

目标多亮点的波束域高分辨方位估计方法研究

贾继鹏, 于清津, 马泉成

中国人民解放军 91245 部队, 辽宁葫芦岛 125001

摘要 对基于目标多亮点的波束域 MUSIC 算法进行了研究。把目标不再看成为一个点目标, 而是看成有一定尺度大小的多亮点目标。首先建立了尺度目标多亮点的回波信号模型, 再通过设计波束转换矩阵将阵元域信号转换到波束域, 然后对波束域信号应用 MUSIC 算法估计目标亮点的方位, 并在不同信噪比和不同敌舷角条件下对波束域 MUSIC 方法方位估计的分辨概率和均方误差进行分析。仿真结果表明, 当声纳位于目标正横方向附近时或在高信噪比条件下, 波束域 MUSIC 方法具有很高的方位分辨能力和估计精度。

关键词 波束域; 方位估计; 高分辨; 亮点

中图分类号 TN911.7

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)13-0067-04

Beamspace High-resolution Algorithms for Target High-lights

JIA Jipeng, YU Qingjin, MA Quancheng

No. 91245 Troop of PLA, Huludao 125001, Liaoning Province, China

Abstract A beamspace MUSIC (B-MUSIC) algorithm for high-lights of a target is proposed in this paper. A target is assumed to be of a finite size with multiple high-lights instead of just a "point". An array signal model of echoes from multiple high-lights of the target is established. A beam transformation matrix is defined to convert the signals from the elementspace to the beamspace. Then the MUSIC algorithm is used to estimate the direction of arrival (DOA) for the multiple high-lights. The resolution probability and the mean square error of the estimates of the B-MUSIC based on different SNRs and different broad angles are statistically analyzed by simulations. The results show that the proposed algorithm enjoys high angular resolution and good precision in the condition that the sonar is located near the vertical direction to the target broadside or the SNRs is high.

Keywords beam space; direction-of-arrival; high-resolution; high-lights

0 引言

随着科学技术的发展, 波束域高分辨方位估计算法在雷达、声纳、通信、鱼雷自导系统、海洋开发等诸多领域中有着广泛的应用前景^[1-3], 经典的波束域高分辨方位估计算法, 在理论上已经取得了很多突破, 出现了许多实现简单、分辨能力强的方法。但大多数方法在提出的时候都是假设目标是一个单亮点, 而忽略了目标本身固有的尺寸。本文基于目标多亮点技术, 对波束域 MUSIC 算法进行了研究 (以声纳工作方式为例), 通过计算机仿真, 得出了大量的计算机仿真结果, 并对这些数据进行了分析, 结果证明波束域高分辨方位估计算法有着良好和广泛的应用价值。

1 信号模型

1.1 目标亮点的概念

由于目标本身具有一定的尺度, 在入射信号的作用下, 会产生多个强散射点, 其回波中存在多个较强的分量, 这些强散射点称为亮点。在亮点上目标的反射最强, 目标回波中较多地反映了亮点的信息, 这些亮点在空间分布的位置反映了目标的尺寸。

1.2 目标多亮点的信号模型

考虑 M 元均匀线阵, 各阵元特性相同, 且各阵元间距为 d , 设发射信号为 $e(t)=s(t)e^{j2\pi f_0 t}$, 在理想状态下, 可用一个卷积模型来描述目标回波, 为^[4]

$$x(t)=e(t)\otimes h(t) \quad (1)$$

收稿日期: 2009-04-03

作者简介: 贾继鹏, 助理工程师, 研究方向为信号处理、数据传输处理, 电子信箱: jiajipeng_0@126.com

其中, $x(t)$ 为回波, $h(t)$ 为目标的冲激响应 (反射系数序列), 表示目标的反射特性。通常目标亮点的反射强度大于环境的反射强度, 因此, 在许多场合, 目标的冲激响应序列可以简化为脉冲串。设目标有 d 个亮点, 沿目标轴线方向分布, 即 $h(t) = \sum_{i=1}^d u_i \delta(t - \tau_i)$ 是亮点反射强度, τ_i 为亮点到观测点的时延, 则亮点反射信号为 $u_i e(t - \tau_i)$, 多亮点回波是 d 个亮点反射信号的叠加, 可写作

$$x(t) = \sum_{i=1}^d u_i e(t - \tau_i) \quad (2)$$

其中, 时延 τ_i 与反映目标位置及姿态的目标距离和舷角 (目标和鱼雷连线与目标航向的夹角) 有关。

应用阵列处理方法进行目标多亮点方位估计, 需要进一步建立目标多亮点的阵列信号模型。由均匀线列阵可得: d 个亮点相对观测点的方位为 θ_i , 则噪声场中第 m 个阵元的输出为

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^d u_i s \left(t - \tau_i - \frac{(m-1)\Delta}{c} \sin \theta_i \right) \cdot \exp \left[j\omega_0(t - \tau_i) - j2\pi \frac{(m-1)\Delta}{\lambda} \sin \theta_i - j\varphi_i \right] + n_m(t) \quad (3)$$

其中, u_i 为目标反射强度, 一般认为它服从瑞利分布; c 为发射波在介质中的传播速度, λ 为载波波长; φ_i 为目标反射特性及信道不均匀性等因素引起的初相位, 一般认为它在 $[0, 2\pi]$ 间均匀分布。 $n_m(t)$ 为噪声, 它服从高斯分布, 并且信号源和噪声是统计独立的。

通常阵列尺寸远小于目标的距离, 故阵元间距在包络中引起的时延可忽略, 认为它只影响载波相位, 这样阵列信号可简化为

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^d u_i s(t - \tau_i) \exp \left[j\omega_0 t - j2\pi \frac{(m-1)\Delta}{\lambda} \sin \theta_i - j\varphi_i \right] + n_m(t) \quad (4)$$

其中, $\omega_i = 2\pi \frac{\Delta}{c} \sin \theta$ 称为空间角频率, $\phi_i = \omega_0 \tau_i + \varphi_i$ 仍为 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机相位。近似处理后, 时延和方位已经“解耦”, 时延只影响包络, 方位只影响载波相位, 不再有交叉项, 大大简化了反映目标亮点的阵列模型。目标多亮点的阵列信号模型可以用矩阵形式^[5]表示为

$$X(t) = A(a)S(t) + N(t) \quad (5)$$

式中, $A(a)$ 为阵元域阵列流型, 它表示多个亮点的方向信息, 阵列流型的每一个列向量就是信号方向向量 $a(\theta_i)$, 表示单个亮点的方位信息。 $S(t)$ 为目标亮点反射信号向量, 由亮点反射信号 $u_i s(t - \tau_i) e^{j(\omega_0 t - \phi_i)}$ 组成, $N(t)$ 表示噪声向量。

各向量分别表示为

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$$

$$A(a) = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_d)]$$

$$a(\theta_i) = [1, \exp(-j \frac{2\pi f \Delta}{c} \sin \theta_i), \dots, \exp(-j \frac{2\pi f \Delta}{c} (M-1) \sin \theta_i)]^T$$

$$S(t) = [u_1 s(t - \tau_1) e^{j(\omega_0 t - \phi_1)}, u_2 s(t - \tau_2) e^{j(\omega_0 t - \phi_2)}, \dots, u_d s(t - \tau_d) e^{j(\omega_0 t - \phi_d)}]^T$$

$$N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$$

在亮点估计问题中, 可以利用回波的时间采样序列来估计时延, 利用回波的空间采样序列来估计目标方位。

建立目标多亮点的回波模型和阵列信号模型时, 时延 τ_i 和方位 θ_i 可由尺度目标的几何模型求解得到。设敌舷角为 β , 目标长度为 L , 声纳到目标的距离为 $R = R_1$, 以声纳为中心, 建立平面极坐标系, 则尺度目标几何模型如图 1 所示, 当给定了参数 β , L , R 和亮点分布后, 就可由几何关系求得各亮点的时延和方位角, 从而给出目标多亮点的回波信号模型以及阵列信号模型。图 1 是尺度目标的几何模型。

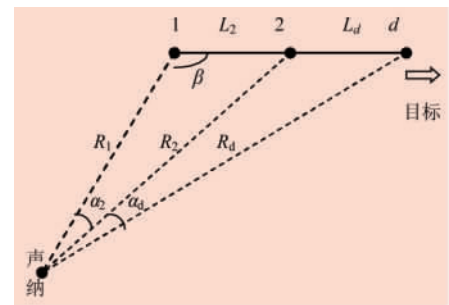


图 1 尺度目标几何模型

Fig. 1 Geometry configuration of the target and the sonar

根据尺度目标几何模型, 可以先解得亮点距离参数 R_1 , 再得到时延 τ_i 和方位角 α_i 。由几何关系得

$$R_i^2 = R^2 + L_i^2 - 2RL_i \cos \beta \quad (6)$$

式中, L_i 是亮点分布位置, 亮点等间隔分布时, $L_i = \frac{L}{d-1}(i-1)$, $i=1, 2, \dots, d$ 。时延 τ_i 为

$$\tau_i = \frac{2R_i}{c} \quad (7)$$

方位角 α_i 可由下式得到

$$\frac{L_i}{\sin \alpha_i} = \frac{R_i}{\sin \beta} \quad (8)$$

即目标方位为 $\theta_i = \alpha_i + \alpha_{i-1}$, 且 $\alpha_1 = 0$ 。

亮点方位估计是已知发射信号 $e(t)$, 回波 $X(t)$ 和阵列信号 $x_m(t)$ 的条件下, 应用阵列处理方法估计出目标亮点方位参数 θ_i 。

2 波束域 MUSIC 算法理论

2.1 波束转换矩阵的构成

针对均匀线列阵, 文献[6]介绍了一种简洁的波束转换矩阵构成方法。 $M \times B$ 波束转换矩阵 T 可表示为

$$T = \frac{1}{\sqrt{M}} \left[u \left(\frac{2}{M} \right), u \left(\frac{4}{M} \right), \dots, u \left(\frac{2(M-1)}{M} \right) \right] \quad (9)$$

式中

$$u(\eta) = [1, e^{j\eta}, e^{j2\eta}, \dots, e^{j(M-1)\eta}]^T \quad (10)$$

从式中可以看出, T 实际上相当于形成一定的波束覆盖空间, 经该矩阵转换后, 原 $M \times 1$ 阵列输出向量转换为 $B \times 1$

波束空间向量。可以估计方位处在 $\left[\arcsin\left(\frac{M\lambda}{M\Delta}\right), \arcsin\left((m+B-1)\frac{\lambda}{M\Delta}\right) \right]$ 内的目标源。参数 m 用来控制该波束覆盖空间中起始波束的位置。

2.2 波束域 MUSIC 算法

基于波束域阵列信号, 可得到波束域高分辨估计方法。波束域阵列信号的协方差矩阵如式(11)所示。对方差矩阵 R_B 进行特征分解, 即

$$\begin{aligned} R_B &= E[Y(t)Y(t)^H] = T^H E[X(t)X(t)^H] T = T^H R T \\ &= T^H A(a) R_s A^H(a) T + \sigma_n^2 I \\ &= E A E^H \end{aligned} \quad (11)$$

式中, R 和 R_s 分别为阵元域协方差矩阵和阵元域信号协方差矩阵, σ_n^2 为阵元域噪声协方差, 注意到 $T^H A(a)$ 是波束域阵列流形, 它与阵元域阵列流形 $A(a)$ 相对应, 波束域协方差矩阵与阵元域协方差矩阵具有完全相似的结构, 因此基于正交化原理的高分辨子空间类方法同样适用于波束域信号^[2]。

设 R_B 的特征值 λ_i 按非升序排列 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_B$, 与其对应的特征向量用 $e_1, e_2, \dots, e_d, e_{d+1}, \dots, e_B$ 表示, 其中, d 为目标源数目, B 为波束数目, 则特征分解结构可表示为

$$R_B = \sum_{i=1}^B \lambda_i e_i e_i^H = E_s \Lambda_s E_s^H + E_n \Lambda_n E_n^H \quad (12)$$

式中, $\Lambda_s = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_d)$, $\Lambda_n = \text{diag}(\lambda_{d+1}, \lambda_{d+2}, \dots, \lambda_B)$, $E_s = [e_1, e_2, \dots, e_d]$, $E_n = [e_{d+1}, e_{d+2}, \dots, e_B]$, E_s 和 E_n 分别对应为波束域的信号子空间和噪声子空间。根据特征分解理论可知, E_s 和 E_n 正交, 即

$$e_i^H e_j = 0 \quad i=1, 2, \dots, d \quad j=d+1, d+2, \dots, B \quad (13)$$

从而得到波束域 MUSIC 算法(B-MUSIC)空间谱^[7]为

$$P_{\text{BMUSIC}}(\theta) = \frac{1}{d^H(\theta) E_n E_n^H d(\theta)} \quad (14)$$

式中, $d(\theta) = T^H a(\theta)$ 为波束域方向向量。

3 仿真结果

仿真模型 1 设声纳接收阵采用 12 阵元的均匀线列阵, 阵元间距为半长, 波束宽度约为 8.0° 。存在 3 个沿直线等间隔分布的亮点, 敌舷角为 120° , 亮点的方位为 $0^\circ, 3.0^\circ, 8.8^\circ$ 。观测噪声为零均值高斯白噪声。利用波束域 MUSIC 方法进行方位估计, 快拍数为 100, 统计时每种情况均独立进行 200 次。对于波束域方法, 波束数目取 $B=5$, 相邻波束重叠 50%。图 2 为不同信噪比条件下波束域 MUSIC 方法分辨概率及估计的均方误差(取对数)的变化曲线图。

由图 2 可以很清楚地看出, 在给定敌舷角的情况下, 随着信噪比的增加, 分辨概率增加, 直至 100%。同时估计的均方误差在逐渐减小。在低信噪比的条件下, 分辨概率曲线有所起伏, 是由此时噪声的不稳定性引起的。而且曲线并不是严格增大或减小, 这是由于统计次数不够高, 出现不稳定引起的。故此得出, 随着信噪比增大, 分辨概率增大而均方误差减小的结论是符合实际情况的。从图 2 还可看到, 在敌舷角

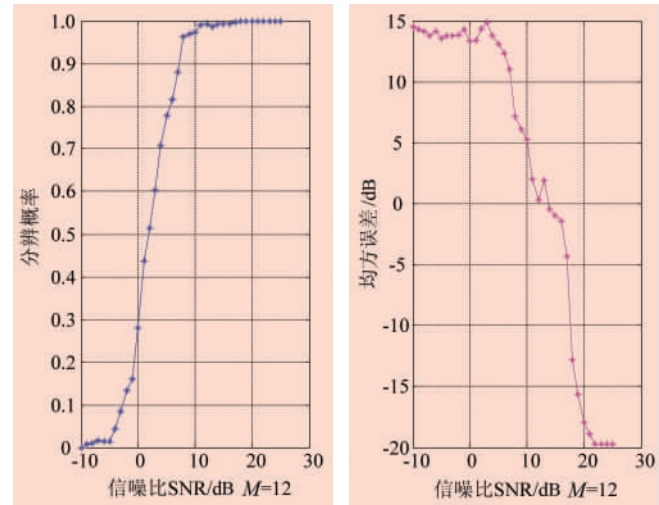


图 2 不同信噪比下仿真结果

Fig. 2 Simulation results at different SNRs

120° 时, 即亮点方位是 $0^\circ, 3.0^\circ, 8.8^\circ$, 信噪比门限约为 11 dB (以百分之百分辨为准)。

仿真模型 2 设接收阵列有 12 阵元的均匀线列阵。阵元间距为 $1/2$ 波长, 阵列 -3 dB 波束宽度为 8° , 信噪比为 15 dB, 观测噪声为零均值高斯白噪声。快拍数为 100, 统计次数为 200 次, 取 5 个等间隔均匀分布的波束, 相邻波束重叠 50%。数据模拟得到在不同敌舷角情况下方位估计的结果, 分辨概率和均方误差的变化曲线如图 3 所示。

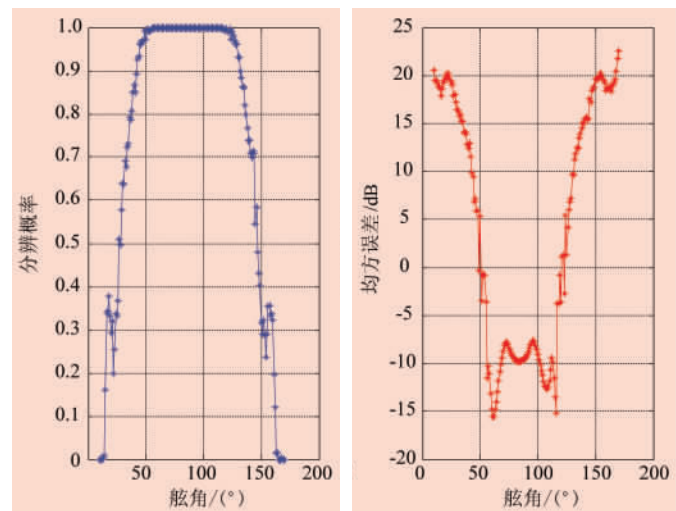


图 3 不同敌舷角下的仿真结果

Fig. 3 Simulation results at different broad angles

图 3 表明, 当敌舷角从 $10^\circ \sim 170^\circ$ 变化的过程中, 在信噪比给定为 15 dB 不变的条件下, 分辨概率先由 0 增加到 100%, 再由 100% 降为 0; 相应的声纳先从目标轴线附近(前方)转移到“正横”方向, 然后又回到目标轴线附近(后方); 这一过程体现了声纳分辨能力的变化。在 $50^\circ \sim 120^\circ$ 之间, 分辨

概率为 100%，表明声纳在这一范围内总能很好地估计出 3 个亮点的方位，且均方误差也处在较小的范围，分辨率较高；而在另外两个区域范围内（即 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ， $120^{\circ}\sim 170^{\circ}$ ），声纳越靠近轴线方向，分辨概率就越小，而且均方误差也大，分辨率很低。当敌舷角从 60° 变化到 120° 时，亮点方位角的差值是先变小再变大（此时最大在 86° ），然后又变小再变大，即经计算可知，敌舷角为 86° 时亮点方位差也是一个最大值，但比 60° 和 120° 要小。理论上均方误差应该是敌舷角为 60° 和 120° 时是最小的，在 86° 方向上时也是一个最小值，但应该比 60° 和 120° 时的小；图 3 确实反映了这一规律。

4 结论

本文建立了目标尺度数学模型，通过设计波束转换矩阵把这种亮点信号模型转到波束域，然后应用 MUSIC 算法估计目标亮点的方位，并得出了这种算法的计算机仿真结果。结果显示，这种方法具有良好的估计性能。在工程实际应用中，对目标的尺度估计具有良好的应用前景。

本文研究工作是依赖于目标亮点不相关的假设来进行的，然而在实际情况中，目标亮点回波具有一定的相关性。下一步将在目标多个亮点回波存在相关性的条件下，研究应用具有解相关能力的波束域高分辨算法，进行目标多亮点的高分辨方位估计，这将更具有工程实际意义。

参考文献 (References)

- [1] 罗俊峰. 多目标波束域高分辨方位估计研究 [D]. 西安: 西北工业大学航海学院, 2004.
Luo Junfeng. Study on beamspace high-resolution direction-finding methods [D]. Xi'an: College of Marine, Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [2] 杨益新. 声纳波束形成与波束域高分辨方位估计技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学航海学院, 2002.
Yang Yixin. Studies on beamforming and beamspace high resolution bearing estimation techniques in sonar systems [D]. Xi'an: College of Marine, Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [3] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 等. 空间谱估计理论与算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Wang Yongliang, Chen Hui, Peng Yingning, et al. Spatial spectrum estimation techniques and theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [4] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
Zhang Xianda. Modern signal processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [5] Johnson D H, Dudgeon D E. Array signal processing—concepts and techniques [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993.
- [6] Zoltowski M D, Kautz G M, Silverstein S D. Beamspace root-MUSIC [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(1): 344–364.
- [7] Stoica P, Nehorai A. Comparative performance study of the element-space and beam-space MUSIC estimators [J]. *Circuits Signal Processing*, 1991, 10(3): 285–292.

(责任编辑 赵佳)



第8届全国病毒学学术研讨会

时间: 2009年9月21-24日
地点: 北京

主办单位: 中国微生物学会病毒学专业委员会
协办单位: 病毒基因工程国家重点实验室
传染病预防控制国家重点实验室
病原微生物生物安全国家重点实验室

电子信箱: bdhy2009@163.com
会议网站: <http://csm.im.ac.cn/html/xuehuitongzhi/20090216/200.html>