

主动声纳混响抑制与目标检测技术

郝程鹏, 施博, 闫晟, 徐达

中国科学院声学研究所, 北京 100190

摘要 混响是浅海主动声纳的主要干扰,其抑制问题一直是困扰声纳信号处理的难题,尤其是当声纳载体具有一定的运动速度、导致混响具有空时耦合特性时。空时自适应处理是解决该问题的一个有效途径,它能够实现隐式的平台运动补偿从而允许获得理论最优的混响抑制性能。本文介绍了传统主动声纳的混响抑制与目标检测技术,通过分析声纳与雷达的不同之处,提出了适合于运动声纳的空时自适应处理模型;在此模型下,讨论了提高空时自适应检测稳健性的方法;最后展望了主动声纳混响抑制与目标检测技术的发展趋势。

关键词 主动声纳;混响抑制;目标检测;空时自适应处理

主动探测技术作为一种准确高效的探测手段,在过去的几十年里逐步获得深入研究,并在雷达、声呐等领域得到了广泛应用和发展。对于主动声纳探测,除了船舶噪声、海洋背景噪声外,混响是干扰其性能的主要因素。与其他类型噪声不同,混响可以看作是一种因主动发射信号引发的噪声,频域上覆盖的区域与发射信号基本重合,时域上与发射信号及目标回波强相关^[1]。因此,在信噪比不高的情况下,从纯粹的时域或频域信号处理角度出发,很难有效提高混响背景下主动声纳的目标检测性能。另一方面,从统计信号处理角度出发,混响可以视为由分布在一定区域的大量不规则散射元所反射的回波形成,其幅度和相位受不规则散射面调制具有随机分布特征。通过对不同条件下混响统计特性的描述,可以将其分为两大类:满足散射区域内具有大量不规则散射元情况下的高斯分布类,和仅有有限散射元的非高斯分布类^[2-6]。在确定混响统计特性模型后,借助建立在统计信息号处理基础上的假设检验方法,可以很好地完成混响背景下的目标检测任务^[7]。

与滤波处理后纯能量检测不同,统计信号检测技术在检测器设计之初就将检测问题中的侦测区域划分、混响统计特性建模、接收机建模和检验统计量生成等组成部分加以综合考虑:结合各模型的特点完成待检测数据和辅助数据的收集,依据检验准则进行检测统计量设计并给出最终的判决结果。其中所收集的辅助数据要尽可能完整地代表待检测数

据中混响分量的统计特性,而检测统计量的设计要尽量保证恒虚警(constant false alarm rate, CFAR)特性。总之,声纳信号统计检测技术是一个设计灵活、性能可控的高效目标检测手段。

从产生机制与自身统计特性等方面来看,混响与雷达杂波有诸多相似之处^[8-11]。由于这些相似性,从声纳信号处理中产生和发展出来的阵列信号处理技术在雷达目标检测领域取得了飞速发展,而大量雷达信号处理技术也在水下抗混响和目标检测方面都有直接或间接的应用,例如相控阵声纳、时频分析、空时自适应处理(space time adaptive processing, STAP)等。

本文在回顾主动声纳混响抑制与目标检测技术的基础上,提出了适用于主动声纳的单脉冲STAP模型。该模型充分利用混响形成过程中表现出的空时耦合性,摒弃现有水下STAP类比套用雷达STAP的思路,具有数学可跟踪的优势。最后,文章探讨了提高空时自适应检测稳健性的方法。

1 传统声纳混响抑制与目标检测

主动声纳系统工作时,需要对发射信号的混响进行抑制,以提高声纳阵列的检测性能。在信号处理领域中,传统混响抑制方法可以分为发射信号波形设计和接收信号后处理两大类。

主动声纳系统常用发射波形包括连续波(CW)、线性调

收稿日期:2017-09-26;修回日期:2017-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(61571434)

作者简介:郝程鹏,研究员,研究方向为阵列信号处理,电子邮箱:haochengp@mail.ioa.ac.cn

引用格式:郝程鹏,施博,闫晟,等.主动声纳混响抑制与目标检测技术[J].科技导报,2017,35(20):102-108;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.011

频波(LFM)、双曲调频波(HFM)、二进制相移键控(BPSK)等信号,以及上述信号的组合形式。CW波是单一频率的脉冲信号,当发射脉宽为 T_p 时,其距离分辨能力为 $\pm 0.29cT_p$,其频率分辨能力为 $\pm 0.44/T_p$,其中, c 为水中声速。因此,短脉冲CW信号具有较好的距离分辨性能,但频率分辨率较差;长脉冲CW信号具有较好的频率分辨性能,但距离分辨率不高。LFM波是线性调频脉冲信号,当发射脉宽为 T_p 、调频带宽为 B 时,其距离分辨能力为 $\pm 0.44c/B$,频率分辨能力为 $\pm 0.44/T_p$ 。增大LFM信号的发射脉宽 T_p 或调频带宽 B ,可以分别提高其频率分辨能力和距离分辨能力。相比CW信号,LFM信号更适合应用于在混响背景下对低速目标的探测。

对主动声纳的发射波形进行设计,可构造出具有近似钉板型模糊度函数的发射信号,使得声纳信号具有较高的距离分辨性能和多普勒分辨性能。梳状谱信号是近年来得到广泛研究的声纳发射信号^[12-13],较为典型的梳状谱信号包括几何梳状波形(GC)、正弦频率调制信号(SFM)等,均表现出了较好的混响抑制性能。但将梳状谱信号作为声纳系统的发射波形,会存在一些难以克服的缺点:发射能量效率较低、占有信道带宽大、频带利用率低,难以兼顾高多普勒区和低多普勒区的混响抑制效果。

主动声纳接收信号后处理按处理维度划分,可分为空域滤波处理技术和时频域处理技术两类。空域处理是利用阵列处理技术,能让空间中某些方位或区域的信号通过,并抑制其他方位或区域干扰与噪声的信号处理方法。声纳阵列的空域滤波性能由其结构形状、阵元数目及处理算法等因素决定,其中提高声纳阵列性能的最有效途径就是改进阵列处理算法。常规的阵列波束形成处理是对空间分布的声纳阵列所采集的数据进行线性组合得到一个标量波束的输出^[14]。可以将波束形成处理看作空域滤波器:感兴趣方向的目标信号可以通过,而其他方向的噪声和干扰则被抑制。采用固定加权系数的波束形成处理器称为固定波束形成器,采用的加权系数是随环境变化不断自动调节的波束形成处理器则称为自适应波束形成器。波束形成器的主要性能指标包括:阵增益、稳健性、旁瓣级、主瓣宽度、主瓣响应、频率响应等。在声纳阵列信号处理领域应用较多的波束形成器包括对各阵元接收数据进行简单时延相加的常规波束形成器、使理想阵增益最高的最小方差无失真响应(MVDR)波束形成器^[15]、稳健自适应波束形成器^[16]等。

除空域处理外,时频域处理是另外一种提高信噪比的有效手段。匹配滤波是最常使用的时频域处理技术,最初于1943年由North^[17]提出,并得到不断发展^[18],以滤波器在某个时刻的输出信噪比最大为准则,可有效提高对目标的检测能力。如果是在具有非平稳、色噪声性质的混响背景下检测目标,往往需要先对接收到的数据做预白化处理,再进行匹配滤波处理。文献[19]对声纳混响的时间、空间二维扩展性质进行了研究,并提出一种基于二维自回归算法的自适应预白

化处理器。在低信混比的情况下,应用该预白化处理器仍然可以得到良好的检测效果。针对混响背景及目标径向速度造成的LFM信号的回波和匹配样本失配问题,文献[20]提出了一种基于匹配滤波和分数阶傅里叶变换的水下动目标检测方法。利用分数阶傅里叶变换对LFM信号的聚焦特性,该方法的检测性能优于单纯的匹配滤波器,并且可以得到更准确的目标距离估计和径向速度估计。此外,应用于主动声纳的处理方法还包括子空间检测^[21]、WVD-Hough检测^[22]等。

2 STAP与目标检测

2.1 STAP模型

由于主动声纳通常安装在运动平台上,其浅海混响场由海洋地层结构所控制,具有特定的空时结构特性。此时,前述混响抑制方法由于通常未考虑平台运动的影响,性能将大受影响,一个更好的解决方案是使用二维滤波器在角度域和多普勒域进行联合滤波(STAP),达到实现隐式平台运动补偿的目的^[23]。STAP最初用于机载动目标显示雷达,它利用杂波的空时分布特性在空时二维平面中形成与杂波位置匹配的凹口,并且在目标的位置处保持固定增益,实现杂波的抑制和目标信号的相干积累^[24]。

考虑一个 N 个阵元的等距线阵,设待检测数据时域采样点数为 L ,则接收数据的向量表示为 $\mathbf{X}=[\mathbf{X}_{s,1}^T, \dots, \mathbf{X}_{s,L}^T]^T$,其中 $\mathbf{X}_{s,k}=[x_{1k}, \dots, x_{Nk}]^T$ 表示第 k 次空间快拍数据。令STAP处理的加权向量 $\mathbf{W}=[w_{1l}, w_{2l}, \dots, w_{Nl}]$,则STAP滤波输出可表示为 $y=\mathbf{W}^H \mathbf{X}$,上标H表示共轭转置操作。在最大化输出信干噪比准则下,得到空时二维最优处理的权向量表示为

$$\mathbf{W}_{\text{opt}}=\mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}_s \quad (1)$$

式中, μ 为归一化复常数; \mathbf{v}_s 为阵列的空时二维导向向量; \mathbf{R} 为接收数据的协方差矩阵。

STAP能够得到理论上的最佳滤波效果,但全空时处理计算量太大,而且未考虑雷达和声纳的实际工作环境,因此需要对STAP进行降维处理。时空级联自适应处理技术(TSA)就是一种典型的降维STAP方法^[25],该方法首先对阵列中各阵元的接收数据进行时域预滤波,将接收数据变为一组窄带信号,使得接收到的噪声被大幅的抑制;再对各阵元的窄带信号做自适应波束形成处理,使得混响被进一步抑制。

假设第 k 个多普勒通道的频移为 f_k ,时域滤波器权向量为 K 维的向量 $\mathbf{W}_t(f_k)$,空域自适应滤波的权向量为 N 维的向量 \mathbf{W}_s ,则第 k 个多普勒通道输出的混响协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_k=[\mathbf{I} \otimes \mathbf{W}_t^H(f_k)]^H \mathbf{R}[\mathbf{I} \otimes \mathbf{W}_t(f_k)] \quad (2)$$

令在感兴趣方向 ψ 的信号响应恒定,而总噪声输出功率最小的约束条件下,得到空域自适应权向量为

$$\mathbf{W}_{sk}=\mu \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{v}_s(\psi) \quad (3)$$

TSA技术可以利用快速傅里叶变换(FFT)算法实现时域的窄带滤波器,提高时域滤波计算速度,且可保持较低的运

算维数,应用在运动声纳上有一定实际意义。

为实现主动声纳的目标自动检测,在利用STAP实现混响抑制后,通常需要级联一个CFAR检测器,如图1所示。CFAR处理的目的是提供一个合适的检测阈值,以避免背景起伏对检测性能的影响,使声纳的自动检测能保持一个恒定的虚警概率。经典的CFAR处理方法包括均值类CFAR^[26]、有序统计类CFAR^[27]及自适应CFAR^[28]等。这种级联处理的缺点是运算量大,对待检测数据和辅助数据的利用不够充分,检测性能有待提高。



图1 基于STAP的目标检测流程

Fig. 1 Framework of target detection based on STAP

2.2 空时自适应检测

以空时联合处理为框架,以目标检测为目的的自适应处理技术被称为空时自适应检测(STAD)技术^[29],该技术将混响抑制与目标检测合二为一,能够更有效地利用接收数据,解决上述级联方法的不足。假设 \mathbf{x} 为待检测单元, $\mathbf{x}_k(k=1, \dots, K)$ 为辅助数据,点目标的STAD问题可以用如下二元假设检验表示:

$$\begin{cases} H_0: \mathbf{x} = \mathbf{d}, \mathbf{x}_k = \mathbf{d}_k & k=1, \dots, K \\ H_1: \mathbf{x} = \alpha \mathbf{v}_s + \mathbf{d}, \mathbf{x}_k = \mathbf{d}_k & k=1, \dots, K \end{cases} \quad (4)$$

其中, α 为未知的回波信号幅度; \mathbf{v}_s 为维数为 NL 的归一化空时导向向量, $\mathbf{d}, \mathbf{d}_k(k=1, \dots, K)$ 为混响分量,通常建模为均值=0、协方差矩阵 \mathbf{R} 为复高斯分布。

值得说明的是,辅助数据通常从待检测单元的临近距离单元选取,以保证 \mathbf{d}_k 和 \mathbf{d} 具有相同的统计特性。对于式(4),可以采用不同的检验准则来求解,得到的测试统计量 T 将是 \mathbf{x} , \mathbf{x}_k 和 \mathbf{v}_s 的函数,然后将 T 与预设定的检测门限 η 进行比较,完成判决。

STAD方法的主要优点包括^[29]: 1) 通常具对混响协方差矩阵的CFAR特性,不需要再单独进行CFAR处理; 2) 能更高效地利用接收数据所提供的信息,往往具有比级联方法更好的主瓣信号检测性能、更强的旁瓣信号抑制能力; 3) 设计灵活,可根据不同的检验准则进行设计,如广义似然比(GLRT)准则、Rao准则和Wald准则等。

3 水下STAP

虽然形式上的相似性使水下STAP(STAD)的设计可以借鉴雷达已有成果,然而受主动声纳探测特点和工作方式的限制,直接套用雷达算法必然会带来诸多模型失配的问题。因此,本节在对二者进行比较的基础上,给出声纳STAP模型以及相应的检测方法。

有别于雷达系统中使用的多脉冲信号,声纳系统一般采

用单脉冲,这样由多脉冲带来的时域相干性不再适用,需要寻求载波多普勒在同一个距离单元内的时域导向向量。下面以经典的标准线阵为例进行分析。假设阵元数为 N , 选取阵列的中心为相位参考点原点,各阵元接收到的回波为平面波,接收波形的复数形式可以描述为

$$\begin{aligned} G_n(t) &= A e^{j\psi} s[(1+\beta)(t-\tau-\tau_n)] e^{j2\pi f_c[(1+\beta)(t-\tau-\tau_n)]} \\ &= A e^{j\psi} s[(1+\beta)(t-\tau-\tau_n)] e^{j2\pi f_c[(1+\beta)(t-\tau)]} e^{j2\pi f_c(1+\beta)\tau_n} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $A \geq 0$ 为脉冲幅度; θ 为入射波方向; ν 为平台和散射元的相对速度; $\psi \in [0, 2\pi)$ 为载波初始相位。 τ 表示脉冲从阵列参考点发射到接收的双程延迟。

将各阵元相对于阵列参考点的时延 $\tau_n = n \frac{d \cos \theta}{c}$, 多普勒系数 $\beta = \frac{2\nu}{c-\nu}$ 代入式(1),并保留包络项,得

$$\begin{aligned} G_n(t) &= A s[(1+\beta)(t-\tau-\tau_n)] e^{j2\pi f_c \tau_n} e^{j2\pi f_c \frac{2\nu n d \cos \theta}{c^2}} e^{-j2\pi f_c(1+\beta)\tau} e^{j2\pi f_c \beta t} \\ &\approx \bar{A} s[(1+\beta)(t-\tau-\tau_n)] e^{j2\pi f_d t} e^{j2\pi n f_\theta} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\bar{A} = e^{-j2\pi f_c(1+\beta)\tau + j\psi}$ 为修正后的幅度参数; $f_d = \beta f_c$ 为载波多普勒频移; $n f_\theta$ 为第 $n \in [1, \dots, N]$ 个阵元相对于参考点的接收延时; $f_\theta = \frac{f_c d}{c} \cos \theta$ 为空域归一化频率。

3.1 空时导向向量

对于空域导向向量而言,由于阵列模型上声纳与雷达并没有本质区别,不影响阵列流行,因此空域导向向量具有相同的形式。回到式(6),在单个脉冲情况下,有

$$G_n(t) = \bar{A} p(t-\tau-\tau_n) e^{j2\pi f_d t} e^{j2\pi n f_\theta} \quad (7)$$

其中 $p(t)$ 为矩形脉冲函数,即

$$p(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0, T_p] \\ 0 & t > T_p \end{cases} \quad (8)$$

对上述基带信号重新采样,每个距离单元采 M 个点,采样间隔为 Δt , 得到采样信号

$$x_n = \sum_{m=0}^{M-1} \int G_n(t) \delta(t-m\Delta t) dt \quad (9)$$

在窄带假设下,整理得到

$$x_n = \bar{A} e^{j2\pi n f_\theta} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi m f_d \Delta t} p(m\Delta t) \quad (10)$$

其中, $e^{j2\pi m f_d \Delta t}$ 为同一距离单元的第 m 次采样相对于第一次采样的相移。

定义 $f_i = f_d \Delta t$ 为归一化多普勒频移,单脉冲情况下的空时导向向量为

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{v}_\theta \otimes \mathbf{v}_d \quad (11)$$

其中, $\mathbf{v}_d = [1, e^{j2\pi f_i}, \dots, e^{j2\pi M f_i}]^T$, $\mathbf{v}_\theta = [e^{-(N-1)j\pi f_\theta}, \dots, e^{-j2\pi f_\theta}, 1, e^{j2\pi f_\theta}, \dots, e^{(N-1)j\pi f_\theta}]^T$ 分别为时域导向向量和空时导向向量。

在确定数据采样方式和空时导向向量后,根据多点散射模型就得到混响的空时二维分布图,图2为前视阵声纳混响的空时分布,在空时平面表现为一个椭圆。

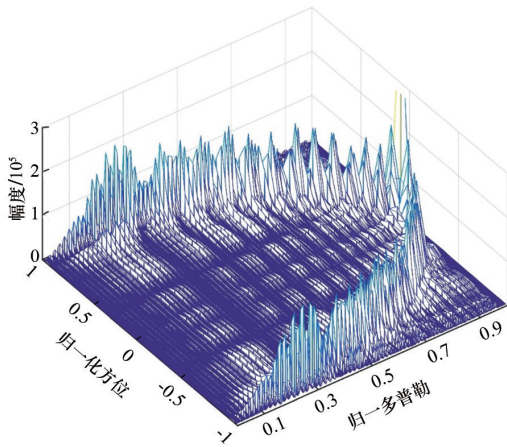


图2 运动声纳混响空时分布

Fig. 2 Reverberation space-time distribution for motional sonar

3.2 空时导向向量修正项

注意到水中声波速度远小于空气中电磁波速度,所以式(7)中用于雷达的近似不再适用,重新整理式(7)可以得到^[30]

$$G_n(t) = \bar{A}e^{j2\pi f_d t} s(t)e^{j2\pi n(1+\beta)f_0} \quad (12)$$

与电磁波信号相比,此处决定空域导向向量的因子 $e^{j2\pi n(1+\beta)f_0}$ 增加了一项修正项 $e^{j2\pi n\beta f_0}$,由于该项的存在,使得所有对导向向量敏感的雷达目标检测算法在声纳目标检测应用中出现性能损失。最终将声纳空时导向向量写为以下形式:

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{v}_\theta \otimes \mathbf{v}_d \quad (13)$$

比较式(12)中的 \mathbf{v}_s 与文献[31]中空时导向向量,它们在形式上完全相同,但是由于工作条件和使用平台不同,导致数据获取方式及对应关系不同,因此有必要在适合声纳应用的空时导向向量和采样方式下,重新设计检测方法。

为说明空时导向向量修正项对混响抑制效果的影响,图3给出了改善因子随方位角变化曲线,其中改善因子定义为输出信混比与输入信混比的比值,且 $N=5, L=6, K=2NL$ 。

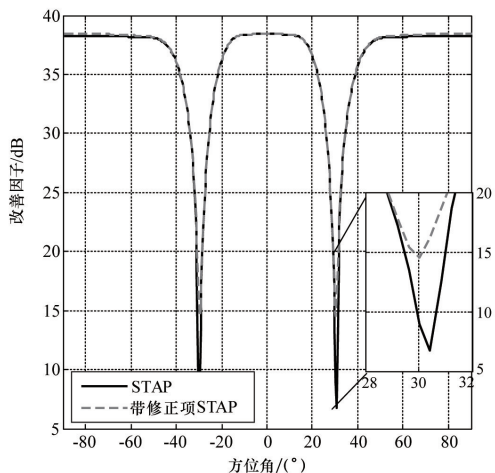


图3 改善因子随方位角变化曲线

Fig. 3 Improvement factor versus azimuth

从图3中可以看出,带修正项STAP(图3虚线)的改善因子在混响脊附近增益明显;而在远离混响的区域,修正项的影响非常小。

4 水下STAD

在给出声纳空时导向向量后,进一步考虑声纳STAD的设计问题。对于式(4)中的二元假设检验,根据文献[32]~[34]的结果并采用式(12)的修正导向向量,不难得到3种适用于运动声纳的STAD方法,分别称为修正广义似然比检测(M-GLRT)、修正自适应匹配滤波(M-AMF)和修正RAO检测器(M-RAO),其检测统计量分别为

$$T_{\text{MGLRT}} = \frac{|\mathbf{x}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{v}_s|^2}{(\mathbf{v}_s^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{v}_s)(1 + \mathbf{x}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{x})}$$

$$T_{\text{MAMF}} = \frac{|\mathbf{x}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{v}_s|^2}{\mathbf{v}_s^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{v}_s}$$

$$T_{\text{MRAO}} = \frac{|\mathbf{x}^H (\hat{\mathbf{R}} + \mathbf{x}\mathbf{x}^H)^{-1} \mathbf{v}_s|^2}{\mathbf{v}_s^H (\hat{\mathbf{R}} + \mathbf{x}\mathbf{x}^H)^{-1} \mathbf{v}_s}$$

其中, $\hat{\mathbf{R}} = \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H$ 为基于辅助数据的采样协方差矩阵。

图4给出了M-GLRT、M-AMF、修正RAO检测器的检测性能曲线,并与未考虑修正项的检测器进行了对比。相关参数设定为 $N=4, L=6, K=2NL, P_{fa}=10^{-4}$; 信混比(SRR)定义为 $SRR = |\alpha|^2 \mathbf{v}_s^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{v}_s$ 。由图4可以看出,M-GLRT和M-AMF的检测性能几乎没有得到提升,而M-RAO的性能提升相对明显。究其原因,是因为相对于GLRT和AMF检测器,RAO方

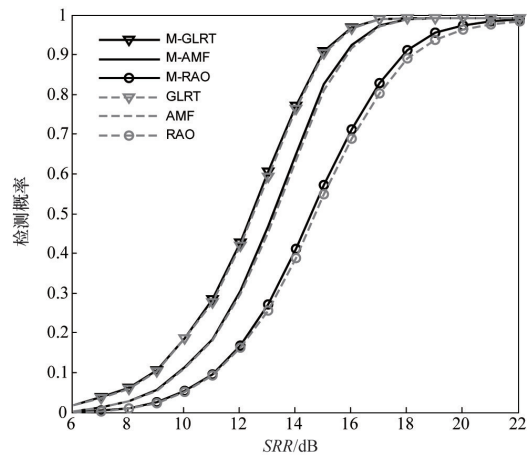


图4 M-GLRT、M-AMF和M-RAO的检测性能

Fig. 4 Detection performance for the M-GLRT, M-AMF and M-RAO

法对处理模型的失配更加敏感。

另一方面,小辅助数据样本情况下的稳健性也是声纳目标检测关注的问题。事实上,在单脉冲情况下,对同一距离

单元的多次观测构成了数据的时域维,为了更准确地估计混响协方差矩阵,独立同分布的辅助数据越多越好。然而,为了保证观测的相干性,距离单元的大小又要满足一定要求,且过多的采样也会带来计算复杂度的增加。因此,小辅助数据样本情况下检测器设计问题对主动声纳目标检测尤为重要。合理利用声纳系统以及工作环境相关的先验知识,是提高检测稳健性的一个有力措施^[35-36]。下面以阵列斜对称特性为例来介绍这类稳健性方法。

当阵列的相位参考中心选为阵列几何中心时,空时导向向量与混响协方差矩阵将具有斜对称性^[37],即满足 $\boldsymbol{\nu}_s = \mathbf{J}\boldsymbol{\nu}_s^*$, $\mathbf{R} = \mathbf{J}\mathbf{R}^*\mathbf{J}$, 其中 \mathbf{J} 为斜对角线为1、其他元素都为0的方阵。利用该特性, GLRT 检验统计量(P-GLRT)可改写为

$$T_{P-GLRT} = \frac{\boldsymbol{\nu}_{sr}^H \widehat{\mathbf{R}}_r^{-1} \mathbf{Y}_r \left[\mathbf{I} + \mathbf{X}_r \widehat{\mathbf{R}}_r^{-1} \mathbf{X}_r^H \right]^{-1} \mathbf{X}_r^H \widehat{\mathbf{R}}_r^{-1} \boldsymbol{\nu}_{sr}}{\boldsymbol{\nu}_{sr}^T \widehat{\mathbf{R}}_r^{-1} \boldsymbol{\nu}_{sr}} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{X}_r = [\mathbf{x}_{er1}, \dots, \mathbf{x}_{erNL}, \mathbf{x}_{or1}, \dots, \mathbf{x}_{orNL}]$; $\boldsymbol{\nu}_{sr} = \text{Re}\{\boldsymbol{\nu}_s\} - \text{Im}\{\boldsymbol{\nu}_s\}$; $\widehat{\mathbf{R}}_r = \text{Re}\{\widehat{\mathbf{R}}_p\} + \mathbf{J} \text{Im}\{\widehat{\mathbf{R}}_p\}$ 。

而 $\mathbf{x}_{er1}, \mathbf{x}_{or1}$ 和 $\widehat{\mathbf{R}}_p$ 的定义如下:

$$\widehat{\mathbf{R}}_p = \sum_{i=0}^{NL-1} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{1}{2} \left(\mathbf{x}_{ik} \mathbf{x}_{ik}^H + \mathbf{J} (\mathbf{x}_{ik} \mathbf{x}_{ik}^H)^* \mathbf{J} \right) \quad (15)$$

$$\mathbf{x}_{er1} = \frac{1}{2} \left[(\mathbf{I} + \mathbf{J}) \text{Re}\{\mathbf{x}_i\} - (\mathbf{I} - \mathbf{J}) \text{Im}\{\mathbf{x}_i\} \right] \quad i \in (0, NL-1) \quad (16)$$

$$\mathbf{x}_{or1} = \frac{1}{2} \left[(\mathbf{I} - \mathbf{J}) \text{Re}\{\mathbf{x}_i\} + (\mathbf{I} + \mathbf{J}) \text{Im}\{\mathbf{x}_i\} \right] \quad i \in (0, NL-1) \quad (17)$$

下面分析小辅助数据样本情况下斜对称检测器的性能,为此设定 $N=4, L=4, K=NL+2, P_{fa}=10^{-4}$ 。为保证 \mathbf{R} 具有斜对称特性,将混响建模为指数相关的复高斯随机向量,其一阶延迟系数为 ρ ,也就是说 \mathbf{R} 的第 (i, j) 个元素为 $\rho^{|i-j|}$, 且 $\rho=0.9$ 。仿真结果如图5所示,可以看到,与 GLRT 相比 P-GLRT 的检测性能有大幅度提升,检测增益约 10 dB。当然,如果可以获得更多的辅助数据,混响协方差矩阵的估计精度将随之提高, P-GLRT 的性能优势会减小。

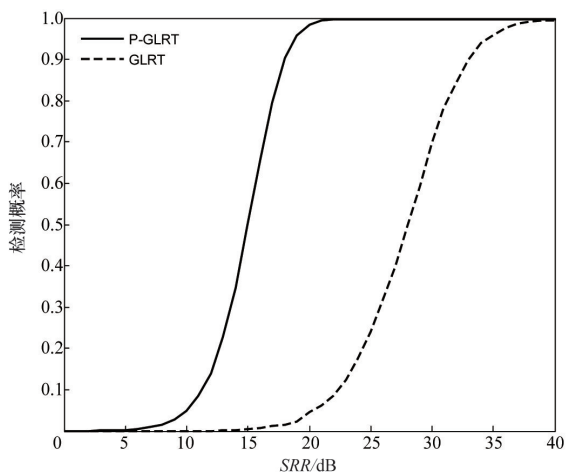


图5 小辅助数据样本情况下 P-GLRT 与 GLRT 的性能比较
Fig. 5 Performance comparison of the P-GLRT and GLRT in the case of small secondary data

5 结论与展望

回顾主动声纳混响抑制与目标检测发展过程的中主流方法和阶段性成果,可以清晰看出,混响抑制与目标检测性能的提升是相辅相成的。在一些早期的方法中以混响抑制为主,通过时域或频域的处理来提高输出信号的信混比,从而提升检测性能。随着波束形成概念的出现,空域滤波后再混响抑制又将检测器的性能向前推进了一步,直到雷达目标检测中统计检测方法的广泛应用,声纳目标检测才摆脱传统的以声纳方程为主的能量检测方法,产生了大量基于混响统计特性的研究成果。随后的工作也大多在先空域波束形成后时频域自适应检测的框架内展开。

随着信号处理技术的发展,多维度数据开始变得可行,随之而来的是空时联合处理技术的出现及其在雷达系统中的成功应用,最典型的应用实例就是机载预警雷达。此后,国外有学者指出 STAP 同样适用于声纳信号处理^[38],但遗憾的是,他们并没有给出一套完整的解决方案。国内也有一些声纳空时处理方面的公开工作^[39-41],但大多都是套用雷达的脉冲多普勒架构,然后以类比的方式收集、处理数据,对声纳的实际情况考虑不够。针对这一问题,本文开展相关研究,提出了一种适用于声纳单脉冲系统的 STAP 模型,在完成空时导向向量建模的基础上,给出了实现稳健空时自适应检测的设计思路。

STAP 为声纳信号处理带来了新的契机。除了从稳健性角度出发,还有大量工作值得进一步研究和完善,如空时波形设计、可调谐检测、空时检测前跟踪,多基地声纳检测,以及 STAP 的实时实现等。这些研究的尽早开展,将为水下 STAP 真正走向实用奠定坚实的基础。

参考文献 (References)

- [1] 朱莹. 主动声纳检测信息原理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Zhu Ye. Active sonar detection principle[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] Etter P C. Underwater acoustic modeling and simulation[M]. 5th Edition. Boca Raton, FL: Spon Press(Taylor & Francis Group), 2013: 299-311.
- [3] Abraham D A, Gelb J M, Oldag A W. Background and clutter mixture distributions for active sonar statistics[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(2): 231-247.
- [4] Abraham D A, Lyons A P. Novel physical interpretations of K-distributed reverberation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(4): 800-813.
- [5] Hodgkiss W. An oceanic reverberation model[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1984, 9(2): 63-72.
- [6] Etter P C. Underwater acoustic modeling and simulation[M]. London: Spon Press(Tay & Francis Group), 2003.
- [7] Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing: Detection theory volume II [M]. Upper Saddle Rive, NJ: Printice Hall, 1998.
- [8] Klemm R. Interrelations between matched-field processing and airborne MTI radar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 18(3): 168-180.

- [9] Klemm R. Detection of slow targets by a moving active sonar acoustic signal processing for ocean exploration[M]. Dordrecht: Springer, 1993: 165-170.
- [10] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 雷达低可观测目标探测技术[J]. 科技导报, 2017, 35(11): 30-38.
Chen Xiaolong, Guan Jian, Huang Yong, et al. Radar low-observable target detection[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(11): 30-38.
- [11] 陈小龙, 关键, 何友, 等. 高分辨率系数表示及其在雷达动目标检测中的应用[J]. 雷达学报, 2017, 6(3): 239-251.
Chen Xiaolong, Guan Jian, He You, et al. High-resolution sparse representation and its applications in radar moving target detection[J]. Journal of radars, 2017, 6(3): 239-251.
- [12] Cox H and Lai H. Geometric comb waveforms for reverberation suppression[C]//Proceedings of 1994 28th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Piscataway, NJ: IEEE, 1995: 1185 - 1189.
- [13] Collins T, Atkins P. Doppler-sensitive active sonar pulse designs for reverberation processing[J]. IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, 1998, 145(6): 347-353.
- [14] 鄢社锋, 马远良. 传感器阵列波束优化设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Yan Shefeng, Ma Yuanliang. Sensor array beam pattern optimization: Theory with applications[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [15] Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 57(8): 1408-1418.
- [16] Cox H, Zeskind R M, Owen M M. Robust adaptive beamforming[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 2008, 35(10): 1365-1376.
- [17] North D O. Analysis of the Factors which Determine Signal/Noise Discrimination in Radar[R]. Princeton, NJ: RCA Laboratories, 1943.
- [18] Turin G L. An introduction to matched filters[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1960, 6(3): 311-329.
- [19] Li W, Ma X, Zhu Y, et al. Detection in reverberation using space time adaptive prewhitening[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(4): E1236 -242.
- [20] 陈鹏, 侯朝焕, 马晓川, 等. 基于匹配滤波和离散分数阶傅里叶变换的水下动目标 LFM 回波联合检测[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2305-2308.
Chen Peng, Hou Chaohuan, Ma Xiaochuan, et al. The joint detection to underwater moving target's LFM echo based on matched filter and discrete fractional Fourier transform [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(10): 2305-2308.
- [21] Scharf L L, Friedlander B. Matched subspace detectors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 2146-2157.
- [22] Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined wigner-hough transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(6): 1511-1515.
- [23] 邓新文, 许琦, 高守勇. 混响背景下应用岭回归对角加载的空时处理方法[J]. 声学技术, 2011, 30(2): 188-192.
Deng Xinwen, Xu Qi, Gao Shouyong. Ridge-Regression-Diagonal-Loading-based space-time adaptive processing for active sonar in reverberation[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(2): 188-192.
- [24] Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1973, 9(2): 237-252.
- [25] Wang Y L, Peng Y N. Configuration and performance analysis of space-time adaptive signal processor for airborne radar[C]//Proceedings of the 1997 IEEE National Radar Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 1997: 343-348.
- [26] Barbois B, Lomes A, Perkalski E. Cell-averaging CFAR for multiple target situation[J]. IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing), 1986, 133(2): 176-186.
- [27] Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1983, 19(4): 608-621.
- [28] Finn H M, Johnson R S. Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter-level estimation[J]. RCA Review, 1968, 29: 414-464.
- [28] Liu W J, Xie W C, Wang Y L. Diagonally loaded space-time adaptive detection[C]//IEEE CIE International Conference on Radar. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1115-1119.
- [29] 王永良, 刘维建, 谢文冲, 等. 机载雷达空时自适应检测方法研究进展[J]. 雷达学报, 2014, 3(2): 201-207.
Wang Yongliang, Liu Weijian, Xie Wenchong, et al. Research progress of space-time adaptive detection for airborne radar[J]. Journal of Radars, 2014, 3(2): 201-207.
- [30] 吕维, 王志杰, 李健辰, 等. 修正空时自适应处理在水下自导系统中的应用[J]. 兵工学报, 2012, 33(8): 944-950
Lu Wei, Wang Zhijie, Li Jianchen, et al. Application of modified space-time adaptive processing in sonar[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(8): 944-950.
- [31] Klemm R. Principles of space-time adaptive processing[M]. 3rd Edition. London: IET, 2006: 545-561.
- [32] Kelly E J. An adaptive detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2007, AES-22(2): 115-127.
- [33] Robey F C, Fuhrmann D R, Kelly E J, et al. A CFAR adaptive matched filter detector[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1992, 28(1): 208-216.
- [34] Maio A D. Rao test for adaptive detection in gaussian interference with unknown covariance matrix[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(7): 3577-3584.
- [35] Shi B, Hao C H, Hou C P, et al. Parametric Rao test for multichannel adaptive detection of range-spread target in partially homogeneous environments[J]. Signal Processing, 2015, 108(108): 421-429.
- [36] Hao C P, Shang X Q, Bandiera F, et al. Bayesian radar detection with orthogonal rejection[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications & Computer Sciences, 2012, 95-A(2): 596-599.
- [37] Cai L J, Wang H. A persymmetric multiband GLR algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1992, 28(3): 806-816.
- [38] Mio K, Chocheyras Y, Doisy Y. Space time adaptive processing for low frequency sonar[C]//Oceans, 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Piscataway, NJ: IEEE, 2000, doi: 10.1109/OCEANS.2000.881786.
- [39] 赵申东, 唐劲松, 蔡志明. 声自导鱼雷空时自适应处理[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(2): 24-30.
Zhao Shendong, Tang Jinsong, Cai Zhiming. Space time adaptive processing of acoustic homing torpedo[J]. Torpedo Technology, 2008, 16(2): 24-30.
- [40] 詹昊可, 蔡志明, 苑秉成. 鱼雷声呐空时自适应混响抑制方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, 31(6): 946-950.

Zhan Haoke, Cai Zhiming, Yuan Bingcheng. Space-time adaptive reverberation suppression in active sonar of torpedo[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2007, 31(6): 946-950.

[41] 王磊, 朱堃, 孙长瑜. 空时处理及在混响抑制中的应用[J]. 声学技

术, 2003, 22(增刊2): 185-187.

Wang Lei, Zhu Ye, Sun Changyu. Space-time processing and its application in reverberation rejection[J]. Technical Acoustics, 2003, 22 (Suppl 2): 185-187

Reverberation suppression and target detection for active sonar

HAO Chengpeng, SHI Bo, YAN Sheng, XU Da

Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract For an active sonar, the reverberation is the main interference in shallow water, and the reverberation suppression is a complicated problem in the sonar signal processing, especially when the sonar carrier moves with a certain velocity to cause the space-time coupling in the reverberation. The space-time adaptive processing (STAP) is an effective way to solve this problem, with the implicit compensation for the motional platform and it allows to obtain the most optimal performance for the reverberation suppression in the theory. This paper reviews the reverberation suppression and target detection methods for the traditional active sonar. By analyzing the difference between the sonar and the radar, the space-time adaptive processing model suitable for a moving sonar is proposed. Based on this model, the design of the robust space-time adaptive detection method is discussed. At last, the paper summarizes the prospects of the reverberation suppression and target detection methods of the moving sonar.

Keywords active sonar; reverberation suppression; target detection; space time adaptive processing

(责任编辑 刘志远)