

# 基于主动时反的浅海目标 DOA 估计优化算法

荆海霞<sup>1,2</sup>, 王海燕<sup>1</sup>, 刘郑国<sup>3</sup>, 申晓红<sup>1</sup>, 张之琛<sup>1</sup>

(1.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072; 2.西安外事学院 工学院, 陕西 西安 710077; )  
(3.中国船舶重工集团公司 办公厅, 北京 100097)

**摘要:**将时反技术应用到浅海目标 DOA 估计中,提出基于主动时间反转(active time reversal, ATR)的浅海目标 DOA 估计优化方法,可有效解决多径、低信噪比条件下的目标 DOA 估计问题。采用经典射线模型,结合阵列信号处理理论,建立了基于均匀线列阵的常规多径 DOA 估计模型和主动时反多径 DOA 估计模型,利用 Capon 算法对所建模型进行了仿真验证,并做了对比分析。仿真结果表明:在低信噪比情况下,主动时反方法可以更好地估计出目标的角度,其分辨率更高,抑制旁瓣的能力更强。

**关键词:**DOA; 估计; 优化; 算法; 目标; 模型; 信噪比; 主动时间反转; 均匀线列阵

**中图分类号:**TP391.9

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2758(2018)02-0270-06

波达方向(direction of arrival, DOA)估计是阵列信号处理的一个重要研究课题,在雷达、声呐、通信等领域有着广泛的应用。一般来说,DOA 估计方法大都是建立在直达波模型上,忽略多径或想办法消除多径带来的影响<sup>[1-3]</sup>,其把多径看作是一个不利的因素;在直达波模型基础上,提出了各种各样的波达方向估计方法,但这些方法大都建立在高信噪比条件下,在低信噪比时算法性能下降,甚至失效。

近些年提出的时间反转<sup>[4]</sup>(time reversal, TR 或时反)方法,由于利用了声互易性及时反不变性原理,可自适应地修正多径信道引起的信号畸变,使目标在源位置获得空时聚焦,因此可将时反方法应用于目标的 DOA 估计中,尝试解决低信噪比情况下常规方法无法正确估计的问题。

其中,文献[5-6]将主动时反(active time reversal, ATR)方法分别应用到探地雷达和移动通信网络的目标 DOA 估计中,各自推导了 TR/DOA 估计器的 CRB,并和未引入 TR 的 DOA 估计器性能进行了比较;仿真结果表明,引入 TR 方法后 DOA 估计器的性能得到了提高。文献[7]在文献[6]的基础上,加入了距离估计器,实现了对单目标的主动定位。文献[8]在文献[7]的基础上,研究了多输入

多输出(MIMO)系统中的目标 DOA 问题,建立了 TR/MIMO 模型;随后文献[9]又将 TR 引入多普勒频移条件下的 MIMO 雷达目标 DOA 估计中;文献[10]将压缩感知(compressive sensing, CS)和 TR 技术结合应用到 MIMO 雷达,实现了 DOA、DOD(direction of departure)及多普勒频移的联合估计。文献[11]提出了一种虚拟时间反转(virtual time reversal, VTR)DOA 估计算法,应用于空间电磁辐射源的远场窄带信号源方位角的被动估计中,通过查找扫描区域中能量最大的点来确定辐射源的方位角。以上电磁波领域的时反 DOA 估计方法,对实现水下目标的时反 DOA 估计有一定的借鉴意义。

文献[12]针对均匀浅海目标 DOA 估计,提出了一种基于非均匀线列阵(non-uniform line array, NLA)的被动时反(passive time reversal, PTR)超指向性模型,从信号检测角度建立了仿真所需模型,采用常规波束形成方法,实现了低信噪比情况下目标的方位估计。文献[13]针对水下声多径时变信道,提出了一种多普勒效应下的 TR 目标定向算法,通过频率补偿与时间反转处理后,可以精确地实现目标定向。以上水下目标时反定向方法建立在被动时反方法基础上,首先需解决如何精确获取真实海洋

收稿日期:2017-05-09

基金项目:国家重点研发计划资助(2016YF01400200)、国家自然科学基金(61571365, 61571367, 61671386)与陕西省教育厅科研项目(16JK2173)资助

作者简介:荆海霞(1976—),女,西北工业大学博士研究生,主要从事时反信号处理研究。

信道的问题,因为只有当模拟信道与实际海洋信道完全匹配时,才能达到理想的 TR 空时聚焦效果,从而达到精确 DOA 估计的目的。

主动时间反转相对被动时间反转,由于利用了海洋信道传播的互易性,无需环境的先验知识,可简化信号处理的运算量,相比而言更适用于恶劣环境,物理上更容易实现。

基于此,本文将结合前期研究的主动时反聚焦特性<sup>[14-15]</sup>和探测特性<sup>[16]</sup>,进一步利用主动时间反转方法对水下目标的俯仰角 DOA 估计问题进行研究,基于水声信道的射线理论和阵列信号处理中的直达径模型,建立了基于均匀线列阵(uniform line array, ULA)的常规多径 DOA 估计和主动时反 DOA 估计模型,应用 Capon 算法对所建模型进行了 DOA 估计实现,对有无主动时反时的估计算法性能进行了比较。仿真结果表明,在同样的信噪比情况下,所提出的主动时反 DOA 方法可以获得比常规方法更好的估计结果,尤其是在低信噪比情况下更为明显。

## 1 均匀线列阵多径 DOA 估计模型

基于射线理论的均匀线列阵多径 DOA 估计如图 1 所示。

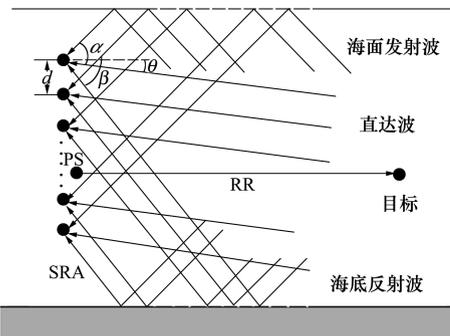


图 1 均匀线列阵多径 DOA 估计模型

图中,收发合置换能器阵(source-receive array, SRA)为均匀线列阵,其阵元个数为  $P$ ,阵元间距为  $d$ ;为方便表示,图中只画出了目标与 SRA 之间的 3 条传播路径:直达波、海面反射波与海底发射波,其入射角分为  $\theta, \alpha, \beta$ 。但为更具有一般性,后面推导的声传播路径不止局限于这 3 条径,而采用  $N$  条径表示。

### 1.1 常规多径 DOA 估计模型

位于  $k$  阵元的 PS(探测声源)发射信号  $f(t)$ ,根据射线理论,设发射声源与目标之间的信道传输函数为:

$$h_k(t) = \sum_{n=1}^N c_{kn} \delta(t - \tau_{kn}) \quad (1)$$

式中,  $N$  表示声线总数,  $c_{kn}, \tau_{kn}$  分别表示第  $k$  个阵元和目标之间第  $n$  条本征声线(也可认为是传播路径)对应的衰减幅度和时延。忽略探测声源到目标的信道噪声,则目标接收到的信号为:

$$x_k(t) = f(t) \otimes h_k(t) = \sum_{n=1}^N c_{kn} f(t - \tau_{kn}) \quad (2)$$

忽略目标反射的影响(即假定目标反射系数为 1),考虑接收过程噪声的影响,则 SRA 第  $j$  个阵元接收的信号为:

$$y_j(t) = x_k(t) \otimes h_j(t) + v_j(t) = \sum_{n=1}^N c_{kn} f(t - \tau_{kn}) \otimes \sum_{m=1}^M c_{jm} \delta(t - \tau_{jm}) + v_j(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_{jm} c_{kn} f(t - \tau_{jm} - \tau_{kn}) + v_j(t) \quad (3)$$

式中,  $h_j(t)$  表示目标与第  $j$  个阵元之间的信道函数,  $v_j(t)$  表示第  $j$  个阵元接收的环境噪声,  $c_{jm}, \tau_{jm}$  分别表示目标和第  $j$  个阵元之间的第  $m$  条路径对应的衰减幅度和时延。根据对海洋声场的仿真可知,目标经第  $m$  条径到达各个阵元的衰减幅度差别非常小,为了简化表示,可认为其只和路径有关,而与阵元无关,即可将  $c_{jm}$  表示成  $c_m$ 。

设发射信号形式为:  $f(t) = s(t)e^{j\omega t}$ ,结合阵列信号处理的远场窄带模型理论,(3)式可表示为:

$$y_j(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_m c_n f(t - \tau_{kn} - \tau_{1m} - \Delta\tau_{jm}) + v_j(t) \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_m c_n s(t) e^{j\omega_c(t - \tau_{kn} - \tau_{1m} - \Delta\tau_{jm})} + v_j(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_m c_n s(t) e^{j\omega_c t} e^{-j\omega_c \tau_{kn}} e^{-j\omega_c \tau_{1m}} e^{-j\omega_c \Delta\tau_{jm}} + v_j(t) = \sum_{m=1}^M c_m e^{-j\omega_c \Delta\tau_{jm}} e^{-j\omega_c \tau_{1m}} \cdot \sum_{n=1}^N c_n e^{-j\omega_c \tau_{kn}} \cdot s(t) e^{j\omega_c t} + v_j(t) \quad (4)$$

式中,  $\tau_{1m}$  表示的是目标到达阵元 1 的第  $m$  条径的时延,  $\Delta\tau_{jm}$  表示的是目标经过第  $m$  条径到达  $j$  阵元与第 1 阵元的相对时延。

将第  $j$  个阵元接收信号推广到各个阵元,并表示成矩阵形式,(4)式可变为:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{ACDX}_k \mathbf{F}(t) + \mathbf{V}(t) \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{Y}(t) = [y_1(t), \dots, y_P(t)]^T$  表示 SRA 的  $1 - P$  个阵元接收到的信号;  $\mathbf{A}$  为  $P \times M$  矩阵, 表示相对首阵元的时延矩阵, 如(6) 式所示;  $\mathbf{C}$  为  $M$  阶对角矩阵,  $M$  为目标到各阵元的路径总数, 其对角元素  $c_m$  表示目标经过第  $m$  条路径到达各阵元的衰减幅度;  $\mathbf{F}(t) = s(t) e^{j\omega_c t}$  称为发射矩阵;  $\mathbf{D} = [e^{-j\omega_c \tau_{11}}, e^{-j\omega_c \tau_{12}}, \dots, e^{-j\omega_c \tau_{1M}}]^T$  表示的是目标到阵列 1 的时延矩阵。

$$\mathbf{X}_k = \sum_{n=1}^N c_n e^{-j\omega_c \tau_{kn}} = \mathbf{A}(k, :) \mathbf{CD}$$

可认为是从  $k$  阵元发射的信号经过信道到达目标的接收信号矩阵;  $\mathbf{V}(t)$  表示噪声矩阵。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} e^{-j\omega_c \Delta \tau_{11}} & e^{-j\omega_c \Delta \tau_{12}} & \dots & e^{-j\omega_c \Delta \tau_{1M}} \\ e^{-j\omega_c \Delta \tau_{21}} & e^{-j\omega_c \Delta \tau_{22}} & \dots & e^{-j\omega_c \Delta \tau_{2M}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{-j\omega_c \Delta \tau_{P1}} & e^{-j\omega_c \Delta \tau_{P2}} & \dots & e^{-j\omega_c \Delta \tau_{PM}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

参考阵列信号处理理论, 当均匀线列阵的阵元间距为  $d$  时, 可将(6) 式表示成:

$$\mathbf{A} = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_M)] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_1} & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_2} & \dots & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (P-1) d \sin \theta_1} & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (P-1) d \sin \theta_2} & \dots & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (P-1) d \sin \theta_M} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\mathbf{A}$  为包含了多径信息的阵列流形矩阵(又称: 方向矩阵), 主要取决于阵列结构与目标来波方向, 其中第  $m$  列各量代表的是目标经过第  $n$  条径到达各阵元的信息;  $\theta_M$  表示目标到阵元的第  $m$  条径的角度信息。

### 1.2 基于 ATR 的多径 DOA 估计模型

考虑主动时反情况, 将 SRA 各阵元接收信号分别进行时反, 以第  $j$  个阵元为例, 有:

$$y_j(-t) = \mathbf{B} \cdot s(-t) e^{-j\omega_c t} + v_j(-t) \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{B} = \left( \sum_{m=1}^M c_m e^{-j\omega_c \Delta \tau_{jm}} e^{-j\omega_c \tau_{1m}} \right) \cdot \sum_{n=1}^N c_n e^{-j\omega_c \tau_{kn}}$ , 其值与时间  $t$  无关, 可看成一系数; 又由于采用主动时反, 发射信号频率已知, 故可采用滤波器处理<sup>[16]</sup>, 在时反前先消除噪声的影响, 故(8) 式可变为:

$$y_j(-t) \approx \mathbf{B} \cdot s(-t) e^{-j\omega_c t} = \mathbf{B} f(-t) \quad (9)$$

将其作为二次发射信号重新发射到信道中, 依然满足远场窄带模型理论; 重复上述第一次过程, 参考(1) ~ (4) 式, 设时反后第  $l$  个阵元接收信号为

$z_l(t)$ , 有:

$$z_l(t) \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_m c_n B_s(-t) e^{-j\omega_c(t-\tau_{jn}-\tau_{1m}-\Delta \tau_{lm})} + v_l(t) = \sum_{m=1}^M c_m e^{j\omega_c \Delta \tau_{lm}} e^{j\omega_c \tau_{1m}} \cdot \sum_{n=1}^N c_n e^{j\omega_c \tau_{jn}} \cdot B_s(-t) e^{-j\omega_c t} + v_l(t) \quad (10)$$

再参考(5) ~ (7) 式, 可得第  $j$  个阵元时反发射后 SRA 接收信号  $Z_j(t)$  为:

$$Z_j(t) = \mathbf{A}^* \mathbf{CD}^* \mathbf{X}_j^* y_j(-t) + \mathbf{V}(t) \quad (11)$$

式中, 符号“\*”表示共轭,  $\mathbf{C}, \mathbf{A}, \mathbf{D}, \mathbf{V}$  同(5) 式,  $\mathbf{X}_j$  和(5) 式中的  $\mathbf{X}_k$  意义相同, 只不过  $\mathbf{X}_k$  为  $k$  阵元发射的接收信号矩阵,  $\mathbf{X}_j$  为  $j$  阵元发射的接收信号矩阵。

将 SRA 的第  $j$  个阵元时反发射情况推广到所有阵元, 可得时反后 SRA 的接收信号总和为:

$$\mathbf{Z}_{tr} = \sum_{j=1}^P Z_j(t) = \sum_{j=1}^P [\mathbf{A}^* \mathbf{CD}^* \mathbf{X}_j^* y_j(-t) + \mathbf{V}(t)] = \mathbf{A}^* \mathbf{CD}^* \sum_{j=1}^P \mathbf{X}_j^* y_j(-t) + \sum_{j=1}^P \mathbf{V}(t) \quad (12)$$

## 2 DOA 估计算法

### 2.1 常规 Capon 算法

根据阵列信号处理理论, Capon 算法的目的是想办法减小噪声和期望信号以外的干扰信号功率, 同时把期望方向的信号功率维持在一定增益上<sup>[17]</sup>, 结合(5) 式建立的模型可将 Capon 算法表示成以下最小值问题:

$$\begin{aligned} & \min \mathbf{w}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{Y_c} \mathbf{w}(\theta) \\ & \text{s.t. : } \mathbf{w}^H(\theta) \mathbf{a}(\theta_1) = 1 \end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $\hat{\mathbf{R}}_{Y_c} = \frac{1}{N} \mathbf{E} \{ \mathbf{Y}_c(t) \mathbf{Y}_c(t)^H \}$  为考虑多径时的阵列输出信号的样本协方差矩阵,  $\theta_1$  为期望角度信息,  $\mathbf{w}$  为权值量。

利用 Lagrange 乘子法可求得上述问题的解为:

$$\mathbf{w} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_{Y_c}^{-1} \mathbf{a}(\theta_1)}{\mathbf{a}^H(\theta_1) \hat{\mathbf{R}}_{Y_c}^{-1} \mathbf{a}(\theta_1)} \quad (14)$$

将(14) 式代入(13) 式可得, 期望方向以外功率最小时期望方向的功率最大, 为:

$$P = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta_1) \hat{\mathbf{R}}_{Y_c}^{-1} \mathbf{a}(\theta_1)} \quad (15)$$

因此 Capon 算法的空间谱可定义为:

$$P = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{z_r}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (16)$$

通过对 (16) 式进行谱峰搜索可求出目标的 DOA 值。式中:

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{-j2\pi/\lambda d \sin\theta}, \dots, e^{-j2\pi/\lambda (P-1) d \sin\theta}]^T \quad (17)$$

## 2.2 主动时反 Capon 算法

根据 (12) 式,遵循上述常规 DOA 估计同样的步骤,有:

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{w}_{tr}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{z_r} \mathbf{w}_{tr}(\theta) \\ \text{subject to: } & \mathbf{w}_{tr}^H(\theta) \mathbf{a}(\theta_1) = 1 \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $\hat{\mathbf{R}}_{z_r} = \frac{1}{N} \mathbf{E}\{\mathbf{Z}_{tr}(t) \mathbf{Z}_{tr}^H(t)\}$ , 为时反后阵列输出信号的样本协方差矩阵,其他值同上。此时时反 Capon 算法的空间谱为:

$$P_{tr} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{z_r}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (19)$$

通过对 (19) 式进行谱峰搜索可求出目标的 DOA 值。

相对常规 Capon 算法,主动时反算法中的目标反射信号,由于在接收阵进行了时反操作后重新发射到目标上,根据时反的聚焦特性可知,SRA 各阵元的二次发射信号将会在目标处形成聚焦,该过程相当于波束形成过程将波束聚焦在了目标上,只不过时反方法由于利用了多径,相对波束形成其聚焦在目标上的能量更大。同时,文献[16]论证了单阵元主动时反探测阵可提高接收信号的信噪比,此结论可推广至多阵元探测。从以上 2 个角度可知,利用主动时反方法进行目标的 DOA 估计,其估计的精度会更高,抑制旁瓣的能力会更强。

## 3 仿真研究

考虑均匀浅海波导环境,各深度声速均为 1.5 km/s。仿真模型参考图 1,其中时反阵(SRA)取 12 个阵元,阵元间距为 0.75 m,首阵元 1#距离水面 75 m;PS 的深度为 78.75 m,目标深度 165.5 m,PS 与目标的水平距离为 1 km,海深 300 m;PS 发射频率为 1 kHz 的 CW 信号,快拍数取 1 000。

按以上条件,在 MATLAB 仿真环境下,利用 Bellhop 专用仿真工具箱模拟海洋声场环境,忽略海面或海底的多次反射路径,只考虑图 1 所示的 3 条传播路径情况,可得到目标与 SRA 各阵元之间的各

路径的时延、幅值及角度信息。通过仿真可知,目标反射的声波经海面一次反射径(或直达径,或海底一次反射径)到达各阵元的幅值和角度信息非常接近,可近似将同一路径的值取为一个值;按以上路径顺序,到达各阵元的幅度信息依次约为:  $\{0.65 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-3}, 0.5 \times 10^{-3}\}$ , 角度依次约为:  $\{13.68^\circ, -5.00^\circ, -19.58^\circ\}$ ;目标到参考阵元(首阵元)的时延值依次为:  $\{0.686, 0.669, 0.708\}$ ,其他参数略。

为了对比同样条件下引入主动时反前后 Capon 算法的性能,信噪比定义为:考虑多径时的首次接收信号中信号与噪声的比值;主动时反二次接收信号加入和首次接收信号一样的噪声。

图 2 和图 3 分别为信噪比分别为 -15 dB 和 -20 dB 时常规 Capon 算法和加入主动时反后的 ATR Capon 算法的 DOA 估计图,图中竖线表示角度期望值。

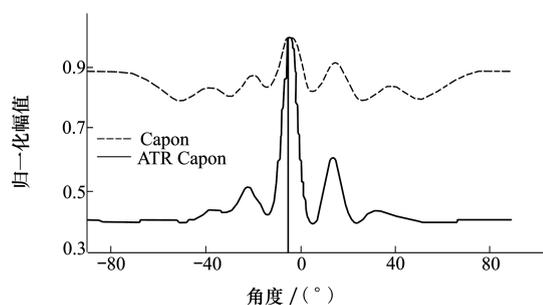


图 2  $S_{NR} = -15$  dB 时 Capon 算法和 ATR Capon 算法的 DOA 估计图

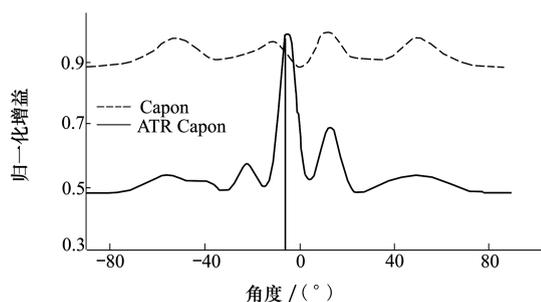


图 3  $S_{NR} = -20$  dB 时 Capon 算法和 ATR Capon 算法的 DOA 估计图

从图 2 可以看出,在信噪比为 -15 dB 时,ATR Capon 算法的旁瓣远低于其相应主瓣能量,估计值更接近于待估计目标期望值,且分辨率高于常规 Capon 算法;当信噪比为 -20 dB 时,常规 Capon 算法已不能正确估计出目标,而 ATR Capon 算法估计出的目标值基本不变。

为了更好地比较出以上 2 种算法的性能,对上述 2 种算法分别做了 1 000 次蒙特卡罗仿真,比较在不同信噪比情况下,2 种算法估计的均方根误差 (RMSE) 情况,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,当信噪比大约从 -12 dB 开始 2 种算法的 RMSE 非常接近,故图 5 放大了 -12~0 dB 的情况。

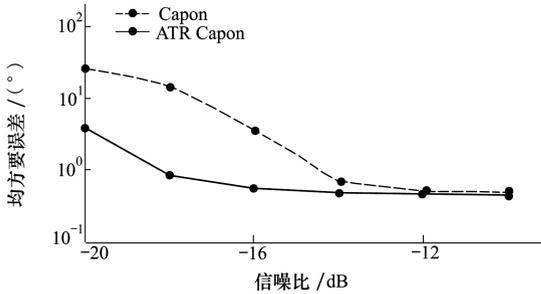


图 4 Capon 算法和 ATR Capon 算法的 DOA 估计均方根误差分析图

综合图 4 和图 5 可以看出,ATR Capon 算法估计出的角度均方根误差要小于常规 Capon 算法,尤其是当信噪比非常低时,ATR Capon 算法的优势尤

为明显。

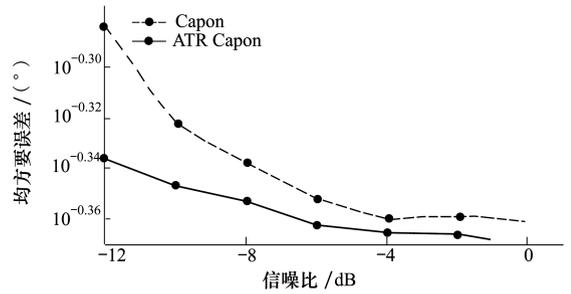


图 5 信噪比为 -12~0 dB 时 Capon 算法和 ATR Capon 算法的 DOA 估计均方根误差分析图

### 4 结 论

本文利用主动时间反转方法研究了浅海目标 DOA 估计性能。仿真结果表明:在低信噪比情况下,基于 ATR Capon 方法的 DOA 估计相对于常规 Capon 方法的 DOA,分辨率更高,抑制旁瓣的能力更强,估计结果更准确,可很好地应用于低信噪比多径条件下的 DOA 估计。

### 参考文献:

- [1] Daeipour E, Blair W D, Bar-Shalom Y. Bias Compensation and Tracking with Monopulse Radars in the Presence of Multipath [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(3): 863-882
- [2] Garber S M. High Resolution Sonar Signals in a Multipath Environment [J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1966, AES-2(6): 431-440
- [3] Derryberry J H, Gregg W D. On Optimizing Array Reception of Multipath [J]. IEEE Trans on Aerospace Electronic System, 1970, AES-6(2): 188-199
- [4] Mathias Fink. Time Reversal of Ultrasonic Fields-Part I: Basic Principles [J]. IEEE Trans on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, 39(5): 555-566
- [5] Foroohar Foroozan, Amir Asif. Cramer-Rao Lower Bound for Time Reversal Active Array Direction of Arrival Estimation in Multipath Environment [C] // 2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing: 2646-2649
- [6] Foroohar Foroozan, Amir Asif. Time Reversal Direction of Arrival Estimation with Cramer-Rao Bound Analysis [C] // 2010 IEEE Global Telecommunications Conference: 1-5
- [7] Foroohar Foroozan, Amir Asif. Time Reversal Based Active Array Source localization [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2011, 59(6): 2655-2668
- [8] Foroohar Foroozan, Amir Asif. Direction Finding Algorithms for Time Reversal MIMO Radars [C] // 2011 IEEE Statistical Signal Processing Workshop: 433-436
- [9] Foroohar Foroozan, Amir Asif. Time Reversal MIMO Radar for Angle-Doppler Estimation [C] // 2012 IEEE Statistical Signal Processing Workshop: 860-863
- [10] Mohammad H S, Sajjadih, Amir Asif. Compressive Sensing Time Reversal MIMO Radar: Direction and Doppler Frequency Estimation [J]. IEEE Tran on Signal Processing Letters, 2015, 22(9): 1283-1287
- [11] Fu Yongqing, Liu Wei, Bai Ruijie, et al. A Novel Virtual Time Reversal Method for Passive Direction of Arrival Estimation [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015(2015): 1-12

- [12] 杨伏洲,王海燕,申晓红,等. 基于时间反转的非均匀线列阵超指向性阵元分布模型[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(12): 1907-1910  
Yang Fuzhou, Wang Haiyan, Shen Xiaohong, et al. Super-Direction Element Distribution Model of NLA Based on TR[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(12): 1907-1910 (in Chinese)
- [13] Shao Jianfeng, Zhang Xiaomin, Liu Yihai, et al. Estimation of Time Reversal Target DOA over Underwater Acoustic Multipath Time-Varying Channel[C] // 2014 IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing: 795-799
- [14] 荆海霞,李洪义. 基于主动时间反转的水下目标自适应聚焦研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(24): 12-15  
Jing Haixia, Li Hongyi. Self-Adaptive Focusing of Underwater Target Based on Active Time Reversal[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(24): 12-15 (in Chinese)
- [15] 荆海霞,申晓红,王海燕. 浅海声源信道中信号优化探测研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(10): 157-161  
Jing Haixia, Shen Xiaohong, Wang Haiyan. Signal Optimization Detection in Acoustic Source Channel under Shallow Water[J]. Computer Simulation, 2016, 33(10): 157-161 (in Chinese)
- [16] 荆海霞,申晓红,刘镭. 基于主动时间反转的目标探测性能研究[J]. 电视技术, 2016, 40(8): 103-107  
Jing Haixia, Shen Xiaohong, Liu Lei. Performance Study of Target Detection Based on Active Time Reversal[J]. Video Engineering, 2016, 40(8): 103-107 (in Chinese)
- [17] 孙超. 水下多传感器阵列信号处理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2007  
Sun Chao. Underwater Multi-sensor Array Signal Processing[M]. Xi'an, Northwestern Polytechnical University Press, 2007 (in Chinese)

## Optimization Algorithm for DOA Estimation of a Shallow Sea Target Based on Active Time Reversal

Jing Haixia<sup>1,2</sup>, Wang Haiyan<sup>1</sup>, Liu Zhengguo<sup>3</sup>,

Shen Xiaohong<sup>1</sup>, Zhang Zhichen<sup>1</sup>

(1.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China;  
2.School of Engineering, Xi'an International University, Xi'an 710077, China;  
3.China Shipbuilding Industry Corporation, Beijing, 100097, China)

**Abstract:** Time reversal technique is applied to the DOA estimation of a shallow sea target, and a method based on active time reversal (ATR) is proposed to achieve correct estimation under multipath and low signal-to-noise (SNR) conditions. Combining the classical ray theory with array signal processing theory, the conventional multipath DOA estimation model based on uniform line array and the ATR-based DOA estimation model are set up respectively. The Capon algorithm is employed to simulate the models and compare it with conventional one. The simulation results show that the ATR-based estimation model can better estimate the azimuth angle of the target than the conventional counterpart, provide higher resolution and better suppress side lobes with the same signal-to-noise ratio (SNR), especially the low SNR.

**Keywords:** direction of arrival, estimation, optimization, algorithms, targets, models, signal to noise ratio, active time reversal (ATR), uniform line array