

宽带体制下混响和目标空时分布特征研究

刘清宇¹, 卫红凯²

(1. 海军装备研究院, 北京 100161; 2. 海军工程大学, 湖北武汉 430033)

摘要: 传统的空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)利用窄带混响和目标在空时平面的可分辨特征抑制窄带混响。对宽带混响和目标在空时平面分布特征进行研究, 并通过理论推导, 得出带宽对混响和目标空时分辨特征的影响公式。结果表明: 宽带混响和目标在空时平面分布特征部分重叠, 导致传统 STAP 效果不佳。在此基础上, 借鉴 STAP 思想, 并利用线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号在分数阶 Fourier 变换域上的聚焦性, 分析了在空-分数阶 Fourier 域三维空间上抑制宽带 LFM 混响的可行性。

关键词: 宽带混响; 空时自适应处理; 分数阶 Fourier 变换; 线性调频信号

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-06-0489-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.06.002

Study of space-time distribution characteristics of wideband reverberation and target echo

LIU Qing-yu¹, WEI Hong-kai²

(1. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China; 2. Navy Engineering University, Wuhan 430033, Hubei, China)

Abstract: The traditional space-time adaptive processing (STAP) suppresses narrowband reverberation by utilizing the distinguishable characteristics of narrowband reverberation and target echo in space-time plane. In the paper the distribution characteristics of wideband reverberation and target echo in space-time plane are studied. Based on this, the theoretical formula is derived to analyze the influence of bandwidth on reverberation and target echo's distinguishable characteristics. It shows that the performance of traditional STAP is degraded seriously due to the overlap of wideband reverberation and target echo in space-time plane. And then, the possibility of cancelling wideband linear frequency modulation (LFM) reverberation in space-fractional Fourier domain is analyzed by integrating the space domain and the concentration characteristic of LFM signal in fractional Fourier domain.

Key words: wideband reverberation; space-time adaptive processing (STAP); fractional Fourier transform; Linear Frequency Modulation (LFM) signal

0 引言

为了对抗安静型潜艇, 现代主动声呐技术普遍向低频、宽带、大功率方向发展^[1], 这在提高探测距离的同时, 也使得主动声呐的特有干扰——混响背景增强。混响与目标的形成机理相似, 其与目标的时、频域特征往往耦合在一起, 难以分离, 使得传统的时、频域混响抑制方法效果不佳。

为了有效抑制混响, 就需要利用混响和目标的空时分布特征, 以构造滤波器, 滤除混响。空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)^[2]就是利用运动情况下混响和目标在空时平面的分布

特征差异(根据平台运动方向与基阵轴向夹角不同, 混响在空时平面表现为直线、圆或椭圆, 目标表现为一个点)来抑制混响。STAP 首先应用于机载雷达杂波抑制, 雷达杂波与声呐混响有一定的相似性, 文献[3,4]借鉴 STAP 思想, 将其应用于窄带声呐混响抑制, 取得了优于传统常规处理的结果。本文分析了宽带体制下, 混响和目标的空时分布, 并通过理论推导, 得出了带宽对混响和目标空时分辨特征的影响公式。结果表明: 宽带体制下, 受带宽影响, 混响和目标在空时平面部分重叠, 重叠程度与带宽成正比, 从本质上揭示了传统 STAP 性能下降的原因。在此基础上, 针对雷达、声呐中广泛应用的宽带线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号^[5,6], 利用其在分数阶 Fourier 域上的聚焦性^[7-9], 结合空域, 指出在空-分数阶 Fourier 域三维空间上, 混响和目标有可分辨特征, 为空-分数阶 Fourier 域三维空间上抑制宽带 LFM 混响提供了理论基础。

收稿日期: 2014-09-11; 修回日期: 2014-11-17

作者简介: 刘清宇(1968—), 男, 河南商丘人, 研究员, 研究方向为水声数据分析。

通讯作者: 卫红凯, E-mail: whk200605@163.com

1 宽带混响和目标空时分布特征

窄带体制下，信号的多普勒频率主要表现为中心频率处的多普勒频率，理论上混响的空时二维分布为斜线(正侧视声呐)、半圆(前视阵声呐)或半椭圆(斜视阵声呐)；而目标位于空时平面上的某一点^[4]，混响和目标在空时二维平面可分辨。传统窄带 STAP 方法即是利用此特征抑制窄带混响。

宽带体制下，中心频率处的多普勒频率不能代表整个带宽范围内的多普勒变化，必须考虑带宽内各频率的多普勒。因此，宽带混响和目标的空时二维平面分布较窄带要复杂。图 1 所示为中心频率 f_0 ，频带范围 $[f_1, f_2]$ 的宽带信号频谱。

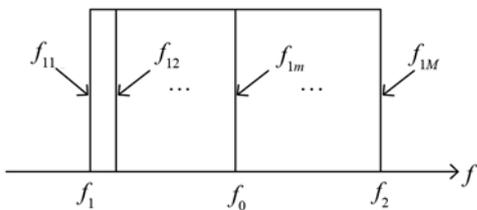


图 1 宽带信号频谱示意图
Fig.1 Frequency spectrum of wideband signal

为了便于研究宽带体制下混响的空时分布，在信号带宽内取 M 根谱线 $f_{1m} (m=1, 2, \dots, M)$ ，则以 f_0 为参考频率搬移后的宽带混响谱为

$$f = \sum_{m=1}^M (f_{1m} - f_0 + f_{dm}) = \sum_{m=1}^M (f_{1m}' + f_{dm}) \quad (1)$$

式中， f_{dm} 为 f_{1m} 的多普勒频率。

由式(1)可知，对于窄带混响， $M=1$ (取 $f_{11}=f_0$)，混响谱表现为中心频率处的多普勒频率。对于宽带混响， $M>1$ ，无法找到某一参考频率，能同时将各子带中心频率搬移到零频，即各 $f_{1m}'=f_{1m}-f_0$ 不能同时为零。因此，宽带混响谱包含信号带宽内的频点及其多普勒频率；此处表述的宽带混响在空时二维平面的分布实际上是宽带混响的空频域分布。

正侧视声呐、前视阵声呐、斜视阵声呐三种典型配置下，混响谱表达式相同，区别仅在于 f_{dm} 形式不同。因此，不失一般性，以正侧视阵声呐为例，讨论宽带混响和目标在空时二维平面的分布。

仿真参数设置如下：发射信号中心频率 $f_0=750 \text{ Hz}$ ，带宽 $B=200 \text{ Hz}$ ，以信号初始频率 $f_1=650 \text{ Hz}$ 为第一个采样频点，间隔 5 Hz 对信号频谱取样，共 41 个频点。平台运动速度为 10 kn ，目标径向速度为 20 kn ，空间方位为 40° ，则式(1)可表示为如下形式：

$$\begin{cases} f = \sum_{m=1}^M (f_{1m} - f_0 + f_{dm}) = \sum_{m=1}^M (f_{1m}' + f_{dm}) \\ f_{dm} = f_{d \max m} \cos \alpha = \frac{2v}{c} f_{1m} \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中， α 为散射元与运动方向空间锥角。

考虑式(2)中第 $m(m=1, 2, \dots, M)$ 根谱线，其表达式为 $f = f_{1m}' + f_{d \max m} \cos \alpha$ ，即 $\cos \alpha = (f - f_{1m}') / f_{d \max m}$ ，则可知，在空时平面上，不同谱线具有不同的斜率，斜率大小为带宽内各频点对应的最大多普勒倒数，且随频点增大而减小。各不同斜率斜线的叠加使宽带混响在空时平面分布由窄带情况下的斜线变为梯形斜带，如图 2 中十字线所示。

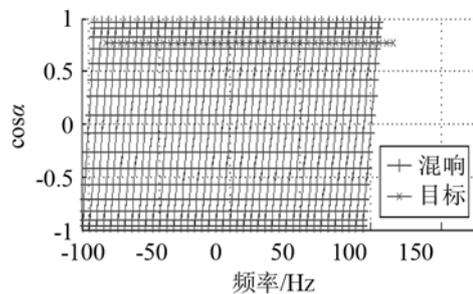


图 2 正侧视声呐配置下宽带混响和目标的空时分布
Fig.2 Direction-frequency curve of wideband reverberation and target for side-looking sonar

若以 $f_{d \max 1}$ 表示宽带信号起始频率对应的最大多普勒频率， $f_{d \max 2}$ 表示宽带信号截止频率对应的最大多普勒频率，则宽带谱的展宽范围为 $[-B/2 - f_{d \max 1}, B/2 + f_{d \max 2}]$ 。宽带混响由于多普勒和带内频点耦合，混响谱在空时平面展开范围大，此时，宽带混响和目标在空时平面部分重叠(如图 2 所示)。重叠程度与信号中心频率、带宽、平台运动速度、目标方位、目标径向速度等因素有关。实际中应该根据具体情况分析。本节参数设置下，约 94% 的信号频段与混响谱重叠。

2 带宽对混响和目标可分辨特征影响

由上节分析可知，受带宽影响，宽带混响和目标在空时平面分布部分重叠，难以分辨。下面通过理论推导具体分析带宽对混响和目标空时分辨特征的影响。

图 3 为宽带混响和目标在空时平面分布示意图，设发射信号频谱范围为 $[f_1, f_2]$ ，目标空间锥角 α_1 ，目标径向速度 v_t ，平台运动速度 v 。则 α_1 方向上混响频谱范围为 $[f_c = f_1 + f_{d1}', f_e = f_2 + f_{d2}']$ ， f_{d1}' 、 f_{d2}' 分别为 α_1 方向上 f_1 、 f_2 的多普勒频率。目标频谱范围为 $[f_r = f_c + 2v/cf_1, f_{r2} = f_e + 2v/cf_2]$ 。要使 α_1 方向上

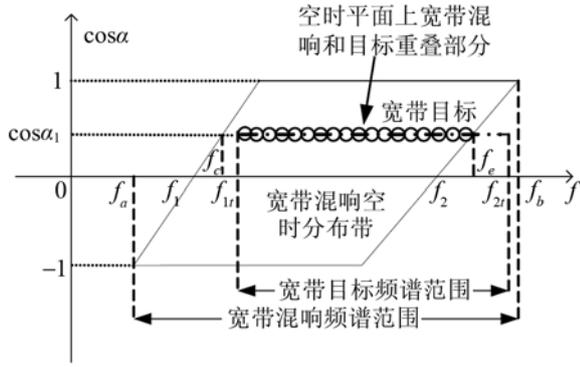


图 3 宽带混响和目标空时平面分布示意图

Fig.3 Distribution diagram of wideband reverberation and target in space-time plane

目标和混响谱不重合，则 $f_r > f_e$ 。据此可分析空时平面上不同阵型配置下目标和混响分布特征不重合所要求的目标和目标方位混响的最小相对多普勒频率值，同样以正侧视阵为例进行分析。

正侧视阵配置下， $f_d = 2v/cf \cos \alpha$ ，则：

$$\begin{cases} f_r = f_1 + 2v/cf_1 \cos \alpha_1 + 2v_r/cf_1 \\ f_e = f_2 + 2v/cf_2 \cos \alpha_1 \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)，则可知：

$$f_r > f_e \Rightarrow 2v_r/cf_1 > B + 2v/cB \cos \alpha_1 \quad (4)$$

由式(4)可知，要使空时平面上混响和目标频谱不重合，则目标及其方位的混响相对多普勒频率 $\Delta f_{d1} = 2v_r/cf_1$ 要大于信号带宽 B 及其在目标方位上的多普勒频率。

窄带体制下，时宽带宽积 TB 近似为 1，式(4)可化简为

$$v_r > \frac{c}{2f_1 T} + \frac{v}{f_1 T} \cos \alpha_1 \quad (5)$$

由式(5)可知，窄带体制下，目标径向速度 v_r 随信号起始频率 f_1 (窄带下可视为信号中心频率)、脉宽 T 、平台运动速度 v 、声速 c 及空间角度 α_1 变化。

保持其余参数不变，则 v_r 与信号中心频率成反比，频率越高，则空时平面上混响和目标可分辨所需的 v_r 越小。如图 4 中所示，当中心频率超过 3 kHz 时， 60° 方位上混响和目标可分辨所需的 v_r 由 500 Hz 时的 3 kn 下降到 0.5 kn 以下。

保持其余参数不变，则 v_r 与脉宽成反比，长脉宽下，较小的 v_r 可分辨混响和目标。如图 5 中所示，当脉宽超过 0.5 s 时， 60° 方位上混响和目标可分辨所需的 v_r 由 0.1 s 时的 20 kn 下降到 5 kn 以下。

分析图 4、图 5 可知，目标径向速度 v_r 与中心频率/脉宽变化呈双曲线关系，随中心频率/脉宽的增大而减小，且减小速率随中心频率/脉宽的增大而趋缓。

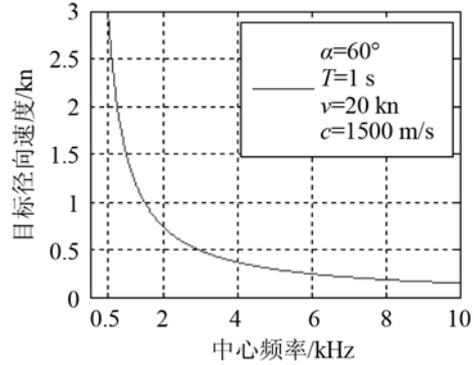


图 4 目标径向速度与中心频率关系曲线

Fig.4 Curve of target radial velocity vs center frequency

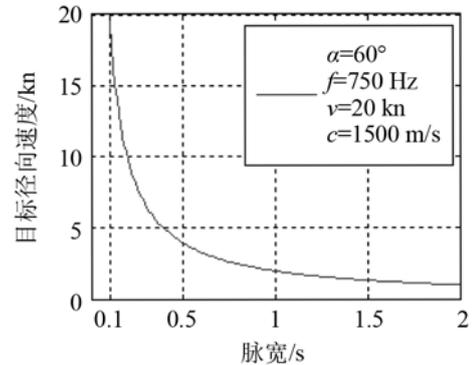


图 5 目标径向速度与脉宽关系曲线

Fig.5 Curve of target radial velocity vs pulse width

宽带体制下， $TB \gg 1$ ，式(4)可写为如下形式：

$$v_r > \frac{cB}{2f_1} + \frac{vB}{f_1} \cos \alpha_1 \quad (6)$$

由式(6)可知，目标径向速度 v_r 随信号起始频率 f_1 、带宽 B 、平台运动速度 v 、声速 c 及空间角度 α_1 变化。

保持其余参数不变，则 v_r 与带宽成正比，带宽越大，空时平面上混响和目标可分辨的最小径向速度值越大。如图 6 中所示，对于脉宽为 1 s，中心频率为 750 Hz 的宽带信号，当带宽较小，如为 5 Hz 时， v_r 为 10 kn，当带宽为 40 Hz 时， v_r 达到 80 kn，而实际中，主动声呐探测目标的径向运动速度一般不超过 40 kn(对应 20 Hz 带宽)，则空时平面上混响和目标谱的 80% 以上重合，难以分辨。

保持其余参数不变，则 v_r 与信号起始频率 f_1 成反比，同样的带宽下， f_1 越大，则 v_r 越小，空时平面上混响和目标越容易分辨。实际上，随着 f_1 的增大，信号中心频率 $f_0 = f_1 + B/2$ 亦随之增大， B/f_0 减小，使信号逐渐向窄带情况接近。如图 7 中所示，对于脉宽为 1 s、带宽为 50 Hz 的宽带信号，当信号中心频率超过 4 kHz 时， 60° 方位上混响和目标可分辨所需的 v_r 由 500 Hz 时的 150 kn 下降到 20 kn 以下。

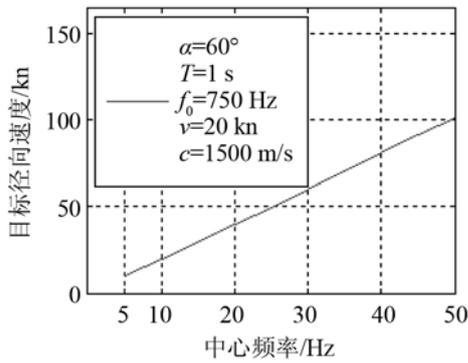


图 6 目标径向速度与带宽关系曲线
Fig.6 Curve of target radial velocity vs bandwidth

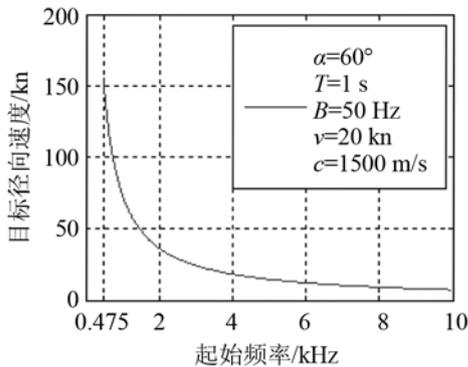


图 7 目标径向速度与起始频率关系曲线
Fig.7 Curve of target radial velocity vs initial frequency

分析图 6、图 7 可知，目标径向速度 v_t 与带宽变化呈线性关系，与起始频率(中心频率)变化呈双曲线关系，随带宽的增大而增大，随起始频率(中心频率)的增大而减小，且减小速率随起始频率(中心频率)增大而趋缓。

3 空-分数阶 Fourier 域三维空间上抑制宽带 LFM 混响可行性分析

由前述分析可知，带宽的影响使混响和目标在空时平面不仅重叠，而且由于目标径向速度的限制，往往重叠程度较高。为有效抑制宽带混响，需寻求新的宽带混响和目标可分辨空间。以雷达、声呐中常见的宽带 LFM 信号为例，分析在空-分数阶 Fourier 域三维空间上抑制宽带 LFM 混响的可行性。

分数阶 Fourier 变换^[7-9](Fractional Fourier transform, FRFT)定义如下：

$$\begin{cases} X_p(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_p(u, t)x(t)dt = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} A_\gamma e^{i\pi(u^2 \cot \gamma - 2ut \csc \gamma + t^2 \cot \gamma)} x(t)dt \quad (7) \\ A_\gamma = \frac{e^{(-i\pi \operatorname{sgn}(\sin \gamma)/4 + i\gamma/2)}}{|\sin \gamma|^{1/2}}, \quad \gamma = \frac{\pi}{2} p \end{cases}$$

式(7)中： $K_p(u, t)$ 为 FRFT 的核函数， γ 为 FRFT 的旋转角， $0 < |p| < 2$ 。当 $p=0$ 时，核函数 $K_p(u, t) = \delta(u-t)$ ，当 $p=\pm 2$ 时，核函数 $K_p(u, t) = \delta(u+t)$ 。

分析式(7)可知，分数阶 Fourier 变换采用线性调频基，因此，对 LFM 信号进行分数阶 Fourier 变换，即相当于 LFM 信号与线性调频基匹配的过程。当两者不匹配时，输出值很小，当两者达到匹配时，出现峰值，称为 LFM 信号在分数阶 Fourier 域具有聚焦性。利用 LFM 信号在分数阶 Fourier 域(以 (p, u) 表示， p 为分数阶次、 u 为分数阶 Fourier 域值)的聚焦性即可实现 LFM 信号的检测和参数估计。

但对于主动声呐中的混响背景而言，混响由大量散射元散射的 LFM 信号组成，在分数阶 Fourier 域上也表现出聚焦性(如图 8 所示)。难以利用分数阶 Fourier 域上 LFM 信号的聚焦性实现混响背景下 LFM 目标回波的检测。

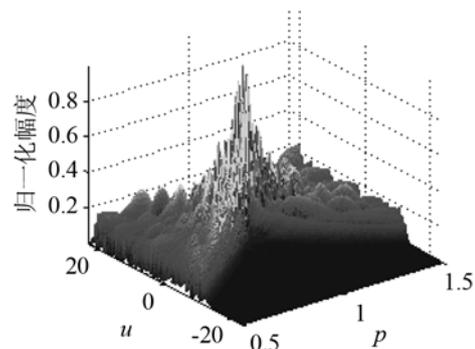


图 8 LFM 混响在分数阶 Fourier 域分布
Fig.8 Distribution of LFM reverberation in the fractional Fourier domain

进一步分析可知，各散射元空间分布不同，其产生的 LFM 信号不同，相应的在 (p, u) 平面峰值位置不同。在分数阶 Fourier 域基础上引入空域，以单独考虑各散射元的散射 LFM 信号。由于目标和平台运动速度的差异，与目标同方向的散射元，其 LFM 散射信号与目标回波不同，在 (p, u) 平面表现为不同的峰值位置。与 LFM 目标回波信号同形式的散射元，其空间分布与目标不同。因此，联合考虑空域及 (p, u) 二维平面，则在空间角度 α 、分数阶次 p 、分数阶 Fourier 域值 u 组成的三维空间 (α, p, u) 上，目标和混响有可分辨特征。据此可有效抑制宽带 LFM 混响。

4 结论

窄带混响和目标在空时平面有可分辨的特征，传统 STAP 方法利用此特征抑制窄带混响。宽带混

响和目标在空时平面部分重叠, 难以分辨, 传统 STAP 方法效果不佳。针对雷达、声呐中常用的宽带 LFM 信号, 利用 LFM 信号在分数阶 Fourier 域的聚焦性, 引入空域, 则在空-分数阶 Fourier 域三维空间上, 宽带 LFM 混响和目标有可分辨特征, 据此可抑制宽带 LFM 混响。

参 考 文 献

- [1] 李启虎. 进入 21 世纪的声呐技术[J]. 应用声学, 2002, 21(1): 13-18.
LI Qihu. Sonar technology of 21st century[J]. Journal of Applied Acoustics, 2002, 21(1): 13-18.
- [2] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
WANG Yongliang, PENG Yingning. Space time adaptive processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [3] 赵申东. 主动声呐空时自适应处理方法研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2008.
ZHAO Shendong. Study on space time adaptive processing for active sonar[D]. Wuhan: Navy Engineering University, 2008.
- [4] 詹昊可. 主动声呐混响空时抑制方法研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2008.
ZHAN Haoke. Study on space time suppressing reverberation for active sonar[D]. Wuhan: Navy Engineering University, 2008.
- [5] 杜利平, 苏广川. 毫米波雷达多运动目标检测算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(9): 1523-1527.
DU Liping, SU Guangchuan. Multi-moving targets detection based on p0 order CWD in MMW radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(9): 1523-1527.
- [6] Musha T, Uchida H, Nagashima M. Self-monitoring sonar transducer array with internal accelerometers[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(1): 28-34.
- [7] Namias V. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics[J]. J. Inst. Math. Appl., 1980, 25(3): 241-265.
- [8] Ozaktas H M, Mendlovic D. Fractional Fourier transforms and their optical implementation[J]. J. Opt. Soc. AM. A., 1993, 10(12): 2522-2531.
- [9] Ozaktas H M, Arikan O, Kutay A, et al. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(9): 2141-2150.