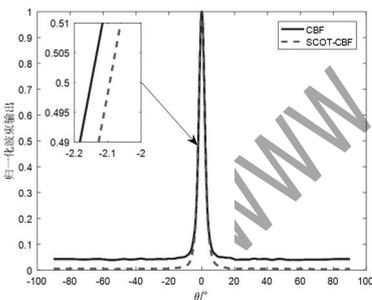


图4 CBF与SCOT-CBF算法波束形成结果

Fig.4 CBF and SCOT-CBF algorithm beamforming results

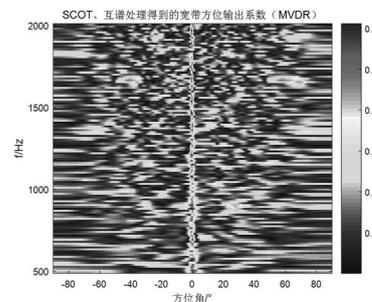


图5 SCOT、互谱处理输出宽带方位系数(MVDR)

Fig.5 Broadband azimuth coefficient result of SCOT and cross spectrum processing(MVDR)

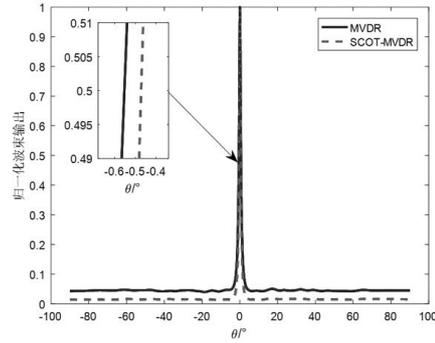


图6 MVDR与SCOT-MVDR算法波束形成结果

Fig.6 MVDR and SCOT-MVDR algorithm beamforming results

### 5 结论(Conclusion)

本文在SCOT处理具有良好的噪声抑制特性基础之上，提出了基于SCOT预白化处理的波束形成处理方法。该方法能显著抑制噪声影响，同时获得更窄的主瓣宽度，提高了信号处理增益，其原理简单，实现方便，具有较好的工程实用性。

### 参考文献(References)

- [1] Krim H, Viberg M. Two decades of array signal processing research: the parametric approach[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4):67-94.
- [2] Capon J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(8):1408-1418.
- [3] Carter G C, Nuttall A H, Cable P G. The smoothed coherence transform[J]. Proceedings of the IEEE, 1973, 61(10):1497-1498.
- [4] Wang H, Li J, Sun Z, et al. Accurate delay extraction for indoor pulse sound source location[C]. 12th International Conference on Signal Processing (ICSP).IEEE, 2014:298-301.
- [5] 钱韬.线阵分裂波束处理技术在水声探测中的应用[J].声学技术,2015,34(06):551-555.
- [6] 匡彪,王琨,袁春姗,等.平面阵分裂波束DOA估计技术研究[J].声学与电子工程,2018(04):28-31.
- [7] 邱天爽,汪琏.广义相关时间延迟估计的自适应实现[J].海洋技术学报,1994,13(04):20-31.
- [8] 景思源,冯西安,张亚辉.广义互相关时延估计声定位算法研究[J].声学技术,2014(05):464-468.

### 作者简介:

范泽亚(1990-),男,硕士,助理工程师.研究领域:声呐信号处理.

徐雅南(1989-),男,硕士,工程师.研究领域:声呐信号处理.

陈伏虎(1968-),男,硕士,研究员.研究领域:声呐总体设计及信号处理.