

海战场雷达末制导系统抗干扰技术研究

姚 旺, 丛彦超, 孔志杰, 赵晓宁, 周国峰

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 为提升反舰导弹雷达末制导系统在复杂海战场环境下的精确制导能力, 对国外先进雷达系统的抗干扰技术发展现状进行了分析; 对海杂波的干扰特性进行了研究, 提出了对抗海杂波干扰的一种自适应匹配滤波算法; 分析了有源压制干扰的作用机理, 提出了捷变频技术与跟踪噪声技术两种对抗方法; 研究了箔条冲淡干扰与质心干扰样式, 分别提出了高多普勒分辨率对抗方法与双角度波门对抗方法; 对舰载欺骗干扰方式进行了分析, 提出重频与载频同时捷变频、双波门跟踪对抗方式; 研究了舷外有源干扰的使用方法, 提出了一种空域抗干扰方法; 理论分析表明, 以上方法可使反舰导弹有效的对抗海战场环境下面临的海杂波、有源压制干扰、箔条干扰、舰载欺骗干扰与舷外有源干扰。

关键词: 反舰导弹; 海战场; 雷达; 末制导; 抗干扰

Research on Anti-jamming Technology of Radar Terminal Guidance System in Naval Battlefield

YAO Wang, CONG Yanchao, KONG Zhijie, ZHAO Xiaoning, ZHOU Guofeng

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to improve the precision guidance capability of the anti-ship missile radar terminal guidance system in the complex naval battlefield environment, the development status of anti-jamming technology of foreign advanced radar systems is analyzed; an adaptive matched filter algorithm is proposed by studying the characteristics of sea clutter; the mechanism of active suppression interference is analyzed, frequency agility technology and tracking noise technology were proposed; chaff dilution interference and centroid interference styles are studied to propose high Doppler resolution countermeasure method and dual-angle wave gate countermeasure method; by analyzing the shipboard deception jamming, the repetition frequency and carrier frequency, double wave gate tracking countermeasure method are proposed; a method of airspace anti-jamming was proposed by studying outboard active jamming; theoretical analysis shows that the above method can effectively combat sea clutter, active suppression jamming, chaff jamming, ship-borne deception jamming and outboard jamming.

Keywords: anti-ship missile; naval battlefield; radar; terminal guidance system; anti-jamming

0 引言

反舰导弹是现代海战场的主要作战武器, 雷达末制导系统是反舰导弹实现精确打击的关键与核心, 雷达末制导系统虽然具有作用距离远、全天候使用的优点, 但是会受到海面、气象、陆地等自然条件产生的干扰, 还将受到目标舰船施放的有源、无源等各项电子干扰。现代舰船编队具有强大的电子对抗能力, 例如美国、欧洲的舰船电子对抗系统就包括 MK36 (SRBOC) 舰载箔条/红外干扰弹发射系统、AN/SLQ-32 电子战系统、AN/SLQ-29 组合式电子战系统、NULKA 舷外有源诱饵等, 能够发射箔条干扰弹、红外干扰弹和箔条/红外复合干扰弹, 可以针对各类雷达释放有源压制干扰和欺骗干扰、释放舷外有源诱饵、进行多种假目标组合干扰。这些多源、复杂电磁干扰环境可导致反舰导弹雷达末制导系统辨不明、找不准, 严重影响雷达末制导系统的精确制导能力。随着电子对抗技术的不断

断进步、作战样式的不断丰富, 海战场电磁环境越来越恶劣, 雷达末制导系统对于海战场环境的适应能力已成为精确制导领域的一项核心技术, 抗干扰技术是雷达末制导领域后续的重要研究方向^[1-2]。

1 国外抗干扰技术发展现状

美国通过一系列专项研究计划以推动雷达抗干扰技术的发展, 例如“微波/毫米波集成电路计划”、“高灵敏度雷达计划”等。其中 E-3 预警机装备的 S 频段 AN/APY-2 雷达应用脉冲多普勒体制, 可以实现目标的全方位探测, 为进一步提升雷达的抗干扰能力, 该雷达还应用的高脉冲重复频率、低副瓣增益天线等技术; RADAC 极化跟踪雷达应用虚拟极化处理技术, 具备极化抗干扰功能; 法国 TRS-2140 雷达应用全相参体制、数字波束形成、接变频等技术, 大大提升了雷达适应复杂战场环境的能力。

随着大规模集成电路与多源信息融合技术的发展, 将

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-08-09。

作者简介: 姚 旺(1986-), 男, 辽宁新民人, 硕士, 高级工程师, 主要从事飞行器总体设计方向的研究。

引用格式: 姚 旺, 丛彦超, 孔志杰, 等. 海战场雷达末制导系统抗干扰技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 152-155, 169.

多种模式导引头一体化设计, 利用多模复合末制导已经成为抗干扰技术的重要研究方向, 例如: 俄罗斯蚊式掠海反舰导弹采用主被动雷达复合导引头、瑞典 RBS15MK3 远程反舰导弹采用主动雷达红外成像复合导引头, 该类复合导引头同时具备两种以上末制导模式的优点, 可有效规避单一末制导模式的局限, 显著提升了末制导系统的抗干扰能力^[3]。

2 海战场环境典型干扰及应对措施

2.1 海杂波干扰

2.1.1 干扰样式

雷达在探测海面大型目标时, 所接收到的回波信号将同时存在海杂波。通常在高海况情况下, 雷达导引头能探测到目标的最大距离(作用距离)主要受到海杂波强度的影响。另外, 雷达导引头工作频率、极化形式、导引头与目标间的相对位置也对杂波强度有一定影响^[4-7]。

海杂波归一化后向散射系数随着雷达波束擦海角和海情不同而不同, 海情越小, 海杂波归一化后向散射系数越小, 当擦海角小于一定角度时, 海杂波归一化后向散射系数会急速下降, 当入射角大于 70°后, 海杂波归一化后向散射系数会急剧增加(如图 1 所示), 此外随着海情增加海杂波归一化后向散射系数也会增加, 从而影响到回波信杂波。

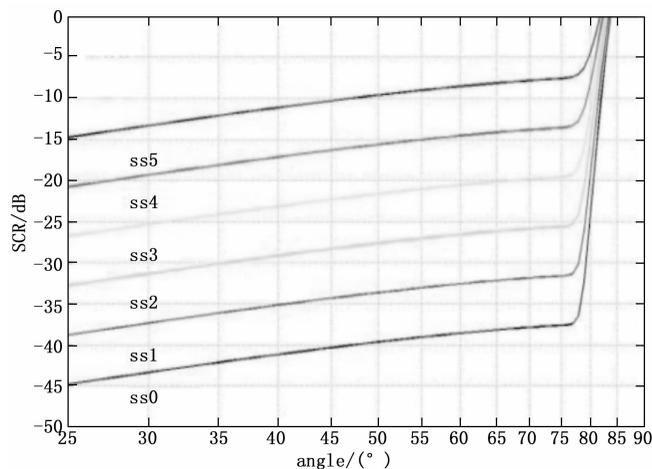


图 1 不同海情下海杂波归一化 RCS 曲线

2.1.2 对抗措施

实测海杂波数据表明, 海杂波多呈现非高斯分布, 因此在强海杂波背景下, 可采用自适应匹配滤波的方法实现目标的检测, 具体算法如下。

首先对于海杂波向量的协方差进行估计:

$$\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n r_n^H$$

式中, r_n 表示检测单元 r 附近的 N 个参考单元接收的回波幅度。

之后开展杂波白化和多普勒导向矢量变化:

$$\bar{r} = \hat{R}^{-1/2} r$$

$$\bar{p}_d = \hat{R}^{-1/2} p_d$$

式中, p_d 为多普勒导向矢量, $p_d = [1, \exp(j2\pi f_d T_r), \dots, \exp(j2(P-1)\pi f_d T_r)]^T$, 多普勒频率 $f_d \in [-1/(2T_r), 1/(2T_r)]$ 。

由此得到检测样本为:

$$\gamma = \frac{|\bar{p}_d^H \hat{R}^{-1} \bar{r}|^2}{\bar{p}_d^H \hat{R}^{-1} \bar{p}_d}$$

由于目标回波与海杂波的相位特征有显著区别, 目标回波相位变化具有线性规律, 而海杂波相位非线性特征, 可以据此特征将目标与海杂波有效的区分开, 在海杂波干扰下实现目标的可靠检测。

2.2 抗有源压制干扰

2.2.1 干扰样式

噪声压制干扰的工作原理是通过释放大功率噪声实现对于目标回波的压制与覆盖, 显著降低雷达接收机的信噪比, 使得雷达系统在强噪声背景下无法有效进行目标检测。典型的有源压制干扰装备有美军的 EA-18G“咆哮者”电子战飞机上装备的 AN/ALQ-99 大功率压制干扰系统。该系统由 5 个外挂吊舱组成, 每个干扰吊舱内装有 2 部超大功率干扰发射机、1 部跟踪接收机及其配套的天线和 1 部用于供电的冲压涡轮发电机。机内其他设备包括数字计算机和显示器以及由 2 名操作员操作的控制设备等。



图 2 AN/ALQ-99 大功率压制干扰系统

根据干扰信号中心频率 f_j 、干扰信号带宽 B_j 与雷达导引头中心频率 f_0 、接收机带宽 B_r 的相对关系, 有源压制干扰可分为瞄准式干扰、阻塞式干扰和扫频式干扰:

瞄准式: $f_j \approx f_0, B_j = (2 \sim 5) B_r$

阻塞式: $f_0 \in [f_j - \frac{B_j}{2}, f_j + \frac{B_j}{2}], B_j > 5B_r$

扫频式: $B_j = (2 \sim 5) B_r, f_0 = f_j(t), t \in [0, T]$

实际战场环境中干扰机可以根据实际需求对以上 3 种干扰进行组合使用^[8-10]。

2.2.2 对抗措施

1) 使用捷变频技术可以有效的对抗有源噪声干扰, 特别是瞄准式窄带干扰。捷变频雷达的发射频率是随机跳变的, 这种随机变化对于侦察干扰机来说是一种负担, 若无法实时的检测出当前信号的频点并实施干扰, 则无法对导

引头进行有效的干扰。

当系统采用捷变频时，变频时间间隔为 5~10 ms，一般来说侦察系统无法在如此短的时间内作出正确的反应，则当其产生干扰信号时，雷达导引头已经工作在下一个频点上，则此干扰机根本无法干扰频率捷变雷达。即使侦察干扰机能测出并引导干扰频率，则此干扰机也只能掩盖比自己远的雷达目标，而无法掩护干扰机的载舰，因为下一个发射脉冲的频率又将改变，干扰机只有在测出新的雷达频率后才能再次释放干扰。

2) 当雷达末制导系统确认受到噪声压制干扰时，则导引头可放弃目标距离跟踪，针对噪声干扰信号进行角度跟踪。试验表明强噪声下，对噪声干扰进行角度跟踪性能较好，导引头提供目标角速度信息，距离信息为预测信息。

2.3 抗箔条干扰

2.3.1 扰样式

箔条干扰是一种典型的舷外无源干扰，通常由铝箔条或涂覆金属的纤维组成，舰船可以通过发射箔条弹以形成大面积的箔条云，以掩盖舰船目标或形成大面积假目标，实现对于雷达末制导系统的干扰。箔条干扰成本低廉、制作简单，在防空、反舰、反导等领域应用广泛。箔条干扰一般采用两种作战方式：冲淡干扰方式和质心干扰方式^[11-13]。



图 3 舰船发射箔条弹

1) 冲淡干扰：当舰船侦查到来袭导弹后，向距离舰船较远的位置发射箔条弹，形成多个假目标，实现对于真实舰船目标的“冲淡效果”，反舰导弹导引头开机后将发现多个假目标，降低雷达跟踪真实舰船目标的概率。

2) 质心干扰：当雷达导引头稳定跟踪舰船目标后，舰船在较近的位置发射箔条弹，使得目标与箔条同时位于雷达导引头的跟踪波门内，此时舰船向箔条运动的反方向运动，由于箔条回波强于真实目标，雷达导引头将跟踪箔条假目标，使得舰船可以摆脱雷达导引头的跟踪状态。

2.3.2 对抗措施

1) 抗冲淡干扰：冲淡式箔条弹爆破后扩散面积不是很大，在一定区域内集中散布，从雷达导引头的角度来说，相当于海面上出现了额外的强目标，可诱骗雷达导引头捕捉箔条，保护舰船的安全，通常来说冲淡箔条的回波强度较强，且箔条云不会弥散在整个天线波束内，箔条的后向

散射截面积与舰船的后向散射截面积相当，在距离维度上，可以看作是一个具有扩散特性的目标存在。

为了在搜索阶段有效的对抗箔条干扰，可采用增加雷达导引头的多普勒分辨率的技术手段，利用箔条多普勒扩散特性对目标进行识别，一般来说在有风的情况下，箔条多普勒扩散呈现高斯形状的分布，多普勒均值接近当前的风速，图 4 给出了实测的箔条与舰船的距离与速度谱，从图中可以看到箔条在两个维度的扩散明显大于舰船，从该特性上可以将冲淡箔条加以区分，而选择舰船目标。通过试验分析，利用该特性区别箔条和舰船的概率可以达到 70% 以上。

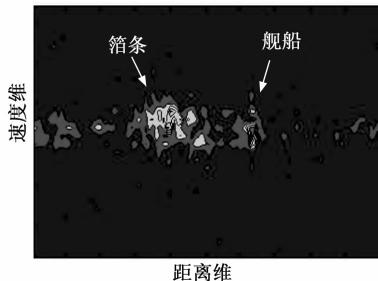


图 4 实测箔条与舰船回波谱

2) 抗质心干扰：为对抗质心干扰，当雷达导引头捕获目标转入跟踪状态后，可以天线轴线为中心建立左右两个角度波门，获取目标左右角偏差，对其融合处理输出天线运动角误差信号。

假设由单脉冲测角得到的角度为 $\theta_i, i=1, 2, \dots, N$, N 为测量值数目，角度波门宽度为 θ_w ，则左右波门的角度测量为：

$$\begin{cases} \Omega_L = \{\theta_i | -\theta_w < \theta_i < 0, i = 1, 2, \dots, N\} \\ \Omega_R = \{\theta_i | 0 < \theta_i < \theta_w, i = 1, 2, \dots, N\} \end{cases}$$

通过融合处理分别输出左右角偏差：

$$\begin{aligned} \theta_L &= f(\theta_i), \theta_i \in \Omega_L \\ \theta_R &= f(\theta_i), \theta_i \in \Omega_R \end{aligned}$$

对偏差进行融合处理：

$$\hat{\theta} = \alpha \cdot \theta_L + \beta \cdot \theta_R$$

其中： α, β 为加权因子，在目标跟踪过程中，无干扰条件下，天线波束基本对准目标，左右角偏差信号 θ_L 和 θ_R 保持相对稳定，在实施质心干扰后，天线波束某一侧的角偏差信号势必明显增大， θ_L 和 θ_R 可表征受干扰前后角度跟踪状态的变化，可利用自适应的 α, β 加权处理，使 $\hat{\theta}$ 更靠近目标真实方位，可有效对抗质心干扰。

2.4 抗舰载欺骗干扰

2.4.1 干扰样式

欺骗干扰是一种舰船自防御技术，包括距离假目标和距离拖引干扰。干扰机通过捕获弹载末制导主动雷达的距离跟踪波门，产生一个最初和目标真实回波脉冲相重叠的虚假脉冲，而且该虚假脉冲功率强于真实回波脉冲，随后，干扰机

逐渐移动该虚假脉冲,把距离波门从真实目标距离上拖引开,然后停止拖引,致使末制导雷达丢失目标,以此来干扰雷达的正常工作。图5为当前美军装备在大部分驱逐舰上的最先进的AN/SLQ-32(V)舰载电子干扰系统^[14-16]。



图5 AN/SLQ-32(V)系统

2.4.2 对抗措施

对抗欺骗干扰主要可以使用以下几种策略:

1) 采用重频与载频同时捷变频技术,使得距离拖引信号只能向远距拖引,干扰系统无法预知雷达导引头将要使用的重频或载频,为了保证干扰的有效性,只能产生距离上大于目标真实距离的假目标回波,因此拖引只能向远处拖引。实际情况中导弹始终是向目标接近的,可以将距离变远的信号判决为干扰信号,直接舍去。

2) 应用双波门跟踪法,其工作原理为:导引头跟踪目标时目标速度的变化范围有限,因此当跟踪波门速度超限时可判定受到欺骗干扰;当系统无干扰时产生一个与跟踪波门移动速度一致的模拟波门,当判定系统受到干扰后立即放弃真实波门而采用模拟波门;当判断干扰消失后则继续使用真实波门,采用此方法可以有效对抗欺骗干扰。

2.5 抗舷外有源干扰

2.5.1 干扰样式

舷外有源干扰主要为舷外应答式干扰,用于导引头的跟踪阶段,根据侦测到的雷达导引头的发射信号,进行波形存储与转发;也可以模拟辐射源工作,对被动雷达导引头形成假目标。图6为“纳尔卡”(Nulka)诱饵弹,是美、澳联合开发的一种有源雷达诱饵系统,能有效地全天候保护海军舰艇对抗反舰导弹。该系统可用作舰艇多层防御系统的一部分,也可作为独立系统部署^[17-20]。

2.5.2 对抗措施

对抗舷外有源欺骗式干扰可采用空域抗干扰方法,假设导引头由 N 个子阵天线组成,天线接收数据中包含干扰、信号和噪声, N 个子阵在 t 时刻接收到的信号数据矢量为:

$$x(t) = S(t)f(\theta, \varphi)\alpha_{R,sub} \alpha_{T,sub}^T(\theta, \varphi) + n(t)$$

式中, $x(t)$ 为天线接收到的 $N \times 1$ 维数据矢量, $S(t)$ 为接收到的干扰和目标回波信号, $f(\theta, \varphi)$ 为天线方向图, $n(t)$ 为 $N \times 1$ 维噪声矢量; $\alpha_{R,sub}$ 和 $\alpha_{T,sub}$ 分别为目标回波信号 $N \times 1$ 维接收矢量和发射矢量。

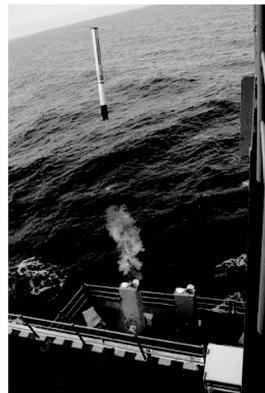


图6 纳尔卡诱饵弹

对上式协方差矩阵进行特征值分解:

$$R = U_s \Lambda_s U_s^H + U_v \Lambda_v U_v^H$$

式中, U_s 表示前 K 个特征值对应的特征矢量构成的干扰或信号子空间矩阵, Λ_s 表示剩余 $N-K$ 个特征值构成的对角阵, U_v 由剩余的 $N-K$ 个特征值对应的特征矢量构成的噪声子空间阵。

构造空间谱函数为:

$$P(\theta, \varphi) = \frac{1}{(\alpha_{R,sub}^H(\theta, \varphi) U_v U_v^H \alpha_{R,sub}(\theta, \varphi)}$$

分别在方位向进行 $0 \sim 360^\circ$ 、俯仰向进行 $0 \sim 90^\circ$ 上进行谱峰搜索,将 $P(\theta, \varphi)$ 的峰值作为干扰或目标的角度估计值,剔除干扰信息,实现抗舷外干扰的效果。

3 结束语

海战场环境中存在的复杂自然干扰与人为电磁干扰对反舰导弹的精确末制导提出了极大的挑战。本文基于国外先进雷达抗干扰技术的发展现状与趋势,针对性的分析了海杂波、有源压制干扰、箔条干扰、舰载欺骗干扰、舷外有源干扰等多种干扰特性,并提出了相应的对抗措施,可以一定程度上提升反舰导弹雷达末制导系统的抗干扰能力,对于反舰导弹末制导系统的设计具有一定的工程指导意义。

参考文献:

- [1] 魏毅寅,杨文华. 海战场典型干扰对抗场景及反舰导弹应对策略研究[J]. 战术导弹技术, 2020(5): 1-8.
- [2] 王国栋. 反舰导弹末制导阶段面临干扰及靶场发展探讨[J]. 科技创新与应用, 2019(28): 26-28.
- [3] 张凯旋,李淑华. 雷达抗干扰技术现状及发展趋势研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(11): 1-4, 17.
- [4] LI X, SHUI P L, XIA X Y, et al. Analysis of UHF-band sea clutter reflectivity at low grazing angles in offshore waters of the yellow sea[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(19): 7472-7485.
- [5] 刘满朝,聂翔,孟兵. 一种舰载雷达海杂波抑制方法[J]. 现代雷达, 2018, 40(5): 32-36.

(下转第169页)