

单脉冲雷达对不可分辨舰船目标的角估计

邹建武, 高明哲, 祝明波, 李相平
(海军航空工程学院电子信息工程系, 山东烟台 264001)

摘要: 为解决单脉冲体制下两个慢起伏不可分辨舰船目标的方位角估计问题, 提出一种基于角度有界约束和可调节滑动窗口的角估计算法。针对雷达散射截面(RCS)起伏服从对数正态分布的两个舰船目标, 给出了其单脉冲响应, 分析了单脉冲比的实部特性, 结合此特性和噪声影响分析了单脉冲角估计均值算法估计性能不稳定和出现误差的不足。以半功率波束宽度为有界约束筛选回波信息, 改进了单脉冲角估计均值算法中的滑动窗口模型; 基于筛选的回波信息, 利用含有改进滑动窗口模型的单脉冲角估计均值算法来估计两舰船目标的方位角。仿真结果表明该算法估计性能稳定, 且在相同仿真条件下估计精度整体上优于已有算法, 验证了算法的有效性。

关键词: 单脉冲雷达; 不可分辨舰船目标; 角估计; 单脉冲比; 有界约束

中图分类号: TN959 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)02-0021-05

Angle Estimation for Unresolved Ship Targets with Monopulse Radar

ZOU Jian-wu, GAO Ming-zhe, ZHU Ming-bo, LI Xiang-ping

(Department Electronic and Information Engineering, Naval College of Aeronautics & Astronautics, Yantai 264001, China)

Abstract: To make azimuth estimation to two slow-fluctuation unresolved ship targets with monopulse radar, an angle estimation algorithm based on angle bound constraint and adjustable sliding window was proposed. In the case that the ships' Radar Cross Section (RCS) fluctuation obeys lognormal distribution, the monopulse responses of the two ship targets was discussed, combined with the characteristics of the real part of monopulse ratio and effect of noise. The deficiencies of unstable estimation performance and existing error of the monopulse angle estimation mean algorithm were analyzed. The target echo was selected by bound constraint of half-power beamwidth, the sliding window of the monopulse angle estimation mean algorithm was improved. Based on the selected target echo, the monopulse angle estimation mean algorithm containing the improved sliding window was used to estimate the target azimuth. Simulation results show that the proposed algorithm has stable estimation performance, and has better estimation performance than the previous estimation algorithm under the same simulation conditions, which verify the validity of the algorithm.

Key words: monopulse radar; unresolved ship target; angle estimation; monopulse ratio; bound constraint

0 引言

单脉冲雷达由于测角精度高而被广泛应用于对目标的跟踪中, 但当多个目标落在同一距离-方位分辨单元内时, 常规单脉冲技术因方位角分辨率较低而无法对这些目标进行有效区分, 这已成为目前制约常规

单脉冲雷达精密跟踪应用的一大技术障碍。

长期以来, 国内外一些学者对单脉冲雷达的多目标检测和分辨技术进行了研究, 许多成果已公开发表^[1-7]。文献[1-2]建立了基于 Neyman-Pearson 准则的广义似然比检测准则, 在检测基础上提出了对两点源进行角度估计的矩估计法, 并给出了估计的 Cramer-Rao 界, 此方法需要提前知道两点源的信噪比, 在实际条件下不容易满足; 文献[3]针对 Swerling I 型和 Swerling III 型目标提出了目标方位角的最大似然估计方法, 但此方法无法得出显式解, 只能利用数值方法求得近似解, 且求得的最大似然解对初始值的选取敏感; 文献[4]对

收稿日期: 2015-03-13

修回日期: 2015-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(61471379); “泰山学者”建设工程专项经费资助课题

作者简介: 邹建武(1986—), 男, 山东临沂人, 博士生, 研究方向为雷达目标分辨技术。

最大似然估计方法进行了改进,得到了方位角估计值的显式解;文献[5]考虑到匹配滤波器相邻采样点上存在能量泄露的情况,提出了最大似然估计与最小描述长度(Minimum Description Length, MDL)准则结合的方法,可对多达5个目标的参数进行估计,并将其推广到扩展目标^[6]。然而,上述各种方法都是针对 RCS 起伏为 Swerling 模型的目标,对于 RCS 起伏不满足 Swerling 模型的目标而言,由于接收机输出信号具有复杂的概率分布,从而导致相关的检测及估计理论难于建立。

一些研究表明^[8-9],大型舰船的 RCS 起伏更接近于对数正态分布。文献[7]提出了一种单脉冲角估计均值算法对两个 Swerling I 型目标进行估计,理论上可以推广到目标 RCS 起伏服从对数正态分布的情况,但此算法的估计性能不稳定,且估计结果存在误差;本文在分析两目标单脉冲比实部特性的基础上,提出了一种基于角度有界约束和可调节滑动窗口的角估计算法对两个慢起伏不可分辨舰船目标进行方位角估计,并将该算法与文献[7]的方法进行性能对比分析。

1 两个不可分辨舰船目标的单脉冲响应与特性分析

1.1 两舰船目标单脉冲响应

在常规单脉冲雷达系统中,当两个相互独立的舰船目标位于同一距离-方位分辨单元内时,接收机和差通道的同相及正交信号输出可建模为^[11]

$$S_1 = \alpha_1 \cos \varphi_1 + \alpha_2 \cos \varphi_2 + n_{s_1} \quad (1)$$

$$S_Q = \alpha_1 \sin \varphi_1 + \alpha_2 \sin \varphi_2 + n_{s_Q} \quad (2)$$

$$D_1 = \alpha_1 \eta_1 \cos \varphi_1 + \alpha_2 \eta_2 \cos \varphi_2 + n_{D_1} \quad (3)$$

$$D_Q = \alpha_1 \eta_1 \sin \varphi_1 + \alpha_2 \eta_2 \sin \varphi_2 + n_{D_Q} \quad (4)$$

式中: α_1, α_2 代表第 1, 2 个目标的输出信号幅度; $\sigma_i = 0.5\alpha_i^2$, σ_i 为目标的 RCS,且服从对数正态分布^[8],其大小正比于目标的 RCS; φ_1, φ_2 代表第 1, 2 个目标的回波相位,服从 $[0, 2\pi)$ 的均匀分布; η_1, η_2 代表第 1, 2 个目标的 DOA^[3]; $n_{s_1}, n_{s_Q}, n_{D_1}, n_{D_Q}$ 代表各支路噪声,彼此相互独立,均服从正态分布。

令 $S = S_1 + jS_Q, D = D_1 + jD_Q$, 定义 D/S 为单脉冲比,则单脉冲比的实部和虚部分别表示为

$$y_1 = \operatorname{Re}\left(\frac{D}{S}\right) = \frac{D_1 S_1 + D_Q S_Q}{S_1^2 + S_Q^2} \quad (5)$$

$$y_Q = \operatorname{Im}\left(\frac{D}{S}\right) = \frac{D_1 S_1 - D_Q S_Q}{S_1^2 + S_Q^2} \quad (6)$$

单脉冲比的实部通常用于目标方位角的估计,方位角的估计近似值为

$$\theta \approx \frac{\theta_{BW}}{k_m} y_1 \quad (7)$$

式中: θ_{BW} 为天线方向图的 3 dB 波束宽度; k_m 为单脉

冲角误差斜率,通常取 $1 \leq k_m \leq 2$ 。

对于单次观测而言,在忽略噪声的情况下,两目标的单脉冲比的实部和虚部可表示为^[10]

$$y_1 = \frac{\eta_1 + r(\eta_1 + \eta_2) \cos \varphi + r^2 \eta_2}{1 + 2r \cos \varphi + r^2} \quad (8)$$

$$y_Q = \frac{r(\eta_2 - \eta_1) \sin \varphi}{1 + 2r \cos \varphi + r^2} \quad (9)$$

式中: r 为两目标输出信号幅度的比值 α_2/α_1 ; φ 为两目标的回波相位差 $\varphi_2 - \varphi_1$ 。

由式(8)可以看出,通过常规信号处理之后所获得的方位角测量值并不是两个目标的真实角度。

1.2 两舰船目标单脉冲比实部的特性分析

式(8)给出了两目标单脉冲比实部 y_1 的表达式,假设式(8)中的 η_1, η_2 和 φ 是一个固定值时,单脉冲比的虚部是自变量为 r 的函数,记为 y_1 ,当 $r \ll 1$ 且 $r > 0$,即目标 1 的幅度较大时,

$$y_1 \approx \eta_1 \quad (10)$$

当 $r \gg 1$,即目标 2 的幅度较大时,

$$y_1 \approx \eta_2 \quad (11)$$

当 $r = 1$ 时,

$$y_1 = (\eta_1 + \eta_2)/2 \quad (12)$$

因此,当两目标输出信号幅度差异较大时, y_1 值越来越接近回波幅度较大的目标的 DOA,如图 1 所示。

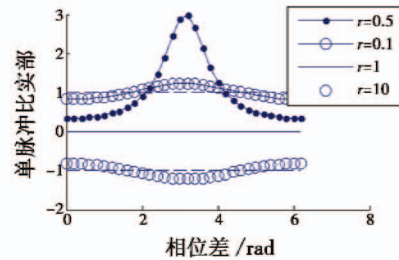


图1 单脉冲比实部与相位差、幅度比的关系曲线

Fig. 1 Relationship of real parts of the monopulse ratio with phase difference and amplitude ratio

当 r 的取值在 1 的去心 δ 邻域内时, y_1 的取值随着 φ 取值浮动较大,如图 2 所示。

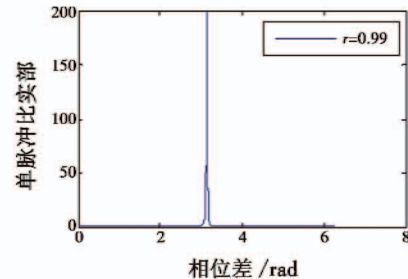


图2 单脉冲比实部与相位差的关系曲线

Fig. 2 Relationship of real parts of the monopulse ratio with phase difference

如图1和图2所示,当 $\varphi = \pi$ 时, y_1 的值最大,由于 φ 的取值服从 $[0, 2\pi)$ 的均匀分布,当 r 的取值在1的去心 δ 邻域内时, y_1 值偏大时的概率很小,值偏小时的概率很大。

2 两个慢起伏不可分辨舰船目标的方位角估计算法

2.1 单脉冲角估计均值算法

对于两个 RCS 服从对数正态分布的慢起伏舰船目标,在回波幅度相关期间,输出信号幅度是稳定的,相位相互独立并在 $[0, 2\pi)$ 上均匀分布。在此期间内,由单个雷达回波得到的目标 DOA 估计的均值和方位角估计均值为

$$\hat{\eta}_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \text{Re} \left(\frac{D_i}{S_i} \right) \right\} \quad (13)$$

$$\theta_{\text{mean}} \approx \frac{\theta_{\text{BW}}}{k_m} \hat{\eta}_{\text{mean}} \quad (14)$$

式中: S_i, D_i 分别代表第 i 次独立观测时接收机和、差通道的输出; N 为脉冲积累次数。在单脉冲雷达跟踪阶段,回波幅度比 r 随机地大于1或小于1,因而单脉冲雷达方位角估计均值 θ_{mean} 会离散地分布在两目标的真实方位角附近。由于难以获得估计性能的解析式,利用 Monte Carlo 仿真数值来描述估计器的性能,针对两舰船目标的角估计均值进行 30 000 次的蒙特卡罗仿真,两目标的信噪比均为 15 dB, $\theta_{\text{BW}} = 6^\circ$, 目标真实方位角 $\theta_1 = -0.5^\circ, \theta_2 = 0.5^\circ$, 脉冲积累次数为 20, 结果如图 3 所示。

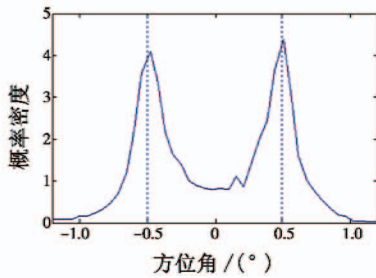


图3 单脉冲角估计均值的统计分布

Fig.3 Statistical distribution of angle estimation mean of monopulse radar

从图3中可看出,两目标的角估计均值主要分布在两目标真实方位角附近。单脉冲角估计均值算法步骤如下^[7]。

1) 在回波幅度相关期间生成多个雷达目标回波信号,利用式(13)和式(14)求得两目标的角估计均值。如此进行多次估计,得到一组角度估计样本集合 $S = \{\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_M\}$ 。

2) 求集合 S 的均值 θ'_{mean} ,并以 θ'_{mean} 为界将集合 S

划分为两个子集合, $A = \{\hat{\theta}_i \leq \theta'_{\text{mean}}\}, B = \{\hat{\theta}_i \geq \theta'_{\text{mean}}\}$, 求出两个子集 A, B 的均值 θ'_A, θ'_B 。

3) 针对 A, B 的元素,分别以 $|\hat{\theta}_i - \theta'_A| < k |\theta'_{\text{mean}} - \theta'_A|$ 和 $|\hat{\theta}_i - \theta'_B| < k |\theta'_{\text{mean}} - \theta'_B|, k \in (0, 1)$,为滑动窗口,逐步缩小 k 的值筛选 A, B 中的元素,将满足条件的元素组成集合 A' 和 B' ,求得 A' 和 B' 的均值 $\hat{\theta}'_{kA}$ 和 $\hat{\theta}'_{kB}$ 作为两目标的 DOA 估计值。

4) 随着雷达数据的更新,更新样本集合 S ,重复步骤2)和步骤3)。

2.2 基于角度有界约束和可调节滑动窗口的角估计算法

结合1.2节中单脉冲比实部的特性分析,由图2可知,当 r 的取值在1的去心 δ 邻域内时, y_1 的取值随着 φ 服从均匀分布浮动较大,在小概率的情况下,利用式(13)和式(14)得到 θ_{mean} 的数值较大,记为 θ_{max} (本文仿真中,有时可达到 30° 左右),此时利用上述算法进行分辨时,分辨结果将指向 θ_{max} 和 $\bar{\theta}_{\text{mean}}$ 附近($\bar{\theta}_{\text{mean}} = \text{mean}\{S - \bar{\theta}_{\text{max}}\}$),这将导致上述算法估计性能不稳定,使得其均方根误差曲线出现小概率的波动,此为单脉冲角估计均值算法的第一个不足,大部分情况下 θ_{mean} 分布在 $(\theta_1 + \theta_2)/2$ 位置附近。

由于很难通过严格的理论推导来进一步分析单脉冲角估计均值的统计特性,本文通过蒙特卡罗仿真和简单的理论解释来分析其统计特性。经蒙特卡罗仿真,在没有噪声的情况下,发现 θ_{mean} 在 $[\theta_1, \theta_2]$ (θ_1 和 θ_2 是两目标的真实方位角)区间内的分布概率 p_{12} 超过50%,出现这种现象的原因,主要是由于当 r 的取值在1的 δ 邻域内时, θ_{mean} 基本上分布在 $(\theta_1 + \theta_2)/2$ 位置附近造成的;在有噪声的情况下, p_{12} 受噪声和两目标夹角 $|\theta_2 - \theta_1|$ 的影响,在信噪比低至0 dB时, θ_{mean} 的分布概率 p_{12} 超过50%的两目标最小夹角 $|\theta_2 - \theta_1|$ 约为 $\theta_{\text{BW}}/6$,例如,图3中的 $p_{12} = 57\%$ 。这种特性将导致利用已有算法进行目标估计时,大多数情况下会出现误差,即 $\theta_1 < \hat{\theta}'_{kA}, \hat{\theta}'_{kB} < \theta_2$ 。此为单脉冲角估计均值算法的第二个不足,而当两目标夹角小于 $\theta_{\text{BW}}/6$ 时,在低信噪比的情况下, θ_{mean} 位于两目标夹角内的概率 p_{12} 小于50%。

针对上述两个不足,对于 RCS 服从对数正态分布的两个慢起伏舰船目标,提出了一种基于角度有界约束和可调节滑动窗口的角估计算法,步骤如下。

1) 在回波幅度相关期间生成多个雷达目标回波信号,利用式(13)和式(14)求得两目标的角估计均值。如此进行多次估计,得到一组角度估计样本集合 $S = \{\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_M\}$ 。

2) 设置有界约束 θ_{BW} ,若 $|\hat{\theta}_i| > \theta_{\text{BW}}$,则去掉 $\hat{\theta}_i$,得

到筛选后的集合 $S' = \{\theta'_1, \theta'_2, \dots, \theta'_L\}$ 。

3) 求集合 S' 的均值 θ'_{mean} , 并以 θ'_{mean} 为界将集合 S' 划分为两个子集合, $A = \{\theta'_i \leq \theta'_{mean}\}$, $B = \{\theta'_i \geq \theta'_{mean}\}$, 求出两个子集 A, B 的均值 θ'_A, θ'_B 。

4) 针对 A 的元素, 以 $\theta'_i - \theta'_A < gk|\theta'_{mean} - \theta'_A|$ 和 $\theta'_i - \theta'_A > -k|\theta'_{mean} - \theta'_A|$, $k \in (0, 1), g < 1$ 为一个正常数, 为可调节滑动窗口, 针对 B 的元素, 以 $\theta'_i - \theta'_B > -gk \cdot |\theta'_{mean} - \theta'_B|$ 和 $\theta'_i - \theta'_B < k|\theta'_{mean} - \theta'_B|$ 为可调节滑动窗口; 逐步缩小 k 的值筛选 A, B 中的元素, 将满足条件的元素组成集合 A' 和 B' , 求得 A' 和 B' 的均值 $\hat{\theta}'_{ka}$ 和 $\hat{\theta}'_{kb}$ 作为两目标的 DOA 估计值。

5) 当 $|\hat{\theta}'_{kb} - \hat{\theta}'_{ka}| < \theta_{BW}/6$ 时, 令 $g=1$, 重复步骤 4)。

6) 随着雷达数据的更新, 更新样本集合 S , 重复步骤 2) ~ 步骤 5)。

上述算法中, 步骤 2) 用于消除已有算法估计性能的不稳定性, 步骤 4) 通过改进的可调节滑动窗口模型来减小已有算法的误差。有关门限 g 取值方面, 若 g 取值接近 1, 算法性能与加有界约束的已有算法性能改善不大, $g < 0.5$ 时, 角估计的 RMSE 变大, 估计结果将变得不理想。综合上述分析, 根据经验, 本文中的 $g=0.6$ 。当两目标的估计夹角小于 $\theta_{BW}/6$, 利用基于角度有界约束的单脉冲角估计均值算法, 对其进行估计。

3 仿真实验

对所提出的算法进行仿真实验, 对两个 RCS 服从对数正态分布的舰船目标进行角估计, 并与单脉冲角估计均值算法进行性能对比。

3.1 特定信噪比下的方位角估计

两舰船目标的方位角分别为 -1° 和 1° , 信噪比均为 10 dB, 单脉冲雷达子波束天线方向图为指数型, 半功率波数宽度为 6° , $k_m = 2$, 脉冲积累个数 $N = 20$, 雷达数据更新次数 $N_{test} = 30$, k 依次取 0.9, 0.8, ..., 0.1, $g = 0.6$ 。利用单脉冲角估计均值算法 (算法 1) 和本文算法 (算法 2) 得到两个目标方位角估计值, 如图 4 和图 5 所示。

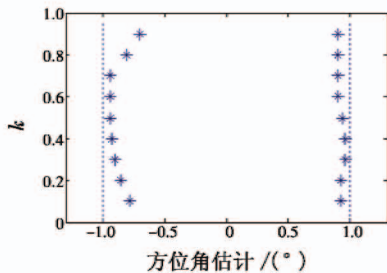


图 4 算法 1 仿真结果

Fig. 4 Simulation result of algorithm 1

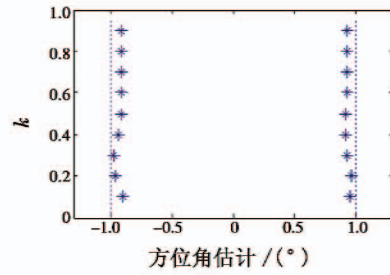


图 5 算法 2 的仿真结果

Fig. 5 Simulation result of algorithm 2

图中, 符号 * 的方位角为算法估计的目标方位角, 仿真结果表明, 两种算法都能够估计出两个目标的目标方位角, 且存在 RMSE, RMSE 亦与信噪比有关。

3.2 均方根误差与信噪比的关系

本节中除信噪比外, 其他仿真条件与 3.1 节一致; 利用两种算法进行蒙特卡罗仿真 500 次, 两种算法的 RMSE 与信噪比的关系如图 6 所示。

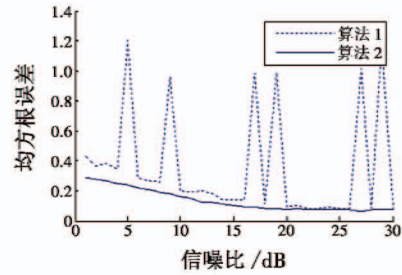


图 6 均方根误差与信噪比的关系曲线

Fig. 6 RMSE vs SNR

仿真结果显示, 信噪比越高, 两种算法对方位角估计的 RMSE 越小; 已有算法 (算法 1) 出现了估计性能不稳定的现象, 此不稳定现象虽然是小概率事件, 考虑到仿真次数较多和噪声的影响, RMSE 曲线不稳定的可能性较大; 本文所提算法则消除了这种不稳定性; 同时本文所提算法的 RMSE 比原算法的 RMSE 小, 在信噪比为 1 dB 时, RMSE 降低 0.14, 本文所提算法更适用于低信噪比情况下的目标分辨; 且整体上具有更高的估计精度。

3.3 均方根误差与两目标夹角的关系

本节中除方位角, 其他仿真条件与 3.1 节一致; 目标 1 的方位角为 $-\theta/2$, 目标 2 的方位角为 $\theta/2$ 。两种算法的 RMSE 与两目标夹角的关系如图 7 所示。

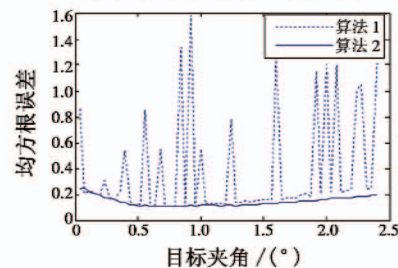


图 7 均方根误差与两目标夹角的关系曲线

Fig. 7 RMSE vs opening angle of two targets

仿真结果表明,信噪比为 10 dB 条件下,随着两目标夹角减小到 0.5° 时,两种算法对方位角的 RMSE 也不断减小,当随着两目标夹角小于 0.5° 时,两种算法对方位角的 RMSE 反而增大,表示两种算法的分辨能力变差;当两目标之间夹角小于 1° (约为 $\theta_{BW}/6$) 时,两种算法的分辨能力近似,但本文所提算法具有稳定性;而当两目标之间夹角大于 1° 时,本文所提算法性能优于单脉冲角估计均值算法;在两舰船目标的方位角为 $\pm 0.25^\circ$ 、信噪比为 10 dB 的条件下,其 RMSE 为 0.1° ,估计精度尚可;信噪比为 20 dB 条件下,其 RMSE 为 0.03° ,估计精度较高;同时已有算法出现了估计性能不稳定的现象。

3.4 均方根误差与脉冲积累数、雷达数据更新次数的关系

仿真条件除脉冲积累次数和雷达数据更新次数,其他仿真条件与 3.1 节一致,两种算法的 RMSE 与脉冲积累次数和雷达数据更新次数的关系如图 8 所示。

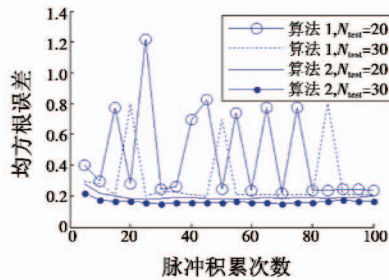


图 8 均方根误差与脉冲积累数、雷达数据更新次数的关系曲线

Fig. 8 RMSE vs number of pulse accumulation and renewal number of radar data

由图 8 可知,仿真过程中,脉冲积累次数和雷达数据更新次数越多时,目标方位角估计的 RMSE 越小;针对已有算法(算法 1)和本文所提算法(算法 2),当脉冲积累次数大于 15 时,目标的方位角 RMSE 曲线相对平缓,实际应用中,两者的取值受到目标回波幅度和目标实际方位角的限制;已有算法出现了估计性能不稳定的现象。

4 结束语

本文深入研究了两个慢起伏不可分辨舰船目标的方位角估计问题,分析了单脉冲比的实部特性,结合此特性和噪声影响分析了单脉冲角估计均值算法估计性能不稳定和出现误差的不足,针对不足,提出一种基于角度有界约束和可调节滑动窗口的角估计算法。仿真结果表明,所提算法的估计性能稳定;在两舰船目标的方位角为 $\pm 0.25^\circ$ 、脉冲积累数为 20、雷达数据更新次数为 30、在信噪比为 10 dB 的条件下,其 RMSE 为 0.1° ,在

信噪比为 20 dB 的条件下,其 RMSE 为 0.03° ,且在相同仿真条件下估计精度整体上优于已有算法,本文所提算法可有效估计出两不可分辨舰船目标;目标方位角估计性能跟信噪比、两目标夹角、脉冲积累数和雷达数据更新次数有关。此外,窗口系数 g 是凭经验取值,其取值还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] BLAIR W D, BRANDT P M. Unresolved Rayleigh detection using monopulse measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 543-552.
- [2] BLAIR W D, BRANDT P M. Monopulse DOA estimation of two unresolved Rayleigh targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2): 452-469.
- [3] SINHA A, KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y. Maximum likelihood angle extractor for two closely spaced targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1): 183-201.
- [4] WANG Z. Angle estimation for two unresolved targets with monopulse radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(3): 998-1018.
- [5] ZHANG X, WILLETT P, BAR-SHALOM Y. Monopulse radar detection and localization of multiple unresolved targets via joint bin processing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(4): 1125-1236.
- [6] ZHANG X, WILLETT P, BAR-SHALOM Y. Detection and localization of multiple unresolved extended targets via monopulse radar signal processing [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 455-472.
- [7] 赵宜楠,姚剑,李凤从. 慢起伏不可分辨目标的单脉冲角估计 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(10): 2021-2024. (ZHAO Y N, YAO J, LI F C. Angle estimation for slow fluctuation unresolved targets with monopulse radar [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(10): 2021-2024.)
- [8] 宋广,张德保,李鸣. 水面舰船 RCS 统计模型分析 [J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(2): 73-74. (SONG G, ZHANG D B, LI M. Analysis of statistical model for RCS of surface ship [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2011, 34(2): 73-74.)
- [9] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. (HUANG P K, YIN H C, XU X J. Radar target characteristics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [10] SHERMAN S M, BARTON D K. Monopulse principles and techniques [M]. Boston: Artech House, 2011.