

无人机多侦察载荷协同侦察效能评估

张旺¹, 申洋², 陈伟¹

(1. 南昌航空大学飞行器工程学院, 南昌 330063; 2. 中国人民解放军空军装备部, 北京 100483)

摘要: 多侦察载荷协同侦察已经成为当前和未来无人侦察机主流工作方式。根据电子信号侦察设备、合成孔径雷达(SAR)和长焦距倾斜 CCD 相机 3 种机载侦察载荷的侦察特点, 分析了影响机载多侦察载荷协同侦察效能的因素和指标, 在各分项评估模型的基础上采用线性加权算法建立了无人机多侦察载荷的协同侦察效能模型。最后分别在不同强度的电子对抗环境下, 对以上 3 种机载侦察载荷两两协同的侦察效能进行了计算和分析, 验证了模型的可用性。

关键词: 无人机; 侦察载荷; 协同侦察效能; 效能评估

中图分类号: V243.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)03-0001-04

Assessment on Multi-Payload Collaborative Reconnaissance Effectiveness of UAVs

ZHANG Wang¹, SHEN Yang², CHEN Wei¹

(1. School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Equipment Department of Air Force of PLA, Beijing 100483, China)

Abstract: The multi-payload collaborative reconnaissance has become a main operating mode of Unmanned Reconnaissance Aerial Vehicles (URAV) at present and for the future. According to the features of three airborne reconnaissance payloads: electronic reconnaissance device, SAR and tilted CCD camera with long focal length, the factors and indicators that have effect on multi-payload collaborative reconnaissance effectiveness were analyzed, and the model of the multi-payload collaborative reconnaissance effectiveness of UAV was established by using linear weighted algorithm. Finally, the reconnaissance effectiveness of an UAV with combination of any two devices of the three kinds of payloads was calculated out and analyzed under different intensity of electronic countermeasures (ECM) environment, and the availability of the model was proved.

Key words: UAV; reconnaissance payload; collaborative reconnaissance effectiveness; effectiveness assessment

0 引言

在当今日趋复杂的战场环境下, 战场的侦察和反侦察手段日益繁多。海湾战争之前, 美军侦察机只装载有光电侦察传感器。在海湾战争经验教训的启发下, 美军启动了 3 项均装载侦察雷达的长航时无人侦察机研制计划。1995 年, 世界上首架装载合成孔径侦察雷达的长航时无人侦察机——“捕食者”投入实战使用。

面对电磁干扰、放置诱饵目标等各种反侦察手段, 运用单一的传感器对战场侦察已经很难达到侦察目的。因此, 世界各国都竞相研发和制造可携带多侦察载荷的无人机, 其中, 美国的战略无人侦察机“全球鹰”可携带光电、红外传感系统和合成孔径雷达(SAR), 并可在 1.8 万米高空飞行长达 24 小时。为适应现代战场变化, 获得最佳的作战效果, 我国也在大力研发可装载多侦察载荷的无人侦察机。

目前, 对于无人侦察机的单种侦察载荷的侦察效能评估已经有很多成熟的评估模型^[1-3], 而关于多种侦察载荷协同侦察效能的研究还较少。

电子信号侦察设备可以对电磁波进行捕获、识别, 在远距离、大范围内对电磁目标进行定位, 并具有一定的电磁战能力(实施电子干扰和电子防御)和机载警

收稿日期: 2013-05-03

修回日期: 2013-12-02

基金项目: 航空科学基金(2011ZA56001); 江西省研究生创新专项基金(YC2011-S096)

作者简介: 张旺(1989—), 男, 江西宜春人, 硕士生, 研究方向为航空装备效能评估。

戒功能,但定位精度不高;SAR既能对固定目标定位成像,也能对运动目标进行检测、跟踪和定位;CCD相机能够对目标进行检测、跟踪、定位和高分辨率成像,但作用距离十分有限。三者的各项侦察能力对比如表1所示。

表1 无人机各侦察载荷侦察能力对比表

Table 1 Reconnaissance capabilities of UAV's payloads

侦察设备	作用距离	最大搜索总方位角	发现目标概率	同时跟踪目标数量	定位精度	分辨率
SAR	中	中	中	中	高	中、高
CCD相机	短	小	低	少	中、高	高
电子信号侦察设备	长	大	高	多	低	低

本文的工作是研究电子信号侦察设备、SAR和CCD相机等侦察载荷在无人侦察机上两两协同工作时,能否在不同强度的电子对抗战场环境下有效进行协同侦察,并增强系统侦察效能,以此建立无人侦察机侦察载荷协同工作的侦察效能模型。

1 侦察效能评估模型

设在同一型号的无人侦察机上分别采用电子信号侦察设备和SAR、电子信号侦察设备和CCD相机以及SAR和CCD相机3种协同工作模式,在不同强度的电子对抗战场环境下执行同一侦察任务。

无人机侦察载荷协同侦察效能是根据线性加权算法对各分项性能之间进行线性加权组合得到的^[4]。此算法不仅体现了各分项性能的相对重要性,也便于分析参数之间的组合关系,而且方法简便、高效,可以方便地编写算法程序。

由于无人侦察机主要用于执行侦察任务,对侦察效能评估可选取与侦察以及飞机性能相关的4个主要项目来进行评价,包括侦察性能、生存性能、机动性能和基本性能^[5],可表示为

$$C = \omega_A \times \bar{A} + \omega_S \times \bar{e}_S + \omega_B \times \bar{B} + \omega_j \times \bar{e}_j \quad (1)$$

式中: \bar{A} 为侦察性能指标; \bar{e}_S 为生存性能指标; \bar{B} 为机动性能指标; \bar{e}_j 为基本性能指标; ω_A 、 ω_S 、 ω_B 、 ω_j 为各项性能参数的权重系数,分别为0.15、0.6、0.1、0.15。

运用此式首先要对各项性能参数进行归一化处理,处理后各分项数值都处在0和1之间,以此值作为该项指标的参数值,使分项性能之间数值匹配,具备一致性。进行归一化处理时,指标可以分为两类:一类是指标数值越大越优(如作用距离),应采用 $\bar{x} = x/x_0$ 进行处理,其中, \bar{x} 为归一化指标, x 为实际值, x_0 为特征值;另一类是指标数值越小越优(如分辨率),应采用 $\bar{x} = 1 - x/x_0$ 进行归一化处理。

1.1 侦察性能参数数学模型

当无人机侦察载荷两两协同工作时,设定侦察范围大、距离远的侦察载荷对目标区域进行前期侦察;并把侦察到的目标区域情况交付给进行后期侦察的侦察载荷。由此,前期侦察载荷的侦察结果会在一定程度上影响和改变后期侦察载荷的一些侦察能力参数值(如发现目标概率 P_{find} 、对目标的定位精度 Δ 等)。侦察性能参数 $\sum \bar{A}$ 可由协同侦察的两种侦察载荷的侦察性能指标与其相应的加权系数乘积之和求得

$$\sum \bar{A} = \omega_1 \times \bar{A}_1 + \omega_{12} \times \bar{A}_{12} \quad (2)$$

式中: \bar{A}_1 为前期侦察的无人机侦察载荷的侦察性能指标; \bar{A}_{12} 为后期侦察的无人机侦察载荷的侦察性能指标; ω_1 、 ω_{12} 为各项性能指标的加权系数,分别为0.2、0.8。

电子信号侦察设备、SAR和CCD相机的侦察性能参数分别在下文给出具体算法。

SAR侦察性能参数 A^{SAR} 包括电子对抗环境下SAR侦察效果的影响系数 ξ^{SAR} 、作用距离 R (单位为km, RCS为 2 m^2 的目标)、最大搜索总方位角 θ (单位为 $^\circ$)、发现目标概率 $P_{\text{find}}^{\text{SAR}}$ 、SAR体制衡量系数 K^{SAR} 、同时跟踪目标数量 m 、SAR对目标的定位精度 Δ^{SAR} (单位为m)和SAR的分辨率 ρ_s^{SAR} (单位为m)等。算式为

$$A^{\text{SAR}} = \xi^{\text{SAR}} \times \frac{R^2}{4} \times \frac{\theta}{360^\circ} \times P_{\text{find}}^{\text{SAR}} \times K^{\text{SAR}} \times \frac{m^{0.05}}{\Delta^{\text{SAR}} \times \rho_s^{\text{SAR}}} \quad (3)$$

式中: ξ^{SAR} 为电子对抗环境下SAR侦察效果的影响系数,在电子对抗环境下SAR和电子信号侦察设备的侦察效果易受影响,而对CCD的影响可以忽略不计; R 为作用距离; θ 为搜索方位角; K^{SAR} 为SAR的体制衡量系数,由于无人侦察机上配备高分辨率的侦察系统和具有先进处理能力的远程敌我识别系统, K^{SAR} 取为1; $P_{\text{find}}^{\text{SAR}}$ 为发现目标的概率。

为了对比不同机载侦察载荷的侦察效能,须规定一个“标准发现距离”,以此作为计算各机载侦察载荷发现目标概率的依据。设 D 为规定的SAR标准距离,SAR的最大发现距离为 D_0 。这样,在距离 D 的发现概率为

$$P_{\text{find}}^{\text{SAR}} = e^{(-0.1625D/D_0)} \quad (4)$$

式中, ρ_s^{SAR} 为SAR的分辨率。即

$$\rho_s^{\text{SAR}} = 0.5l \quad (5)$$

式中, l 为天线的方向孔径(单位为m)。

电子信号侦察设备侦察性能参数 A^{ERD} 包括电子对抗环境下电子信号侦察设备侦察效果的影响系数 ξ^{ERD} 、最大侦察距离 R (单位为km)、最大搜索总方位角 θ (单位为 $^\circ$)、发现目标概率 $P_{\text{find}}^{\text{ERD}}$ 、电子信号侦察设

备体制衡量系数 K^{ERD} 、同时跟踪目标数量 m 、电子信号侦察设备对目标的定位精度 Δ^{ERD} (单位为 m) 和电子信号侦察设备的分辨率 ρ_s^{ERD} (单位为 m) 等。算式为

$$A^{\text{ERD}} = \xi^{\text{ERD}} \times \frac{R^2}{4} \times \frac{\theta}{360^\circ} \times P_{\text{find}}^{\text{ERD}} \times K^{\text{ERD}} \times \frac{m^{0.05}}{\Delta^{\text{ERD}} \times \rho_s^{\text{ERD}}} \quad (6)$$

式中, K^{ERD} 为电子信号侦察设备体制衡量系数, 取值为 1。

电子信号侦察设备发现目标概率 $P_{\text{find}}^{\text{ERD}}$ 和分辨率 ρ_s^{ERD} 的算式与式(4)、式(5)一致。

CCD 相机侦察性能参数 A^{CCD} 包括最大侦察距离 R (单位为 km)、最大搜索总方位角 θ (单位为 $^\circ$)、发现目标概率 $P_{\text{find}}^{\text{CCD}}$ 、CCD 相机的体制衡量系数 K^{CCD} 、目标对比度 C_0 、同时跟踪目标数量 m 、CCD 相机对目标的定位精度 Δ^{CCD} (单位为 m) 和 CCD 相机的分辨率 ρ_s^{CCD} (单位为 m) 等。算式为

$$A^{\text{CCD}} = \frac{R^2}{4} \times \frac{\theta}{360^\circ} \times P_{\text{find}}^{\text{CCD}} \times K^{\text{CCD}} \times C_0 \times \frac{m^{0.05}}{\Delta^{\text{CCD}} \times \rho_s^{\text{CCD}}} \quad (7)$$

式中, K^{CCD} 为 CCD 相机的体制衡量系数, 取值为 1。

对于依靠反射光进行侦察的 CCD 相机, 对比度的定义为

$$C_0 = (B_t - B_b) / B_b \quad (8)$$

式中: C_0 为目标的对比度; B_t 为目标的亮度; B_b 为环境的亮度。

CCD 相机发现目标概率 $P_{\text{find}}^{\text{CCD}}$ 和分辨率 ρ_s^{CCD} 的计算式与式(4)、式(5)一致。

由引言可知, 在 3 种协同侦察工作模式中, 处于后期侦察的无人机侦察载荷有 SAR 和 CCD 相机。其各项侦察性能中的最大侦察距离 R 、最大搜索总方位角 θ 、体制衡量系数 K 、目标对比度 C_0 、同时跟踪目标数量 m 、分辨率 ρ_s 等各项性能指标为无人机侦察载荷的固有性能指标, 基本不受其他侦察载荷的影响; 而发现目标概率 P_{find} 和对目标的定位精度 Δ 等性能指标则受处于前期侦察的载荷的 P_{find}^1 、 Δ^1 和 m^1 等性能指标的影响。通过经验式(9)可以得到协同状态下, 处于后期侦察的无人机侦察载荷的 P_{find}^{12} 和 Δ^{12} 的性能指标数值。

$$\begin{pmatrix} P_{\text{find}}^{12} \\ \Delta^{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{\text{find}}^1 \\ \Delta^1 \\ m^1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \chi_{11} & \chi_{12} \\ \chi_{21} & \chi_{22} \\ \chi_{31} & \chi_{32} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{\text{find}}^2 \\ \Delta^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中: P_{find}^1 为进行前期侦察的载荷发现目标的概率; Δ^1 为进行前期侦察的载荷对目标的定位精度; m^1 为进行前期侦察的载荷同时跟踪目标数目; P_{find}^2 为进行后期侦察的载荷自身发现目标的概率; Δ^2 为进行后期侦察的载荷自身对目标的定位精度; P_{find}^{12} 为协同运用时进行后期侦察的载荷发现目标的概率; Δ^{12} 为协同运用时进行后期侦察的载荷对目标的定位精度; χ_{11} 、 χ_{12} 、 χ_{21} 、 χ_{22} 、

χ_{31} 、 χ_{32} 为侦察性能参数影响因子。

将得出的 P_{find}^{12} 和 Δ^{12} 的性能指标数值代入到进行后期侦察的无人机侦察载荷 SAR 和 CCD 相机的侦察性能参数数学模型中, 再运用归一法求得 \bar{A}_{12} 。

在电子信号侦察设备和 SAR 协同的侦察模式下, 将 \bar{A}_1^{ERD} 和 $\bar{A}_{12}^{\text{SAR}}$ 代入式(2) 可得到二者协同侦察时的侦察性能参数 $\sum \bar{A}^{\text{ERD/SAR}}$; 在电子信号侦察设备和 CCD 相机协同的侦察模式下, 将 \bar{A}_1^{ERD} 和 $\bar{A}_{12}^{\text{CCD}}$ 代入式(2) 可得到二者协同侦察时的侦察性能参数 $\sum \bar{A}^{\text{ERD/CCD}}$; 在 SAR 和 CCD 相机协同的侦察模式下, 将 \bar{A}_1^{SAR} 和 $\bar{A}_{12}^{\text{CCD}}$ 代入式(2) 可得到二者协同侦察时的侦察性能参数 $\sum \bar{A}^{\text{SAR/CCD}}$ 。

1.2 其他性能参数数学模型

无人侦察机生存性能参数 ε_s 可用雷达反射截面 S_{RCS} 、电子对抗性能参数 ε_e (当无人机运用电子信号侦察设备进行侦察时, 电子对抗能力将得到一定的增强) 和无人侦察机的几何尺寸作为主要代表因素。计算模型为

$$\varepsilon_s = \omega_{s1} \times \varepsilon_e \times (5/S_{\text{RCS}})^{0.25} + \omega_{s2} \times (S \times L_{\text{all}})^{-1} \quad (10)$$

式中: S_{RCS} 为迎头或尾后方位 120° 左右之内的对应 3 cm 波长雷达的平均值 (单位为 m^2); S 为机翼面积 (单位为 m^2); L_{all} 为无人侦察机全长 (不含空速管的长度, 单位为 m); ω_{s1} 、 ω_{s2} 为对应的加权系数。

机动性能参数 B 用无人侦察机最大允许过载、最大盘旋过载和最大单位重量剩余功率求得。算式为

$$B = \bar{\varepsilon}_c \times (\omega_{B1} \times \bar{n}_{y\text{max}} + \omega_{B2} \times \bar{n}_{y\text{pan}} + \omega_{B3} \times \overline{P_{\text{SEP}}} \times 3/30) \quad (11)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_c$ 为操纵性能指标, 操纵性能参数 ε_c 与无人侦察机操纵系统及显示装置等因素有关; $\bar{n}_{y\text{max}}$ 为最大法向过载指标; $\bar{n}_{y\text{pan}}$ 为最大盘旋过载指标; $\overline{P_{\text{SEP}}}$ 为单位重力剩余功率; ω_{B1} 、 ω_{B2} 、 ω_{B3} 为对应的加权系数。

基本性能参数 ε_j 用飞机巡航速度、实用升限和最大续航时间求得。算式为

$$\varepsilon_j = \left(\frac{V_{\text{cruise}}}{V_0} \times \frac{H}{H_0} \times \frac{T_{\text{max}}}{T_0} \right)^{1/3} \quad (12)$$

式中: V_{cruise} 为巡航速度 (单位为 km/h); H 为飞机实用升限 (单位为 km); T_{max} 为最大续航时间 (单位为 h); V_0 、 H_0 、 T_0 分别代表典型高空长航时无人机的巡航速度、升限、最大续航时间, 通常为 600 km/h、18 km、40 h。

2 算例

本文对无人侦察机 3 种机载侦察载荷配套使用方案的各分项性能和侦察效能进行计算、对比分析。

方案 A 为电子信号侦察设备和 SAR 的协同使用; 方案 B 为电子信号侦察设备和 CCD 相机的协同使用;

方案 C 为 SAR 和 CCD 相机的协同使用。

基于以上思想和方法,在无电子对抗环境,即 $\xi = 1.0$ 时,对 3 种方案进行评估,其各分项性能和侦察效能的计算结果对比如表 2 所示。

表 2 侦察效能对比

Table 2 Reconnaissance effectiveness

方案	$\bar{\varepsilon}_s$	$\sum \bar{A}$	\bar{B}	ε_j	C
A	0.7989	0.7257	0.5633	0.6187	0.7044
B	0.7989	0.5832	0.5633	0.6187	0.6189
C	0.7451	0.7576	0.5633	0.6187	0.7235

当无人侦察机处于电子对抗环境中时,电子信号侦察设备和 SAR 的侦察性能都受到了影响。为表示电子对抗环境下对机载设备侦察效果影响的强弱,分别取 ξ 为 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0,对 3 种方案的侦察效能进行计算,其侦察效能的计算结果对比如表 3 和图 1 所示。

表 3 电子对抗环境下侦察效能对比

Table 3 Reconnaissance effectiveness under ECM environment

方案	ξ						
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
A	0.4831	0.5266	0.5702	0.6137	0.6572	0.7008	0.7044
B	0.5559	0.5669	0.5769	0.5874	0.5979	0.6084	0.6189
C	0.5618	0.5991	0.6364	0.6636	0.6909	0.7182	0.7235

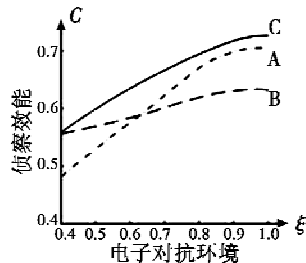


图 1 电子对抗环境下的侦察效能

Fig.1 Reconnaissance effectiveness under ECM environment

从表 2 的评估结果可以看出,在 $\xi = 1.0$ 时,方案 C 的 SAR 和 CCD 相机的协同侦察效能最优,虽然方案中没有使用电子信号侦察设备,使其生存性能低于其他两种方案,但两种载荷的侦察距离有利于协同侦察,而且定位精度和分辨率都很高,因此其协同侦察效能最优;方案 A 的电子信号侦察设备和 SAR 协同侦察时,二者的侦察距离也有利于协同侦察,前者可对目标进行粗略定位,后者再进行精确侦察,因此其协同侦察效能次之;而方案 B 的电子信号侦察设备和 CCD 相机协同侦察时,前者虽然侦察距离远,但定位精度差,而 CCD 相机只能在小范围内进行高分辨率成像,不利于协同侦察,因此其协同侦察效能最低。

由表 3 和图 1 可知,在电子对抗环境下,各方案的

侦察效能随着影响系数变小而变小,尤其在电子信号侦察设备和 SAR 协同的方案 A 中,由于协同的两种机载载荷受到电子干扰后,二者的侦察能力都会受到影响,所以方案 A 的侦察效能在电子对抗环境下受到的影响最大。同时可以得到,方案 C 的协同侦察效能最优。

3 结论

本文建立的侦察效能评估模型综合了无人机各侦察载荷的相互影响以及电子对抗环境因素影响,并运用该模型对无人机侦察载荷在不同强度的电子对抗环境中的两两协同的侦察效能进行了计算分析。结果显示,SAR 与 CCD 相机协同侦察在不同强度的电子对抗环境下侦察效能均为最优,该结果符合侦察作战规律。本文提供了合理构建多传感器协同侦察效能评估的思想和模型,具体计算还需在该建模思想的基础上,综合考虑具体可获得的数据情况,并结合参数敏感性分析以及课题任务等因素合理调整具体的计算模型。

参考文献

- [1] 汪民乐,高晓光,蔡付东. 作战飞机效能分析研究综述[J]. 飞行力学,2001,19(4):1-5.
WANG M L, GAO X G, CAI F D. Overview of research on military aircraft combat effectiveness analysis [J]. Flight Dynamics, 2001, 19(4):1-5.
- [2] 吕峰,王卫华,黄德所. 侦察无人机作战效能评估准则研究[J]. 指挥控制与仿真,2007,29(3):78-80.
LÜ F, WANG W H, HUANG D S. Estimating the criterion of operation efficiency for unmanned reconnaissance aerial vehicle [J]. Command Control & Simulation, 2007, 29(3):78-80.
- [3] MOITRA A, MATTHEYSES R M, DIDOMIZIO V A, et al. The multi-vehicle reconnaissance route and sensor planning [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3):799-812.
- [4] 董彦非,王礼沅,张恒喜. 战斗机空战效能评估的综合指数模型[J]. 航空学报,2006,27(6):1084-1087.
DONG Y F, WANG L Y, ZHANG H X. Synthesized index model for fighter plane air combat effectiveness assessment [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6):1084-1087.
- [5] 朱宝珊,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京:航空工业出版社,1993.
ZHU B L, ZHU R C, XIONG X F. Fighter plane effectiveness assessment [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993.