

一种利用机载雷达多普勒盲区隐蔽接敌的机动决策方法

罗卫平¹, 李战武¹, 孙源源², 寇英信¹, 常一哲¹

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军 94968 部队工程科, 南京 210000)

摘要: 针对中距空战接敌过程中载机容易受敌方中距导弹攻击的问题, 提出一种利用机载脉冲多普勒雷达探测盲区实现隐蔽接敌的机动决策方法。该方法首先建立当前态势下敌机雷达多普勒盲区模型, 并利用电子支援措施(ESM)对辐射源的量测信息生成安全飞行边界, 然后对3种ESM战术状态分别建立机动决策模型, 最后通过滚动时域控制(RHC)算法求解接敌过程中的最优机动策略。仿真结果证明, 优化后的接敌轨迹可有效降低载机被发现和跟踪的概率, 并取得较为明显的态势优势。

关键词: 电子支援措施; 空战; 多普勒盲区; 滚动时域控制; 隐蔽接敌

中图分类号: V323.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)01-0028-06

A Maneuver Strategy of Stealthy Engagement Utilizing Airborne Radar Doppler Blind Zone

LUO Wei-ping¹, LI Zhan-wu¹, SUN Yuan-yuan², KOU Ying-xin¹, CHANG Yi-zhe¹

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Engineering Section, No. 94968 Unit of PLA, Nanjing 210000, China)

Abstract: A decision-making model was established for preventing the fighter from being attacked in the medium and long distance air get close to. The model helps the fighter get close to the enemy in stealthy way by making use of the Doppler blind zone of the enemy's Pulse Doppler (PD) radar. Firstly the Doppler blind zone model of the radar onboard enemy fighter is established. Secondly, the safe boundary is settled with the support of Electronic Support Measures (ESM). Then, three decision-making modes are established and switched according to the states of ESM states. Finally, an optimal maneuver strategy is figured out by the Receding Horizon Control (RHC) algorithm. The experiment turned out that a fighter can accomplish a lower risk of being detected and tracked if adopting the optimal maneuver strategy, and finally get better superiority on situation.

Key words: Electronic Support Measures (ESM); air combat; Doppler blind zone; RHC; stealthy engagement

0 引言

在目前的中远距空战中, 不论单机接敌还是多机协同接敌, 都面临着敌方中距导弹攻击的威胁, 尤其是在敌方机载雷达和导弹性能优于我方的情况下, 正面接敌往往会给对手“先视先射”的机会, 使我方处于被动。因此, 巧妙利用战术和技术动作, 破坏对方中距发射条件, 才有可能顺利接敌完成占位发射导弹。在实

际空战当中, 载机对导弹规避难度大, 成功率低, 因此, 要从破坏对方的发射条件入手, 破坏其雷达跟踪, 使其不能达成发射条件或者中断其中制导过程, 保证接敌过程中载机的安全。

中远距空战主要依靠机载雷达远距离发现和跟踪空中目标来实现火控解算和导弹中制导。目前国内外先进的机载火控雷达均采用脉冲多普勒(Pulsed Doppler, PD)体制, 由于多普勒体制的固有缺陷, 机载PD雷达对低空低速目标跟踪存在盲区, 使得载机能够利用这一弱点通过相应机动破坏敌机的雷达跟踪^[1]。文献[2]叙述的“90°侧转”机动的运用就是接敌过程中利用速度盲区破坏雷达跟踪的方法。然而机载多普勒雷达速度盲区

收稿日期: 2014-09-23

修回日期: 2014-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61472441)

作者简介: 罗卫平(1992—), 男, 壮族, 广西南宁人, 硕士生, 研究方向为航空指挥控制与战术引导。

十分狭窄,仅依靠飞行员凭经验操纵战机进入盲区十分困难,因此需要高精度的引导方式。随着角度精确测量技术的发展,先进战斗机的机载电子支援措施(Electronic Support Measures,ESM)已经能初步提供较精确的辐射源方位角度,这使得 ESM 结合先进飞控系统来辅助战斗机实施精确的战术机动成为可能。为此,需要一种有效的机动决策方法来完成接敌-规避-占位所需的精确战术引导。

基于以上考虑,本文提出一种在 ESM 辅助下利用机载雷达多普勒盲区隐蔽接敌方法,该方法利用 ESM 获取到的敌机雷达态势,计算出载机当前可利用的雷达多普勒盲区,通过滚动时域控制(Receding Horizon Control,RHC)方法^[3],生成最优接敌轨迹,引导载机快速隐蔽接敌。

1 PD 雷达探测盲区模型

机载 PD 雷达利用多普勒效应将回波在频域内展开,通过对不同频谱的地杂波进行抑制,实现在特定频域内检测目标信号,因而具有良好的下视能力。然而 PD 雷达由于体制上的缺陷,存在着无法避免的主瓣杂波盲区和高度杂波盲区,因而成为空战中可以充分利用的薄弱点和突破口^[4]。

下视条件下敌机雷达接收机回波频谱分布如图 1 所示,根据产生原因不同,可将杂波分为主瓣杂波、副瓣杂波、高度杂波。主瓣杂波是由雷达天线主瓣波束照射地面时被雷达接收的散射回波。由于雷达天线主瓣波束具有一定角度,照射在一个范围内的地面,因而主瓣杂波的多普勒频谱具有一定宽度。载机回波频率在频谱中的位置与载机相对于敌机雷达的航向与速度有关。

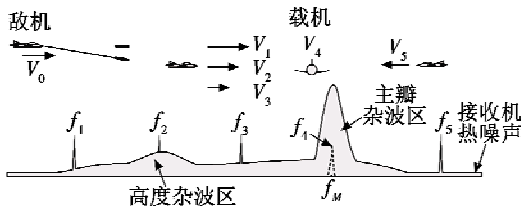


图 1 载机的径向速度决定回波频率在回波频谱中的位置

Fig. 1 The echo frequency in the echo spectrum varies with radial velocity of fighter

当载机受到雷达波束照射时,其相对雷达波束的径向速度越低,回波的频率越接近主瓣杂波中心频率。由于主瓣杂波功率很高,占据着大部分回波能量,敌机在进行雷达信号处理时,需要对主瓣频带内的功率进行抑制,才能获得足够高的高信噪比。当回波频率落入主瓣杂波区时,回波信号也一并被抑制,因此敌机雷达在回波频率上存在检测盲区。事实上,机载火控雷

达的频率检测范围由多普勒频率检测门限控制^[5],当回波的多普勒频率小于雷达的多普勒频率检测门限时,回波信号将被忽略。对应地存在最小可检测速度(Minimum Detectable Velocity,MDV),当载机在波束方向上的速度低于最小可检测速度时,回波的多普勒频移将低于门限值,因而不会被雷达发现,即载机处于敌机雷达的速度盲区。

敌机雷达的最小可检测速度与雷达型号和工作模式有关,可由情报或经验给出其近似数值。例如,文献[6]给出 F-16 战斗机 AN/APG-66 雷达在空战搜索模式下的最小可检测速度为 $\pm 30.48 \text{ m/s}$ 。假设敌机机载雷达的最小可检测速度为 ΔV_{\min} ,用 α, β 表示载机达到最小检测速度时航向与波束垂直方向夹角,则有

$$|V \sin \alpha| = |V \sin \beta| = \Delta V_{\min} \quad (1)$$

得

$$\alpha = \beta = \arcsin \frac{\Delta V_{\min}}{V} \quad (2)$$

2 ESM 测角计算安全飞行区域边界

机载 ESM 是机载传感器系统的重要组成部分,是战场电子情报收集的重要手段。高灵敏度的 ESM 能记录所有抵达战斗机的辐射信号特征,在全向全频域范围内实现对辐射源的方位的精确测定、威胁类型和威胁等级的判定,是提高载机战场生存力的重要保证。

波束来源指向是机载 ESM 提供的最基本参数,在文献[7]叙述 5 种常用的单平台辐射测角方法中,干涉测向误差已经降至均方根 1° ,而对于多平台无源定位,利用多机协同到达时差(TDOA)和到达频差(FDOA)测量定位方式可以提供更加精确的辐射源位置。因此假设 ESM 对辐射源角度测量误差可忽略不计,求出盲区边界角在载机机体坐标系中的位置。如图 2 所示,忽略 ESM 天线安装角误差,在机体坐标系中,若 ESM 测定的辐射源方位角和俯仰角为 (φ, γ) ,则可以求得指向辐射源的单位向量 $\eta(x, y, z)$,其中,

$$\begin{cases} x_r = \cos \gamma \cos \varphi, \\ y_r = \sin \gamma, \\ z_r = \cos \gamma \sin \varphi, \end{cases} \quad (3)$$

由此确定一个过点 O 并垂直于 η 的空间平面 π ,存在另外两个平面 π_1, π_2 分别与 π 的夹角 α, β 。由 1 节结论可知, π_1, π_2 就是当前速度大小为 V 时战斗机在空间中的可用盲区边界。

由于速度坐标系与机体坐标系不重合,为直观显示和便于操作,将 π_1, π_2 在平显中显示为近铅垂方向的两条虚线,作为安全飞行边界。当雷达告警器发出雷达跟踪告警时,平显画面随即出现报警标识“TRACKED”和

安全边界,如图3所示。飞行员在引导圆的辅助下操纵战斗机,使速度标志进入两条虚线间,则载机沿飞行轨迹进入敌机雷达速度盲区。

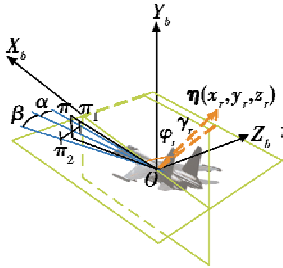


图2 盲区边界示意图
Fig.2 The indication of blind zone

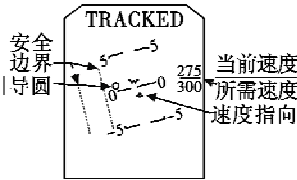


图3 平显引导画面
Fig.3 HUD guidance screen

ESM 每一次截获雷达脉冲信号,可以获得辐射源方位向量,能够确定一个 π 平面,这时火控系统根据载机当前的速度 V 和敌机的运动状态量,计算出 π_1, π_2 的位置,并在平显上实时更新。

此外,机载 ESM 通过分析雷达脉冲的特征信息可识别敌机雷达当前是处于跟踪状态还是扫描状态,实现对威胁程度的判定,为火控系统生成引导轨迹以及飞行员做出决策提供依据。

3 接敌过程中决策模式

在接敌过程中,精确恰当的战术引导往往能帮助战斗机取得更好的态势优势。因此,机载火控系统需要充分利用本机传感器信息及外部信息源提供的态势信息,完成机动决策,生成最优引导轨迹。

在中远距离上,载机面临火力威胁的前提是受到敌机雷达跟踪。因此,在接敌过程中载机需要尽可能降低自身暴露的概率。在实际中,载机受雷达跟踪的状态可以由 ESM 探测识别^[8],ESM 可提供如下所述的3种战术状态。

- 1) 安全状态(SAFE)。ESM 未探测到敌机扫描信号,载机处于安全空域且尚未被发现。
- 2) 搜索告警(SEARCHING)。ESM 探测到敌机雷达辐射信号,并判断雷达仍处于搜索状态,载机尚未被跟踪。
- 3) 跟踪告警(TRACKED)。ESM 探测到敌机雷达辐射信号,判断雷达处于跟踪状态,载机已被敌机锁定和跟踪。

针对3种战术状态,对应地提出3种机动决策模式:1) 快速接敌模式(Quick Engagement, QE),当载机未受到雷达探测威胁时,生成决策引导载机快速机动完成占位;2) 隐蔽接敌模式(Stealth Engagement, SE),为降低暴露概率,生成决策引导载机在敌雷达盲区内进行隐蔽机动,并主动规避敌机雷达探测区;3) 机动

规避(Maneuver Avoidance, MA),遭受跟踪时,生成决策将载机引导到垂直雷达波束的方向,进入雷达盲区,破坏敌机雷达跟踪。

决策模式的切换由 ESM 所处的战术状态控制,切换应保证生成轨迹的连续性、平滑性。决策器与其他设备的信息交联关系如图4所示。

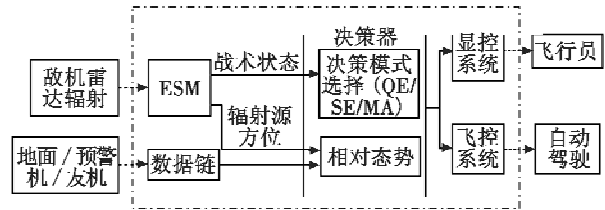


图4 决策器的信息交联关系

Fig.4 The information framework of the decision-maker by ESM tactical state control of the maneuver decision process see Fig.5.

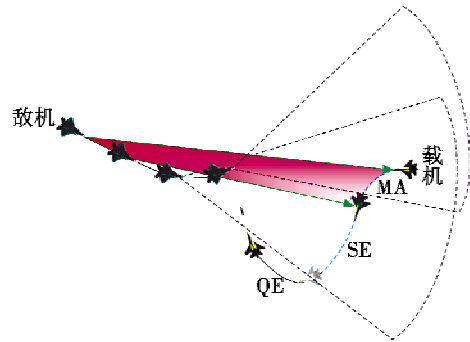


图5 由 ESM 战术状态控制的机动决策过程示意图
Fig.5 The maneuver strategies decided by states of ESM

4 机动决策的最优控制模型

通过建立飞机运动模型来描述敌我相对态势,构建指标函数对决策过程进行评价,并通过滚动时域算法来求解最优接敌轨迹。

4.1 飞机运动模型

在惯性坐标系下建立飞机的运动模型,设 $x = [x \ y \ z]^T$ 为战斗机的位置,战斗机运动方程表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cdot \cos \gamma \cdot \cos \chi \\ \dot{y} = v \cdot \cos \gamma \cdot \sin \chi \\ \dot{z} = v \cdot \sin \gamma \end{cases} \quad (4)$$

$$a = \ddot{x} \quad (5)$$

$$|a| = |\ddot{x}| = f(\gamma, \chi, v, \dot{\gamma}, \dot{\chi}, \dot{v}) \quad (6)$$

式中: v 为战斗机的速度大小; γ 为航迹俯仰角; χ 为航迹偏转角; $|a|$ 为战斗机过载值。

将载机和敌机的位置分别设为 $x_F(x_F, y_F, z_F)^T, x_T(x_T, y_T, z_T)^T$,速度矢量分别表示为 $V_F = \dot{x}_F, V_T = \dot{x}_T$,则相对态势可表示为

$$\begin{cases} D = |\mathbf{x}| = |\mathbf{x}_F - \mathbf{x}_T| \\ \varphi = \arccos\left(\frac{(\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_F) \cdot \mathbf{V}_F}{D \cdot |\mathbf{V}_F|}\right) \\ q = \arccos\left(\frac{(\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_F) \cdot \mathbf{V}_T}{D \cdot |\mathbf{V}_T|}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{x} 为载机到敌机的矢量; φ 为视线角; D 为敌我距离; q 为敌机进入角。

4.2 控制量及约束条件

取航迹控制量为 $\mathbf{u} = [\gamma, \chi, v]$, 模型状态和控制量需满足高度约束、速度约束和过载约束

$$\begin{cases} z_{\min} < z < z_{\max} \\ v_{\min} < v < v_{\max} \\ |\mathbf{a}| < n_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

4.3 雷达探测模型

敌机雷达单次扫描对我机的发现概率为^[9]

$$P_d = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{1}{2} + R_{S,N}} - \sqrt{\lg\left(\frac{1}{P_F}\right)} \right) \right] & |\mathbf{v}_r| \geq \Delta V_{r\min} \\ 0 & |\mathbf{v}_r| < \Delta V_{r\min} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $R_{S,N}$ 为回波信噪比; P_F 为虚警概率; \mathbf{v}_r 为载机沿

波束方向速度分量, 其中, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$ 。

在迎头接敌过程中, 载机的回波频率处于无杂波区, 可认为雷达的检测性能仅受到系统噪声的影响, 若载机与敌机雷达距离为 R , 检波后积累前检波器处的距离多普勒单元中的信噪比为 $R_{S,N} = (R_0/R)^4$, 其中, R_0 为信噪比等于 1 时的敌我距离。因而, 载机处于敌雷达视场时间为 t 时被发现概率为

$$P(t) = \int P_d(t) \frac{1}{T_s} dt \quad (10)$$

式中, T_s 为雷达对空域的搜索周期。假定敌机雷达具有一定的航迹外推能力, 在跟踪状态失去有效回波时长为 τ 后重新进入搜索状态, 则认为载机进入盲区时长为 τ 后敌机雷达的跟踪失效。

4.4 指标函数

机动决策的目的是在多个考虑因素下, 使战斗机以最佳的机动方式达成攻击条件。空战机动决策主要考虑的因素有: 接敌过程的快速性、安全性、飞行员操作难度。对于在时间区间 (t_0, t_f) 内的控制量 \mathbf{u} , 其评价指标描述如下。

1) 对于快速性, 以完成机动的时间为指标

$$J_T(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_f} dt = t_f - t_0 \quad (11)$$

2) 对于安全性, 以机动过程中遭受威胁的程度来

描述

$$J_U(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_f} E(t) dt \quad (12)$$

式中, $E(t)$ 为 t 时刻敌机对载机的威胁值。文献[10]给出敌机威胁计算模型, 它包含敌机进入角、敌我距离、距离变化率、敌机作战能力 4 个因素。而通常敌机对我机的跟踪状态是非常能反映威胁状态的一个因素, 是我机做出规避决策的重要考量, 且被跟踪状态是可由 ESM 检测的, 因此, 本文在原威胁模型的基础上增加了雷达跟踪威胁作为一项考虑因素。

敌机从完成跟踪到发射导弹的时间间隔为 T , 假设 T 服从概率分布 $F(T)$, 则载机被跟踪时间为 t 时敌

机已发射导弹的概率为 $P_F(t) = \int_0^t F(s) ds$, 说明被跟踪

时间越长, 载机遭到攻击的风险越大; 若未被跟踪, 则无被攻击的风险。敌机的跟踪信息由机载 ESM 或雷达告警器给出, 若载机已被跟踪的时间为 t , 可将受到的威胁表示为

$$e^5 = \int_0^t P_F(s) ds \quad (13)$$

总的威胁值为

$$E(t) = \lambda_1 e^1 + \lambda_2 e^2 + \lambda_3 e^3 + \lambda_4 e^4 + \lambda_5 e^5 \quad (14)$$

式中: $e^k, k \in [1, 5]$, 表示规范化的各项威胁指数; λ_k 为对应的威胁权重; 5 个因素分别为敌机进入角、敌我距离、距离变化率、敌机作战能力、遭受雷达跟踪时间。

对于操作控制难度, 可通过飞行员承受过载值 n 来描述, 其中 $n(t) = |\mathbf{a}(t)|$, 有

$$J_C(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_f} n(t) dt \quad (15)$$

SE, MA 决策模式下载机需要保持低径向速度以利用雷达速度盲区, 因此设置小径向速度指标

$$J_{vr}(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_f} v(t) \cdot \frac{(\mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_F(t)) \cdot \mathbf{D}(t)}{D(t)} \cdot \frac{1}{\Delta V_{r\min}} dt \quad (16)$$

由于终端时间 t_f 是不确定的, 为进行全局优化, 采用如下近似值函数

$$\hat{J}_T(\mathbf{u}) = \frac{D(t_f) - R_F}{\dot{D}(t_f)} \quad (17)$$

$$\hat{J}_U(\mathbf{u}) = E(t_f) \cdot \frac{D(t_f) - R_F}{\dot{D}(t_f)} \quad (18)$$

$$\hat{J}_C(\mathbf{u}) = |\mathbf{a}(t_f)| \cdot \frac{D(t_f) - R_F}{\dot{D}(t_f)} \quad (19)$$

式中: $D(t)$ 为 t 时刻敌我距离; R_F 为我方空空导弹的允许发射距离。得到所需的全局指标函数

$$\tilde{J}(t) = w_1 \cdot (J_T(\mathbf{u}) + \hat{J}_T(\mathbf{u})) + w_2 \cdot (J_U(\mathbf{u}) + \hat{J}_U(\mathbf{u})) + w_3 \cdot (J_C(\mathbf{u}) + \hat{J}_C(\mathbf{u})) + w_4 \cdot J_w(\mathbf{u}) \quad (20)$$

式中, w_1, w_2, w_3, w_4 是对应指标的考虑权重因子, 不同决策模式采用的权重因子如表 1 所示。

表 1 3 种决策模式下的指标的权重分配

Table 1 The weight allocation of indicators in three decision modes

	w_1	w_2	w_3	w_4
QE	0.6	0.2	0.2	0
SE	0.2	0.4	0.2	0.2
MA	0.1	0.5	0.1	0.3

4.5 终端条件

根据模型的定义, 载机最终状态量 \mathbf{x}_F 需满足下述攻击区边界条件

$$h(\mathbf{x}) = \{x | \varphi(t) \leq \varphi_F, q(t) \leq q_F, D(t) \leq R_F\} \quad (21)$$

式中: R_F, q_F, φ_F 为载机达成攻击态势的终止条件; q_F 为满足攻击条件时敌机的最大进入角; φ_F 为导弹最大发射离轴角; R_F 为导弹最大允许发射距离。

4.6 基于 RHC 的数值求解方法

将机动决策问题转化为带约束条件的非线性规划问题。这里采用 RHC 对问题进行求解^[3]。首先将需规划的时域 $[t_k, t_k + \Delta T]$ 离散化为 N 个阶段, 其中, $t_k = t_k^0 < t_k^1 < \dots < t_k^N = t_k + T$ 。为减小计算量, 取 $t_k^i = t_k + i/N \cdot \Delta T (i \in [0, N])$, 然后取对应阶段的控制量 $\mathbf{u}(t_k^i) = \mathbf{u}_i$, 将问题表述为如下约束优化模型

$$\min F(\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{N-1}) = \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{J}(\mathbf{u}_i) \quad (22)$$

$$\text{s.t. } g(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i, \mathbf{u}_i, \dot{\mathbf{u}}_i) \leq 0 \quad h(\mathbf{x}_i) = 0$$

式中: $F(\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{N-1})$ 为模型的代价函数; $g(\cdot)$ 为约束条件; $h(\cdot)$ 为终止条件。对于给定控制量 \mathbf{u}_i 和初始状态 \mathbf{x}_i, t_k^{i+1} 时刻的系统状态 \mathbf{x}_{i+1} 即可通过状态方程一步积分得到。

在每一个滚动的优化时域内, 利用粒子群优化算法(PSO)^[11]在 $[t_k, t_k + \Delta T]$ 内搜索 N 步控制的最优控制量, 得到最优决策 $\mathbf{u}_k^* = \{\mathbf{u}_k^1, \mathbf{u}_k^2, \dots, \mathbf{u}_k^N\}$ 。

5 仿真分析

仿真条件: 敌我两架战斗机进行中远距空战, 我机初始坐标(50 km, 0 km, 1 km), 速度为 300 m/s, 初始航迹偏转角为 -135° , 航迹俯仰角 0° , 速度范围为 200 ~ 400 m/s, 最大过载 $9g$, 雷达视场角 $\pm 60^\circ$, 导弹最大离轴发射角 45° , 最大射程 30 km; 敌机坐标(0 km, 40 km, 5 km), 速度为 300 m/s, 初始航迹偏转角为 -30° , 航迹俯仰角为 0° , 雷达视场角 $\pm 60^\circ$, 导弹最大离轴发射角最大射程 40 km。取敌机雷达对我机探测

的 $R_0 = 100$ km, $T_s = 1$ s, 虚警概率 $P_F = 10^{-6}$ 。 $\Delta T = 5$ s, $N = 5$, 仿真步长为 1 s。

在同等初始条件下, 设置 3 种不同的机动决策方法引导战斗机接敌。

仿真 1 我机采用比例导引法接敌。

仿真 2 我机采用本文机动决策方法接敌。

仿真 3 减少敌机在原空域的搜索时间, 增加其搜索灵活性, 其余条件与仿真 2 相同。

仿真结果如图 6 ~ 图 8 所示, 包含了仿真时间、敌机和我机机动轨迹、我机受跟踪状态、机动过载值等信息。其中: 我机航迹为黑色, 航迹中的红色部分为被雷达跟踪的阶段; 敌机航迹为蓝色, 航迹中的红色部分为我机处在雷达视场外。扇形表示以本机为中心的导弹发射区的投影。跟踪状态以时间为坐标轴, “1”表示被跟踪, 标记为红色, “0”表示未被跟踪。

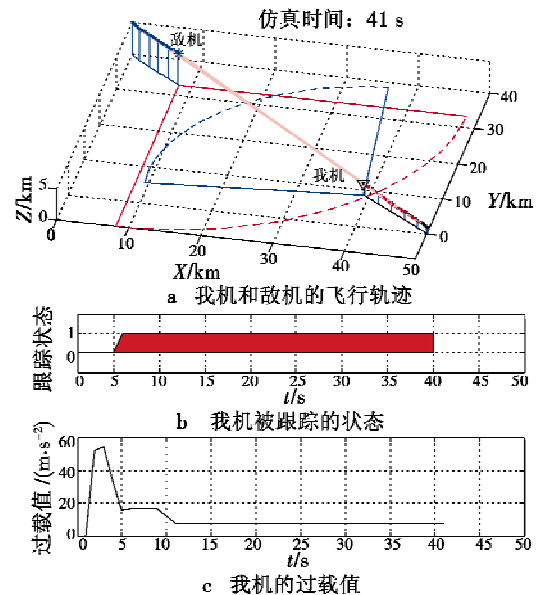


图 6 仿真 1 结果

Fig. 6 Result of experiment 1

仿真 1 结果 在数据链支持下, 我机采用比例导引的方式从低空进入, 静默接敌, 在第 6 s 时被敌机雷达截获, 此后全过程处于被跟踪状态, 第 26 s 时敌机先满足发射条件, 此时敌我距离 40 km。结果表明在敌机雷达和导弹装备处于优势的情况下, 直接接敌不能为我机取得发射优势。

仿真 2 结果 我机在 $t = 7$ s 时被对方雷达发现并跟踪, 立即作出机动规避, 在 $t = 12$ s 的时候摆脱雷达跟踪, 并在 ESM 辅助下在敌机速度盲区内机动, 而敌机仍旧在空域附近搜索, $t = 72$ s 时 ESM 判断我机已离开敌机雷达视野, 在数据链引导下, 在 $t = 81$ s 时先于敌机抵达发射位置。结果表明, 决策模型可有效降低我机被跟踪的概率。

仿真3结果 我机在 $t=6$ s 时被敌机雷达发现并跟踪,我机立即做出机动规避,在 $t=14$ s 时摆脱敌雷达跟踪。 $t=37$ s 时我机处于 QE 决策模式机动时被再次跟踪,决策器由 QE 自动切换 MA 模式进行规避机动,并于 $t=53$ s 时再次摆脱跟踪,在 $t=105$ s 时先于敌机完成发射占位。结果表明,决策模型能够应对突发的跟踪威胁。

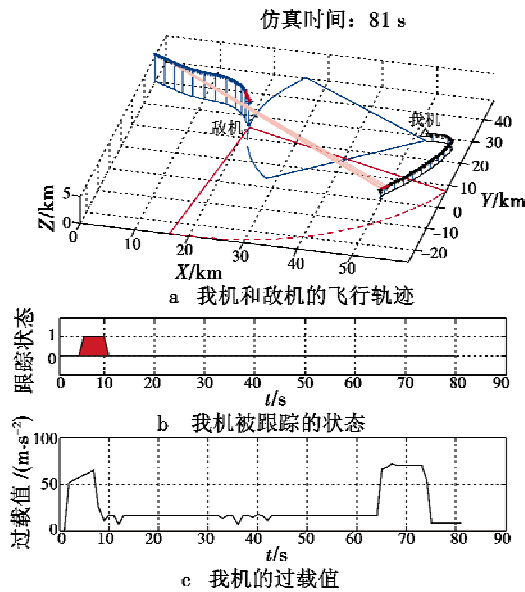


图7 仿真2结果

Fig. 7 Result of experiment 2

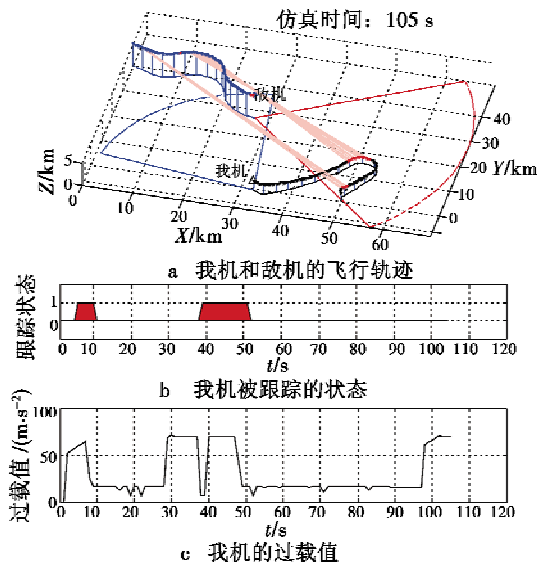


图8 仿真3结果

Fig. 8 Result of experiment 3

从仿真结果的对比中可以看出,本文提出的机动决策方法能使我机充分利用敌机雷达盲区,减少被敌机雷达跟踪锁定的几率,提高接敌过程的隐蔽性。通过规避机动破坏敌机中距导弹发射条件,也在一定程度上抵消敌机雷达和导弹优势,为我机机动占位创造

有利条件。

6 结束语

针对中远距空战中载机易遭受跟踪和攻击的问题,本文将载机受敌机雷达跟踪状态作为重要考虑因素制定机动决策方案,比较符合空战实际。文中提出的在ESM辅助下利用敌机雷达多普勒速度盲区,实现反雷达探测的精确规避机动及在盲区中保持接敌隐蔽性,为制定空战机动决策、实现隐蔽接敌提供了新的思路。

参考文献

- [1] 张立军. 规避超视距攻击战术初探[J]. 中国航空武器试验训练靶场, 2009, 5(s1): 57-60. (ZHANG L J. Tactics of avoiding over-the-horizon attack [J]. Test and Training Range of China Aircraft Weapon, 2009, 5(s1): 57-60.)
- [2] 卢鹏, 王瑾. 面向第四代战斗机的超视距空战[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(6): 154-157. (LU P, WANG J. The research on BVR combat for the forth generation fighters [J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(6): 154-157.)
- [3] 付昭旺, 李战武, 强晓明, 等. 基于滚动时域控制的战斗机空战机动决策[J]. 光电与控制, 2013, 20(3): 21-29. (FU Z W, LI Z W, QIANG X M, et al. Tactical decision-making method based on receding horizon control for air combat [J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(3): 21-29.)
- [4] 崔晓宝, 李楠. 机载PD雷达对机动目标探测盲区计算模型研究[J]. 火控雷达技术, 2008, 37(3): 36-40, 48. (CUI X B, LI N. Research on calculation models for detection blind zone of airborne PD radar against maneuvering targets [J]. Fire Control Radar Technology, 2008, 37(3): 36-40, 48.)
- [5] 高岚, 江晶, 蓝江桥, 等. 机载脉冲多普勒雷达对运动目标可检测性模型分析[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(6): 61-63. (GAO L, JIANG J, LAN J Q, et al. The model of airborne pulsed Doppler radar detecting moving targets and its analysis [J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(6): 61-63.)
- [6] 张伟. 机载雷达装备[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010: 113-114. (ZHANG W. Airborne radar [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010: 113-114.)
- [7] ADAMY D L. 电子战进阶[M]. 朱松, 王燕, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009: 164-171. (ADAMY D L. EW102: A second course in electronic warfare [M]. Translated by ZHU S, WANG Y. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 164-171.)
- [8] 李峥. 机载雷达告警技术发展趋势[J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(3): 51-54. (LIZ. The development

(下转第44页)

- [4] 王祖俪,程小平. 入侵响应中基于事件相关性的攻击预测算法[J]. 计算机科学, 2005, 32(4): 144-146. (WANG Z L, CHENG X P. An attack predictive algorithm based on the correlation of intrusion alerts in intrusion response[J]. Computer Science, 2005, 32(4): 144-146.)
- [5] WU R Y, LI W G, HUANG H. An attack modeling on hierarchical colored Petri nets[C]//International Conference on Computer and Electrical Engineering, 2008:918-921.
- [6] 陈灿,阎保平. 针对复合攻击的网络攻击预测算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(5): 172-174. (CHEN C, YAN B P. Network attack forecast algorithm for multi-step attack[J]. Computer Engineering, 2011, 37(5): 172-174.)
- [7] 曹晖,王青青,马义忠,等. 基于动态贝叶斯博弈的攻击预测模型[J]. 计算机应用, 2007, 27(6): 1545-1547. (CAO H, WANG Q Q, MA Y Z, et al. Attack prediction model based on dynamic Bayesian games[J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(6): 1545-1547.)
- [8] 曹晖,王青青,马义忠,等. 基于静态贝叶斯博弈的攻击预测模型[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(10): 122-124. (CAO H, WANG Q Q, MA Y Z, et al. Attack prediction model based on static Bayesian game[J]. Application Research of Computers, 2007, 24(10): 122-124.)
- [9] 张松红. 基于隐马尔可夫模型的网络安全预警技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2007. (ZHANG S H. Research on network security early warning technology based on hidden Markov model[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2007.)
- [10] 鲍旭华,戴英侠,冯萍慧,等. 基于入侵意图的复合攻击检测和预测算法[J]. 软件学报, 2005, 16(12): 2132-2138. (BAO X H, DAI Y X, FENG P H, et al. A detection and forecast algorithm for multi-step attack based on intrusion intention[J]. Journal of Software, 2005, 16(12): 2132-2138.)
- [11] 翟光群,周双银. 多步攻击告警关联模型构建与实现[J]. 计算机应用, 2011, 31(5): 1276-1279. (ZHAI G Q, ZHOU S Y. Construction and implementation of multi-step attacks alert correlation model[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(5): 1276-1279.)
- [12] ALSERHANI F, AKHLAQ M, AWAN I U, et al. MARS: Multi-stage attack recognition system[C]//The 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2010:753-759.
- [13] LEE D H, KIM D Y, JUNG J I. Multi-stage intrusion detection using hidden Markov algorithm[C]//International Conference on Information Science and Security, 2008:72-77.
- [14] 张松红,王亚弟,韩继红. 基于隐马尔可夫模型的复合攻击预测方法[J]. 计算机工程, 2008, 34(6): 131-133. (ZHANG S H, WANG Y D, HAN J H. Approach to forecasting multi-step attack based on HMM[J]. Computer Engineering, 2008, 34(6): 131-133.)
- [15] 赵冬梅,刘金星,马建峰. 基于模糊小波神经网络的信息安全风险评估[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(11): 43-45. (ZHAO D M, LIU J X, MA J F. Risk assessment of information security using fuzzy wavelet neural network[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech: Natural Science Edition, 2009, 37(11): 43-45.)
- [16] 赵冬梅. 信息安全风险评估量化方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007. (ZHAO D M. Study on the risk assessment quantitative method of information security[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.)

(上接第 33 页)

- trend of the airborne radar warning receiver[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008, 23(3): 51-54.)
- [9] 王强,张安,陈超. 机载有源相控阵雷达发现概率改进算法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(11): 57-59. (WANG Q, ZHANG A, CHEN C. One improved algorithm of active airborne phased array radar detection probability[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(11): 57-59.)
- [10] 蓝伟华,陈晓风. 单机多目标攻击的目标威胁排序[J]. 电光与控制, 2006, 13(5): 16-17, 30. (LAN W H, CHEN X F. Target threat sequencing in single-aircraft multi-target combat[J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(5): 16-17, 30.)
- [11] 张涛,于雷,周中良,等. 基于人工势场启发粒子群算法的空战机动决策[J]. 电光与控制, 2013, 20(1): 77-82. (ZHANG T, YU L, ZHOU Z L, et al. Decision-making of air combat maneuvering based on APF and PSO[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(1): 77-82.)

欢迎关注新浪微博 @电光与控制