

引用格式: 王琪.空空导弹协同探测技术研究[J].飞控与探测,2025,8(5):88-96.

Citation: WANG Q. Research on collaborative detection technology of air-to-air missile [J]. Flight Control & Detection, 2025, 8(5): 88-96.

空空导弹协同探测技术研究

王 琪^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院·洛阳·471009;
2. 空基信息感知与融合全国重点实验室·洛阳·471009)

摘要: 分析了多弹协同作战模式下影响复合制导空空导弹中末制导交接班截获概率的主要因素,在此基础上给出了多弹协同探测时目标指示误差方差和截获概率的计算方法;研究了空空导弹协同搜索技术,提出多种基于2枚导弹协同搜索的波位构型,通过仿真分析,给出了一种最佳的双弹协同搜索波位构型,在有限增加搜索时间的情况下,可提高多枚导弹协同搜索的截获概率;同时提出协同探测技术还可以在确保多枚导弹系统总虚警概率不变的前提下,降低单枚导弹的虚警概率要求,从而降低检测信噪比需求,提高导引头的探测距离,并进行了理论分析。

关键词: 空空导弹; 协同探测; 截获概率; 搜索策略; 虚警概率

中图分类号: TN765

文献标志码: A

文章编号: 2096-5974(2025)05-0088-09

DOI:10.20249/j.cnki.2096-5974.2025.05.010

Research on Collaborative Detection Technology of Air-to-Air Missile

WANG Qi^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009;
2. National Key Laboratory of Air-based Information Perception and Fusion, Luoyang 471009)

Abstract: The main factors affecting the acquisition probability of midcourse and terminal guidance of compound-guided air-to-air missiles in the scene of multi-missile cooperative operation are analyzed. The target pointing angle errors and acquisition probability of cooperative search technology of air-to-air missiles are studied, and search strategies based on a cooperative search of two missiles are proposed. Through simulation analysis, an optimal searching strategy for the cooperative search of two missiles is formed to improve the acquisition probability of multiple missiles in the shortest possible time. At the same time, the cooperative detection technology can reduce the requirement of false alarm probability of a single missile, lessen the demand for detection signal-to-noise ratio, and improve the detection distance of the seeker, while keeping the total false alarm probability of multiple missile systems unchanged.

Keywords: air-to-air missile; collaborative detection; acquisition probability; scanning strategy;

false-alarm probability

0 引言

纵观全球军事发展现状,在信息化、智能化技术的不断推动下,现代战争越来越呈现出体系对抗的特点。空空导弹作为空战体系中执行攻击的关键节点,实现与体系信息的互联互通,融入未来空战体系信息网具有重要意义,面向复杂战场环境下的空空导弹协同作战研究成为研究人员关注的焦点。以适应未来作战模式为目的,调整作战理念,打破作战过程中各导弹之间没有任何联系与合作的传统思想,多枚导弹协同作战,将参战的所有导弹构成一个作战网络,在网络指控中心的调控和管理下,目标探测平台、导弹发射平台和各导弹间互相通信、信息共享、取长补短,以取得更高的作战效能,是未来面向智能协同攻击的导弹发展方向之一^[1-3]。当前,各国均已认识到多导弹协同攻击和防御的重要性^[4-5],并在积极研制相关型号的导弹系统,如俄罗斯研制的Π-700“花岗岩”超声速反舰导弹和美国正在研制的网火作战系统等。

协同探测是实现导弹协同作战^[6-7]的重要途径,多枚导弹协同探测可以扩大单位时间内总的搜索视场,通过设计协同搜索波位构型可提高中末制导交接班截获概率。以往对导引头搜索问题的研究主要集中于单个导引头,鲜见多枚导弹导引头协同搜索策略的文献。文献[8]对单枚导弹作战方式下复合制导空空导弹中末制导交接班截获概率进行研究;文献[9]提出了针对单枚导弹相控阵雷达导引头的最佳搜索波位构型。

本文首先分析了多枚导弹协同作战模式下目标指示误差的分布特征、截获概率的计算方法,并给出了一种适合于多枚导弹协同搜索的波位构型;其次,研究了多枚导弹协同探测抑制虚警技术,在确保系统总虚警概率不变的前提下,放宽对单枚导弹的虚警概率要求,降低检测信噪比,间接提高导引头的探测距离;最后,进行了数字仿真验证。

1 目标指示误差的计算方法

复合制导的空空导弹在中制导段依靠外部提供的目标指示信息完成制导飞行,在中末制导交接班段,弹载导引头根据目标指示参数调整导引头指向和多普勒滤波器中心,完成角度截获和速度截获,截获目标后转入末制导。由于各种随机因素的影响,目标指示存在误差,目标不会准确地出现在导引头视场和多普勒滤波器中,中末制导交接班截获概率是一个重要的设计指标。

目标指示误差包括角度指示误差和速度指示误差,其中目标角度指示误差分布在视线坐标系YZ平面上,为一个服从正态分布的二维随机向量;目标速度指示误差分布在弹目视线,为一个服从正态分布的一维随机变量。由于导引头多普勒滤波器带宽较大,速度截获概率通常较高,所以影响中末制导交接班截获概率的主要因素为角度截获概率。

在单枚导弹作战模式下,影响目标角度指示误差的因素包括载机火控雷达测量误差、弹载子惯导与机载主惯导对准误差、导弹导航误差(包括姿态导航和位置导航)。总的目标指示误差可表示为

$$\phi_p = \phi_c + \phi_a + \phi_g + \phi_{ac} \quad (1)$$

式中, ϕ_p 为目标指示误差, ϕ_c 为机载雷达测量误差引起的目标指示误差, ϕ_a 为对准误差引起的目标指示误差, ϕ_g 为姿态导航误差引起的目标指示误差, ϕ_{ac} 为位置导航误差引起的目标指示误差。由于机载雷达测量、对准和弹载惯导测量为独立事件,可以认为 ϕ_c 、 ϕ_a 、 ϕ_g 、 ϕ_{ac} 为独立、无偏、服从正态分布的随机变量。由于正态分布具有可加性,则 ϕ_p 也服从正态分布,方差为

$$D(\phi_p) = D(\phi_c) + D(\phi_a) + D(\phi_g) + D(\phi_{ac}) \quad (2)$$

由机载雷达测量误差产生的目标指示误差的方差 $D(\phi_c)$ 计算式为

$$D(\phi_c) = \left[\frac{1}{2} (S_{yy} + 2S_{yc}T + S_{cc}T^2) (1 + \cos^2\alpha) \|\mathbf{R}_H\|^2 + \right.$$

$$[S_{dd} + 2S_{dv}T + S_{vv}T^2] \sin^2\alpha / \|\mathbf{D}\|^2 \quad (3)$$

式中, S_{yy} 为载机雷达测角误差的方差, S_{cc} 为载机雷达测角速度误差的方差, S_{yc} 为载机雷达测角和测角速度的协方差, T 为数据链更新周期, α 为机-目距离矢量与弹-目距离矢量的夹角, \mathbf{R}_H 为“载机-目标”距离矢量, S_{dd} 为载机雷达测距误差的方差, S_{vv} 为载机雷达测速误差的方差, S_{dv} 为测距与测速的协方差, \mathbf{D} 为“导弹-目标”距离矢量。

对准误差产生的目标指示误差的方差 $D(\phi_a)$ 计算式为

$$D(\phi_a) = \frac{\|D(\phi) \times (\mathbf{D} + \mathbf{R}_w) \times \mathbf{D}\|}{\|\mathbf{D}\|^2} \quad (4)$$

式中, $D(\phi)$ 为对准误差方差矢量, \mathbf{R}_w 为导弹加速度产生的导弹位置变化矢量。

导弹姿态导航误差产生的目标指示误差方差 $D(\phi_g)$ 计算式为

$$D(\phi_g) = \frac{\| [D(\phi_3(t)) \times \mathbf{D} + \int_0^t \int_0^\tau \phi_3(y) \times \mathbf{W}(y) dy d\tau] \times \mathbf{D} \|}{\|\mathbf{D}\|^2} \quad (5)$$

式中, $D(\phi_3(t))$ 为导弹姿态角误差矢量, \mathbf{W} 为导弹加速度矢量。

导弹位置导航误差产生的目标指示误差方差 $D(\phi_{ac})$ 计算式为

$$D(\phi_{ac}) = \frac{\| [\int_0^t \int_0^\tau \mathbf{A} dy d\tau \mathbf{W}_0 + \int_0^t \int_0^\tau \mathbf{A} \mathbf{B} \mathbf{W} dy d\tau] \times \mathbf{D} \|}{\|\mathbf{D}\|^2} \quad (6)$$

式中, \mathbf{A} 为导弹弹体坐标系到惯性坐标系的转换矩阵, \mathbf{B} 为加速度计交叉耦合矩阵, \mathbf{W}_0 为导弹加速度计零漂误差矢量。

多弹协同作战模式下, 影响中末制导交接班截获概率的目标指示误差除上述的4项误差外, 还需考虑载机姿态误差。单弹作战模式下, 弹载子惯导和机载主惯导传递对准后, 导弹在机载主惯导惯性坐标系中完成攻击任务, 此时载机姿态误差不影响导弹截获概率。而在多枚导弹协同作战模式下, 多枚导弹需要采用统一的时空基准, 此时载机姿态误差会影响导弹在某一绝对惯性坐标系中的导航精度。载机姿态误差影响弹子惯

导惯性坐标系与绝对惯性坐标系的对准误差, 考虑载机姿态误差后, 弹子惯导惯性坐标系与绝对惯性坐标系的对准误差矢量按下式计算。

$$\phi_i = \phi + \phi_1 \quad (7)$$

式中, ϕ 为弹载子惯导与机载主惯导对准误差矢量, ϕ_1 为载机姿态角误差矢量, ϕ_i 为弹载子惯导惯性坐标系与绝对惯性坐标系的对准误差矢量。之后仍可以按式(4)计算对准误差引起的目标指示误差。

2 截获概率计算

利用式(2)~式(7)可以计算出目标指示误差的方差 $D(\phi_p)$, 其均方差为 $\sigma = \sqrt{D(\phi_p)}$ 。在视线坐标系 Y, Z 轴上, 目标指示误差相互独立, 服从相同的正态分布 $N(0, \sigma^2)$, 所以其联合概率密度函数为

$$f(y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{y^2 + z^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (8)$$

目标指示误差的概率密度函数如图1所示, 中心为高概率区, 四周为低概率区。

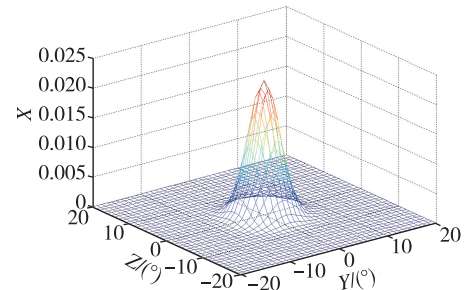


图1 目标指示误差的概率密度函数

Fig. 1 Probability density function of target indication error

导引头截获概率 P 可以描述为, 目标指示误差概率密度函数在导引头视场 Ω 内的积分, 即

$$P = \iint_{\Omega} f(y, z) dy dz \quad (9)$$

目标指示误差概率密度函数和积分面积 Ω 示意图见图2, 中间红色区域为高概率区。

非搜索状态下, 导引头视场位于视线坐标系中心, 假设导引头视场半径为 d , 则截获概率为

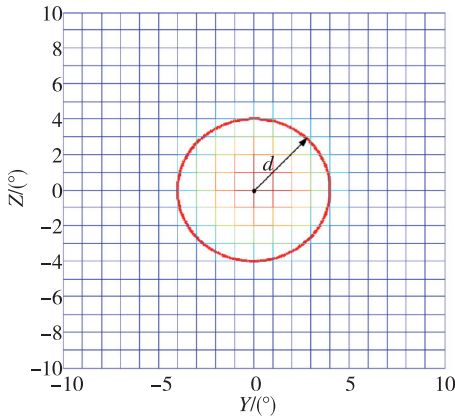


图 2 积分区域

Fig. 2 Integration area

$$P = \iint_{\sqrt{y^2+z^2} \leq d} f(y, z) dy dz \quad (10)$$

令 $\phi_d = \sqrt{y^2 + z^2}$ ，易证 ϕ_d 服从瑞利分布，故截获概率为

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

由上式可知，为提高截获概率，导引头可以通过扫描以扩大搜索视场。文献 [9-10] 给出了一种适合于相控阵雷达导引头的角度搜索方式，搜索视场由瞬时视场按照蜂窝结构覆盖得到，每个小圆的内接正六边形拼接为蜂窝结构，该搜索方式具有相邻视场重叠小、搜索覆盖率高的优点，如图 3 所示。

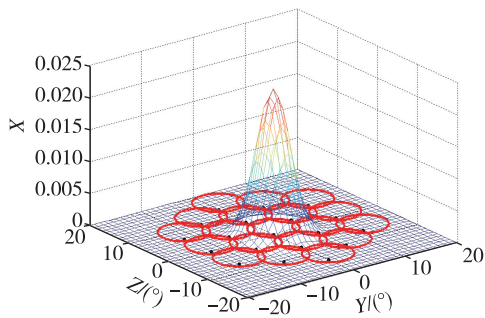


图 3 搜索方式示意图

Fig. 3 Diagram of search mode

导引头搜索过程中，除圆心波位处的截获概率可以按式 (11) 计算外，其余搜索波位的截获概率只能按照式 (9) 计算，计算过程中积分区间

需要去除波位重叠部分，在不规则的积分区间计算式 (9) 的二重积分的数值解并不方便，并且为了得到准确的数值积分结果，所需的积分步长比较小，所需的计算时间也较长。

除了概率密度积分的方法，另一种计算截获概率的方法是蒙特卡罗方法。蒙特卡罗方法是一种以概率统计理论为指导的数值计算方法，采用蒙特卡罗法可按照具体的误差分布形式，随机产生 N 个误差点，然后根据搜索波位构型统计截获概率。特别是在多枚导弹协同搜索方式下，在一次攻击任务中每枚导弹的对准误差和导航误差存在随机性，导弹姿态误差存在差异，这将导致在搜索平面上，由不同导弹导引头瞬时视场组合成的搜索视场，不能拼接成如图 3 所示的理想状态，波位构型存在随机性，所以在多枚导弹协同搜索模式下，采用蒙特卡罗法统计计算截获概率是一个更佳的选择。

3 协同搜索波位构型设计及验证

多枚导弹协同搜索可以扩大单位时间内总的搜索视场，或者针对给定的搜索视场缩短搜索时间，合理的协同搜索波位构型可以获得较高的中末制导交接班截获概率。以两枚导弹协同搜索为例，下面研究了 4 种波位构型，如图 4~图 7 所示。

构型 1 双弹协同搜索时，双弹组成正四边形

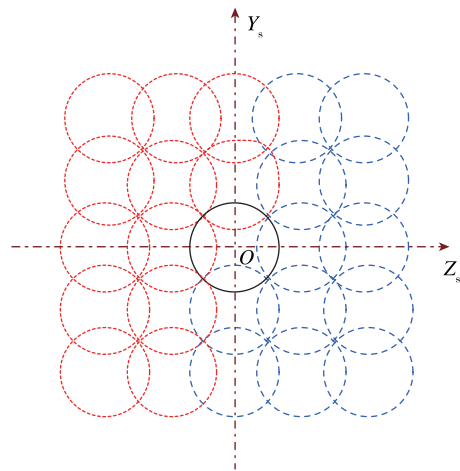


图 4 双弹协同搜索波位构型 1

Fig. 4 Cooperative searching strategy 1 of two missiles

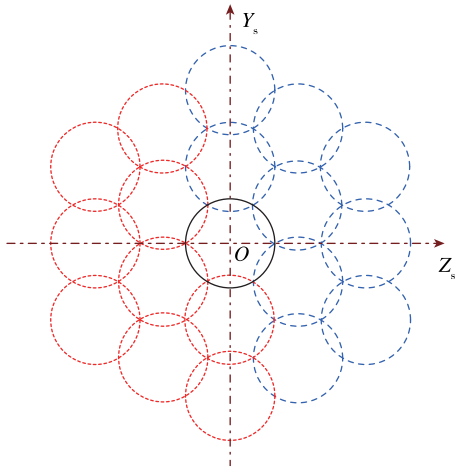


图5 双弹协同搜索波位构型2

Fig. 5 Cooperative searching strategy 2 of two missiles

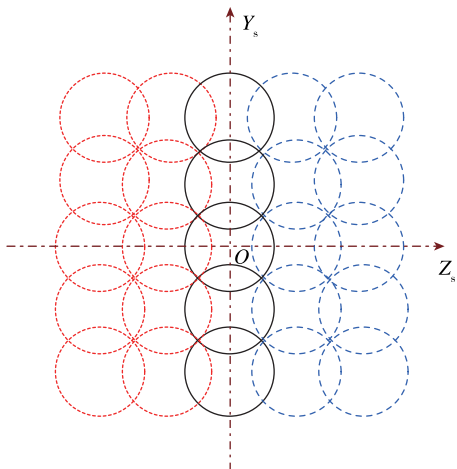


图6 双弹协同搜索波位构型3

Fig. 6 Cooperative searching strategy 3 of two missiles

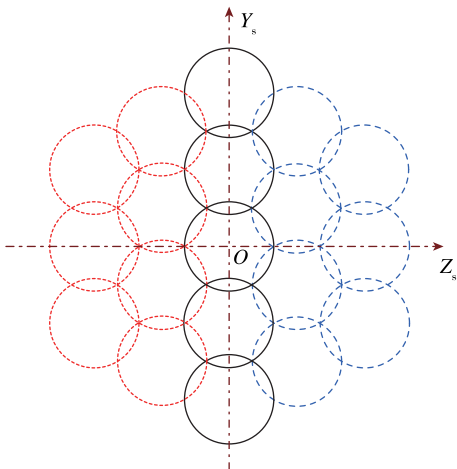


图7 双弹协同搜索波位构型4

Fig. 7 Cooperative searching strategy 4 of two missiles

搜索区域，一枚导弹搜索左边红色点线区域，另一枚导弹搜索右边蓝色短划线区域，中心黑色区域两枚导弹同时搜索。每枚导弹搜索13个波位。

构型2双弹协同搜索时，双弹组成六边形搜索区域，一枚导弹搜索左边红色点线区域，另一枚导弹搜索右边蓝色短划线区域，中心黑色区域两枚导弹同时搜索。每枚导弹搜索10个波位。

构型3针对双弹协同搜索过程中中间范围覆盖不足的情况，在构型1基础上进行改进，一枚导弹搜索左边红色点线区域，另一枚导弹搜索右边蓝色短划线区域，中间黑色区域两枚弹同时搜索，每枚导弹搜索15个波位。

同样针对双弹协同搜索过程中中间范围覆盖不足的情况，构型4在构型2基础上改进，一枚弹搜索左边红色点线区域，另一枚弹搜索右边蓝色短划线区域，中间黑色区域两枚弹同时搜索，每枚导弹搜索12个波位。

4种协同搜索波位构型截获概率统计结果见图8，目标指示误差样本取1000点，每个构型协同搜索50次。

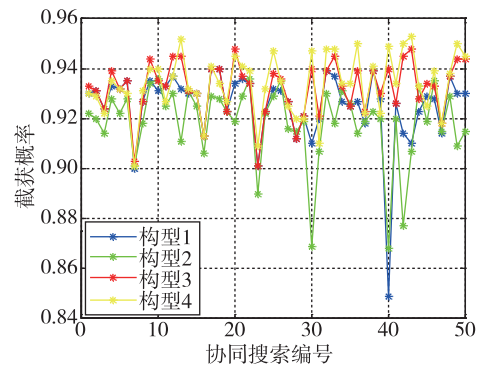


图8 4种构型截获概率统计结果

Fig. 8 Statistical results of acquisition probability of four searching strategies

从上图可以看出，协同搜索构型1第40次搜索截获概率较低，其协同搜索波位图见图9。

可以看出，受导弹姿态误差的影响，构型1这次协同搜索过程中，两枚导弹拼接形成的正四边形搜索视场中间存在较大的缝隙，出现在中间的目标没有覆盖到，导致截获概率较低。

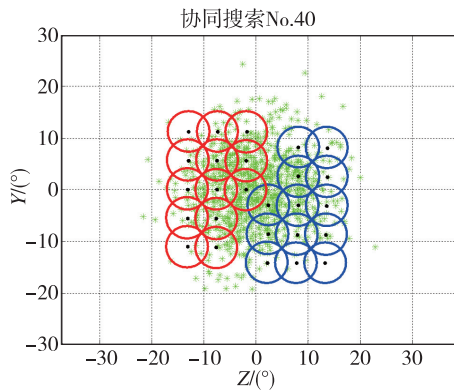


图 9 构型 1 第 40 次协同搜索波位图

Fig. 9 The 40th searching configuration of cooperative searching strategy 1

构型 2 存在同样的问题，两枚导弹协同搜索正六边形区域时，中间空隙依然很大，导致截获概率较低。构型 2 第 40 次协同搜索波位图见图 10。

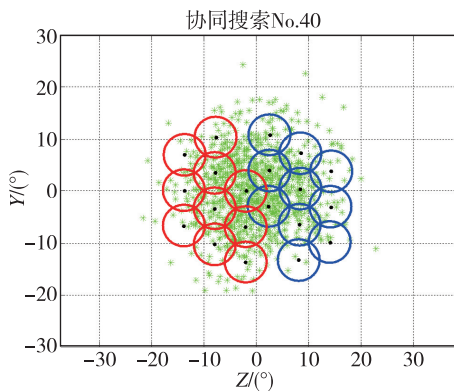


图 10 构型 2 第 40 次协同搜索波位图

Fig. 10 The 40th searching configuration of cooperative searching strategy 2

构型 3 和构型 4 加强了对中心区域的搜索，中间区域两枚导弹同时搜索，恰好可以填补构型 1 和构型 2 出现的中间空隙地带，提高了协同搜索截获概率。构型 3 第 40 次协同搜索波位图见图 11。构型 4 第 40 次协同搜索波位图见图 12。

通过理论分析和蒙特卡罗统计仿真可以看出，双弹协同搜索采用构型 3 和构型 4 波位构型，可以获得较高的协同搜索截获概率，这两种协同搜索方式截获概率都大于 0.9。构型 4 每枚导弹搜索 12

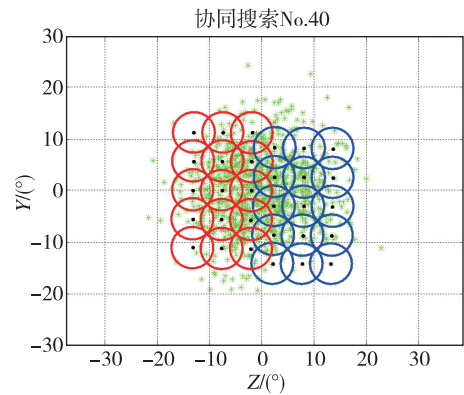


图 11 构型 3 第 40 次协同搜索波位图

Fig. 11 The 40th searching configuration of cooperative searching strategy 3

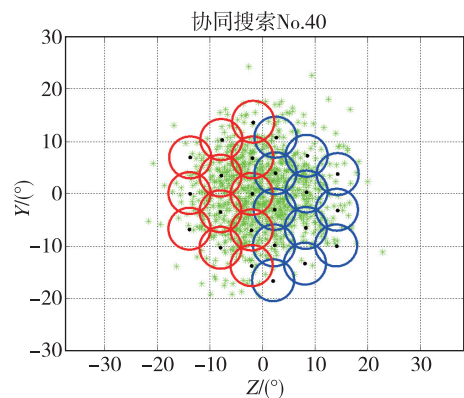


图 12 构型 4 第 40 次协同搜索波位图

Fig. 12 The 40th searching configuration of cooperative searching strategy 4

个波位，构型 3 每枚导弹搜索 15 个波位，构型 3 搜索时间比构型 4 多 25%，而构型 3 协同搜索截获概率相对构型 4 并没有大幅度的提高。在空空导弹中末制导交接班搜索目标过程中，搜索时间同样是需要考虑的一个重要因素，在满足截获概率的要求下，搜索时间越短留给导弹末制导的时间越长，导弹更容易获得相对高的制导精度。因此，与构型 3 相比，构型 4 为更佳的双弹协同搜索波位构型。导弹导引头在搜索过程中需要保持波束指向的空间稳定，详细方法参见文献 [11-12]。

4 协同探测抑制虚警概率技术

关于雷达探测的虚警概率，设想雷达接收信号总是落在一定判决区域里。如图 13 所示，这一

区域可以分成两部分,落在 Z_1 区域里判决为有目标信号,落在 Z_0 区域里判决为无目标信号。于是虚警概率可表示为

$$P_f = \int_{Z_1} p(v) dv \quad (12)$$

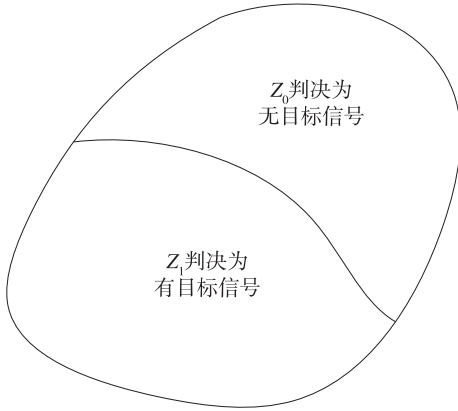


图 13 判决区域示意图

Fig. 13 Schematic diagram of decision area

两枚导弹协同作战时,二者独立进行信号处理,由概率论可得

$$\begin{aligned} P_f &= \int_{Z_1} p(v) dv \\ &= \int_{Z_1} p_{f1}(v) p_{f2}(v) dv \\ &= \int_{Z_1} p_{f1}(v) dv \int_{Z_1} p_{f2}(v) dv \end{aligned} \quad (13)$$

在单枚导弹作战模式下,要求导引头虚警概率 P_f 不大于 10^{-4} ,探测概率 P_d 不小于 0.9。在多枚导弹协同作战模式下,可以放宽对单枚导弹的虚警概率要求,通过协同探测、确认目标抑制虚警,使多弹协同攻击系统的总虚警概率和探测概率与单弹导弹攻击保持一致或更高。

以 2 枚导弹协同攻击为例,2 枚导弹导引头探测目标的事件彼此独立,保持系统总虚警概率 P_f 仍为 10^{-4} ,根据概率论计算结果,对单枚导弹导引头的虚警概率要求可以放宽为 10^{-2} ,探测概率要求仍为 0.9。由文献[13-14]可知,探测概率、信噪比和虚警概率之间的关系为

$$P_D \approx 0.5 E_{\text{trc}} (\sqrt{-\ln P_f} - \sqrt{S_{\text{NR}} + 0.5}) \quad (14)$$

其中

$$E_{\text{trc}}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-v^2} dv \quad (15)$$

在其他条件相同的情况下,同样的探测概率,低虚警概率要求的单脉冲信噪比要比高虚警概率低。从图 14 可以看出,保持探测概率 0.9,虚警概率从 10^{-4} 放宽为 10^{-2} 后,检测信噪比需求可降低约 2.5 dB,进而根据雷达方程可知,低虚警概率的情况下,雷达导引头的探测距离更远。由此,可以通过协同探测、确认目标,抑制单枚导弹导引头雷达的虚警概率,间接提高了导引头作用距离。

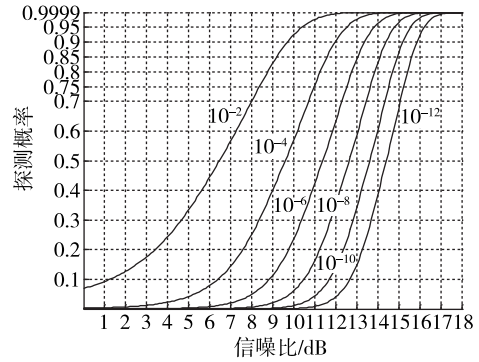


图 14 探测概率、单个脉冲 SNR/虚警概率关系图

Fig. 14 Detection probability/single pulse SNR/false alarm probability relationships

5 结论

多枚导弹协同作战,打破了作战过程中的传统思想,将参战的所有导弹构成一个作战网络,信息共享、取长补短,可取得更高的作战效能。本文研究了空空导弹协同探测技术,协同探测技术可以扩大单位时间内多枚导弹总的搜索视场,提高中末制导交接班截获概率,通过对 2 枚导弹协同搜索波位构型的研究,给出了一种最佳的双弹协同搜索波位构型;协同探测技术还可以在确保多枚导弹系统总虚警概率不变的前提下,放宽对单枚导弹的虚警概率要求,间接提高导引头的探测距离。

分布式协同作战适应未来战场作战需求,可

以提升导弹总体作战效能, 具有广阔的应用前景。

参考文献(References)

- [1] 邵长兴, 孙玄, 张迪, 等. 主辅拦截器协同制导方法研究[J]. 上海航天(中英文), 2018, 35(3): 95-100.
SHAO C X, SUN X, ZHANG D, et al. Study on collaborative guidance control method for main and auxiliary interceptors[J]. Aerospace Shanghai(Chinese & English), 2018, 35(3): 95-100(in Chinese).
- [2] 张娟. 一种基于被动探测的双机雷达协同定位方法[J]. 飞控与探测, 2023, 6(6): 63-67.
ZHANG J. A method of dual radar cooperative localization based on passive detection[J]. Flight Control & Detection, 2023, 6(6): 63-67(in Chinese).
- [3] 陈宏旭, 于江龙, 陈扬, 等. 拦截机动目标的三维协同中末一体化制导律[J]. 飞控与探测, 2023, 6(3): 86-94.
CHEN H X, YU J L, CHEN Y, et al. Three-dimensional cooperative mid-terminal guidance law for intercepting maneuvering targets[J]. Flight Control & Detection, 2023, 6(3): 86-94(in Chinese).
- [4] 王燕燕, 袁健全, 郝明瑞, 等. 基于时空协同的飞行器集群制导技术现状与应用[J]. 飞控与探测, 2021, 4(4): 32-39.
WANG Y Y, YUAN J Q, HAO M R, et al. Research status and application of the cooperative guidance technology for aerial vehicle swarm systems based on spatio-temporal coordination[J]. Flight Control & Detection, 2021, 4(4): 32-39(in Chinese).
- [5] 方艺忠, 姜浩楠, 陈旸, 等. 基于到达时间量测的多传感器协同定位算法研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(3): 60-63.
FANG Y Z, JIANG H N, CHEN Y, et al. Research on multi sensor collaborative localization algorithm based on arrival time measurement[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(3): 60-63(in Chinese).
- [6] 李洪昌, 卢晓东, 姚雨晗, 等. 高超飞行器的天基多尺度异步平台协同探测方法[J]. 飞控与探测, 2022, 5(6): 55-60.
LI H C, LU X D, YAO Y H, et al. Space based multi-scale asynchronous platform cooperative detection method for hypersonic vehicles[J]. Flight Control & Detection, 2022, 5(6): 55-60(in Chinese).
- [7] 商巍, 赵涛, 环夏, 等. 导弹武器系统协同作战研究[J]. 战术导弹技术, 2018, 188(2): 31-35, 48.
SHANG W, ZHAO T, HUAN X, et al. Research on collaborative operations of missile weapon systems[J]. Tactical Missile Technology, 2018, 188(2): 31-35, 48(in Chinese).
- [8] 樊会涛. 复合制导空空导弹截获目标概率研究[J]. 航空学报, 2010, 31(6): 1225-1229.
FAN H T. Study on target acquisition probability of air-to-air missiles with combined guidance[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(6): 1225-1229(in Chinese).
- [9] 王琪, 吕长起. 一种提高导引头截获概率的搜索方法[J]. 航空兵器, 2011, 18(3): 11-13.
WANG Q, LYU C Q. A method on improving the acquisition probability of radar seeker[J]. Aero Weaponry, 2011, 18(3): 11-13(in Chinese).
- [10] 沈昱恒, 张迪, 邵长兴. 基于相控阵导引头的目标角度搜索策略研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(2): 1-4.
SHEN Y H, ZHANG D, SHAO C X. Target angle scanning strategy of phased array active radar seeker for missiles' handover problem[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(2): 1-4(in Chinese).
- [11] 王琪, 付书堂. 相控阵雷达导引头捷联波束稳定算法研究[J]. 航空兵器, 2011, 18(6): 3-5.
WANG Q, FU S T. Research on strapdown beam stabilization algorithm for phased array radar seeker[J]. Aero Weaponry, 2011, 18(6): 3-5(in Chinese).
- [12] 王琪, 付书堂. 捷联导引头去耦算法研究[J]. 航空兵器, 2012, 19(6): 7-9, 19.
WANG Q, FU S T. Research on decoupling algorithm for strapdown seeker[J]. Aero Weaponry, 2012, 19(6): 7-9, 19(in Chinese).
- [13] 吴兆欣, 洪信镇. 空空导弹雷达导引系统设计[M].

北京：国防工业出版社，2007.

WU Z X, HONG X Z. Design of air to air missile radar guidance system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007(in Chinese).

[14] 朱国富. 雷达系统设计 MATLAB 仿真[M]. 北京：

电子工业出版社，2003.

ZHU G F. MATLAB simulation of radar system design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003(in Chinese).