

照射箔条复合干扰对抗空空雷达主动弹方法

孟跃宇¹, 吴华¹, 索中英², 王鑫¹

(1.空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安,710038;2.空军工程大学理学院,陕西西安,710051)

摘要 照射箔条复合干扰相比传统无源箔条干扰可提高战机自卫干扰能力,提高战场生存能力。为研究照射箔条复合干扰对空空雷达主动弹的干扰效果和战术使用策略,在一种典型空战对抗态势基础上,从速度干扰条件出发,对照射箔条复合干扰相对传统箔条干扰在频率特性上的优势进行了理论分析。在此基础上,提出在对抗空空雷达主动弹中,通过对转发干扰信号进行频率调制,并与载机机动配合的方法,增强复合干扰对雷达导引头的速度欺骗干扰效果。仿真结果表明:该方法可以起到良好的速度干扰效果,该方法具有较强的实践指导意义。

关键词 复合干扰;箔条干扰;空空雷达主动弹;速度欺骗干扰;频率调制

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.03.005

中图分类号 TN97 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)03-0020-04

A Study of Compound Jamming in Counter Active Radar AAM Based on Radiating on Chaff

MENG Yue-yu¹, WU Hua¹, SUO Zhong-ying², WANG Xin¹

(1.Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2.Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Compared to the traditional passive chaff jamming, the radiating on chaff compound jamming can enhance ability of self-defense and survival capability of fighters in battlefield. In order to study the jamming effectiveness and strategy of radiating on chaff compound jamming in countering active radar AAM, by using a typical air battle situation model, this paper, based on velocity deception condition, analyzes the advantages of compound jamming over the traditional passive chaff jamming in countering active radar AAM in frequency. The paper proposes a method of frequency modulation in cooperation with fighter's motion to greatly enhance the efficiency of compound jamming velocity deception on active radar seeker. The simulation results show that this method is efficient in velocity deception jamming, the effectiveness of this method is verified, and has a guiding role in practical air battle.

Key words: compound jamming; chaff jamming; active radar AAM; velocity deception jamming; frequency modulation

收稿日期:2013-11-26

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2012JQ8019)

作者简介:孟跃宇(1990-),男,陕西长安人,硕士生,主要从事电子对抗理论与技术研究。E-mail: menggy1990@163.com

引用格式:孟跃宇,吴华,索中英,等.照射箔条复合干扰对抗空空雷达主动弹方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(3):20-23. MENG Yueyu, WU Hua, SUO Zhongyi, et al. A study of compound jamming in counter active radar AAM based on radiating on chaff[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(3): 20-23.

空空雷达主动弹是现代空战中战机面临的主要威胁之一,箔条是与之对抗的一种重要而有效的电子对抗手段^[1]。虽然箔条能够起到质心干扰的作用,可以有效对抗传统体制雷达^[2,3],但是对具有速度检测和跟踪功能的PD雷达,箔条自身运动特性不强,PD雷达导引头从速度上分离出干扰信号^[4,5],保持对目标的正常跟踪,使干扰效果大大降低。照射箔条复合干扰的提出使箔条对抗PD雷达的能力有了质的改善。文献[6]提出有源干扰和箔条干扰配合使用以提高机载自卫干扰的效果。文献[7]指出采用有源照射箔条复合干扰能将箔条云回波信号功率提高几十倍甚至几百倍。文献[8]分析了不同条件下目标回波、箔条回波、箔条转发干扰回波频率特性随时间的变化。文献[9]对无源和有源照射几种不同的干扰组合进行比较,给出了复合干扰的使用原则。

上述文献主要从理论上分析复合干扰对机载雷达的干扰效果,但在对抗空空雷达主动弹时,战情紧迫、环境复杂、导弹机动性强,需要综合分析载机战术机动和干扰策略。本文在一种典型对抗态势基础上,从频域上研究分析对抗空空雷达主动弹复合干扰的干扰效果和载机应采取的最佳干扰策略与机动方式。

1 箔条无源干扰

1.1 无源干扰数学模型

载机投放箔条对抗来袭空空雷达主动弹的态势见图1。

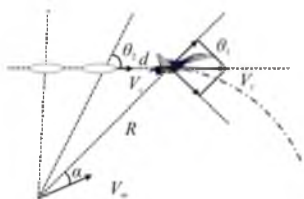


图1 空战对抗示意图

Fig.1 Diagram of air battle

式中: V_c 为载机的速度; V_m 为导弹的速度; V_d 为箔条的速度(约等于风速); α 为导弹对目标的前置角; θ_1 为载机运动的前置角; θ_2 为箔条运动的前置角。因为导引头测量的是目标的相对径向速度,所以载机相对导弹的径向速度为:

$$V_{mz} = V_m \cos \alpha - V_c \cos \theta_1 \quad (1)$$

载机回波相对导弹的多普勒频率为:

$$f_1 = 2V_{mz} / \lambda = 2(V_m \cos \alpha - V_c \cos \theta_1) / \lambda \quad (2)$$

箔条回波相对导弹的多普勒频率为:

$$f_2 = 2V_{mz} / \lambda = 2(V_m \cos(\alpha + \theta_2 - \theta_1) - V_c \cos \theta_2) / \lambda \quad (3)$$

箔条和载机回波相对导弹的多普勒频率差^[8]记为 $\delta f = f_1 - f_2$,则 δf_1 为:

$$\delta f = f_1 - f_2 = 2(V_m [\cos \alpha - \cos(\alpha + \theta_2 - \theta_1)] - V_c \cos \theta_1 + V_c \cos \theta_2) / \lambda \quad (4)$$

载机应选择最佳运动前置角 θ_1 ,使得 δf 最小,从而使雷达导引头不易从速度上分辨出目标,达到最好的干扰效果^[10]。

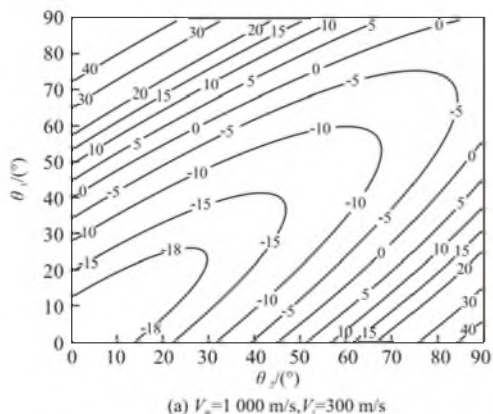
若忽略风速影响,令 $\delta f_1 = 0$,得:

$$V_m [\cos \alpha - \cos(\alpha + \theta_2 - \theta_1)] = V_c \cos \theta_1 \quad (5)$$

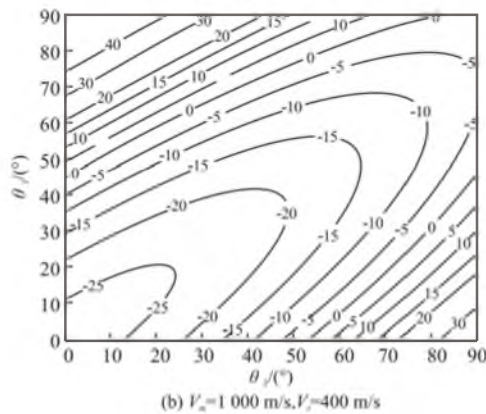
由式(5)可得 θ_1 的取值。

1.2 无源干扰效果分析

当导弹处于尾后攻击时,取 $V_c = 300$ m/s,导弹速度1 000 m/s, δf_1 随 θ_1, θ_2 变化关系见图2。



(a) $V_c=1\ 000$ m/s, $V_m=300$ m/s



(b) $V_c=1\ 000$ m/s, $V_m=400$ m/s

图2 无源干扰时 δf_1 与 θ_1, θ_2 关系

Fig.2 Relationship between δf_1 and θ_1, θ_2 in passive jamming

由于箔条向后投放,必有 $\theta_1 < \theta_2$,因此只考虑图2(a)右下半边的情况。当载机打出箔条的时刻, $\theta_1 \approx \theta_2$ 且略小于 θ_2 , δf_1 取值在-5 kHz以下,最低可达-20 kHz,箔条基本上无法在速度上掩护载机。随着 θ_1 减小和 θ_2 逐渐增大, δf_1 随之增大,最终出现 δf_1 为0的情况。但是此时 $\theta_2 \in (45^\circ \sim 90^\circ)$, $\theta_1 \in (0^\circ \sim 55^\circ)$, $\theta_2 - \theta_1 \approx 40^\circ$,实际上载机很难在短时间有如此大的机动,使导弹攻击角满足 δf_1 为0。

由图2(b)可见, δf_1 随 V_i 的增大而减小, 若载机加速到 400 m/s, θ_1 最佳取值范围减小到 ($0^\circ \sim 43^\circ$) 之间, 干扰效果更为不利。所以说采用无源干扰, 箔条无法有效进行速度欺骗。

2 照射箔条复合干扰

2.1 复合干扰数学模型

照射箔条复合干扰中, 载机将接收到的雷达信号转发放大后, 照射到箔条上, 经过箔条云二次散射, 被导引头接收^[7]。导引头接收到的信号被附加了新的频率调制信息, 因而能够对导引头形成速度干扰^[9]。下面对这种情况下的速度干扰效果进行具体分析。

载机直接接收到导引头信号的多普勒频率为:

$$f_m = V_m / \lambda = (V_m \cos \alpha - V_i \cos \theta_1) / \lambda \quad (6)$$

载机相对于箔条的速度为 $V_a = V_c - V_i$, 对应的多普勒频率为 $f_a = V_a / \lambda = (V_c - V_i) / \lambda$

箔条相对导弹运动产生的多普勒频率为:

$$f_{mc} = V_{mc} / \lambda = (V_m \cos(\alpha + \theta_2 - \theta_1) - V_c \cos \theta_2) / \lambda \quad (7)$$

得到复合干扰信号的多普勒频率为:

$$f_3 = f_m + f_a + f_{mc} = [V_m(\cos \alpha + \cos(\alpha + \theta_2 - \theta_1) - \theta_1) - V_i(1 + \cos \theta_1) + V_c(1 - \cos \theta_2)] / \lambda \quad (8)$$

比较无源干扰回波多普勒频率 f_2 可以发现, 复合干扰情况下 f_3 出现了新的频率组成部分 f_a 。由于复合干扰经过放大转发, 干扰信号能量远大于目标回波信号^[7], 干扰的功率条件完全可以保证。此时干扰信号与目标回波的多普勒频率差为:

$$\delta f_2 = f_1 - f_3 = [V_m(\cos \alpha - \cos(\alpha + \theta_2 - \theta_1)) - V_i(\cos \theta_1 - 1) + V_c(\cos \theta_2 - 1)] / \lambda \quad (9)$$

如果在转发干扰信号中增加调制频率 f_J ^[11], 此时复合干扰信号多普勒频率为^[12]:

$$f_4 = f_3 + f_J = f_m + f_a + f_{mc} + f_J \quad (10)$$

此时的多普勒频率差为:

$$\delta f_3 = f_1 - f_4 = f_1 - f_3 - f_J \quad (11)$$

式(11)表明, 可以通过实时计算 δf_3 的值, 改变调制频率 f_J 使 δf_3 保持在一个滤波器带宽之内, 从而实现速度干扰。但实际中很难准确得到各角度值, 可以利用初始时刻的参数, 把此计算结果作为固定调制频率值。

2.2 复合干扰效果

同样当导弹处于尾后攻击时, 取载机速度 300 m/s, 导弹速度 1 000 m/s, 作出 δf 与 θ_1, θ_2 变化关系见图 3。

对比图 2 可见, 复合干扰信号与目标回波的多普勒频率差发生了变化。在载机打出箔条的时刻,

即 $\theta_1 \approx \theta_2$ 时, 干扰信号与目标回波的频率差更接近于 0, 箔条掩护效果明显改善。

载机打出箔条的时刻 δf_2 与攻击角 θ_2 之间的关系如图 4 所示, 此时, 复合干扰在更大的态势范围下效果好于无源干扰。并且在载机以 400 m/s 加速逃离中造成 δf_2 的增大, 复合干扰效果下降程度小于无源干扰。但是载机机动过程会使 θ_2 增大, 复合干扰的速度干扰效果依然有限。

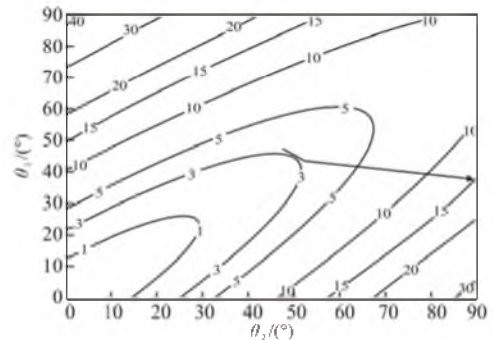


图 3 复合干扰时 δf_2 与 θ_1, θ_2 关系

Fig.2 Relationship between δf_2 and θ_1, θ_2 in compound jamming

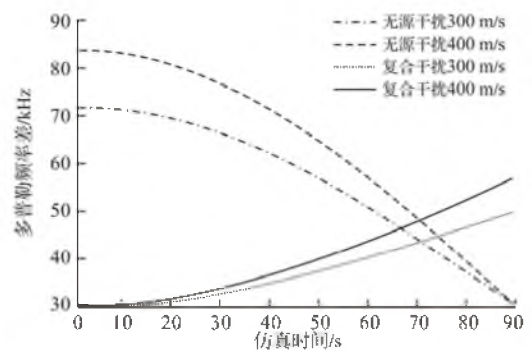


图 4 初始时刻时 δf 与 θ_2 关系

Fig.2 Relationship between δf and θ_2 at prime time

3 仿真实例

本文仿真情景设置如下: 导弹对载机保持正常跟踪, 以比例导引进行尾后攻击, 导引率 $K=3$ 。导弹初始坐标 (0, 0), 飞行速度 1 000 m/s; 载机初始坐标 (7 000, 7 000), 投放箔条后以速度 400 m/s 沿原机动方向逃离, 同时释放箔条, 计算各干扰样式对导引头干扰效果。

仿真过程中 θ_1, θ_2 变化情况见图 5, 对应图 3 中用箭头指向表示。初始值 $\theta_2 = 45^\circ$, 可见导弹逼近时, θ_2 快速增大, θ_1 略有减小。 θ_1, θ_2 的变化造成 δf 的增大, 不同干扰样式下 δf 的变化情况见图 6。无源干扰的 δf 波动幅度最大, 从频率上无法做到掩护载机的作用; 复合干扰的 δf 减少很大, 但是最小值仅为 5 kHz, 大于导弹速度分辨率, 干扰效果不

足;固定调制频率的干扰信号,在6 s之内, δf 近乎为0,逼近理想干扰效果。仿真数据表明,在6 s时, $\theta_2 - \theta_1 \approx 20^\circ$,空间上箔条已脱离导弹波束范围,6 s之后的结果不用再进行考虑^[13]。仿真情景中导弹保持对载机正常跟踪,如果箔条对导引头的诱骗有效,采用复合干扰将会起到更好的干扰效果。

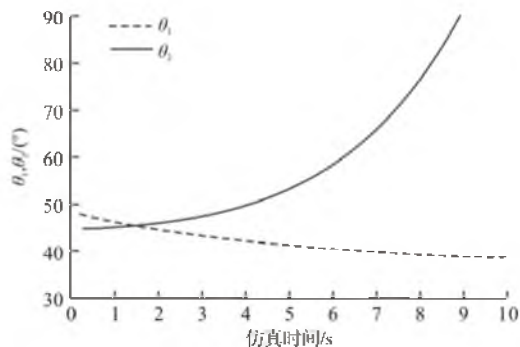


图5 仿真中角度变化情况

Fig.5 Angle variety in simulation

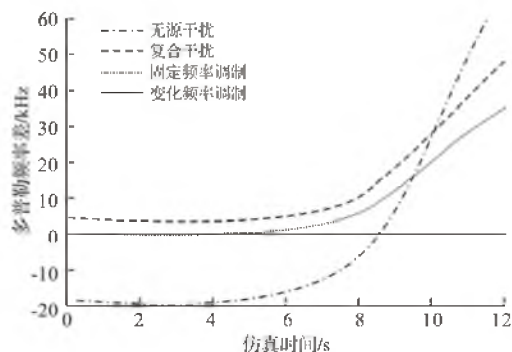


图6 仿真中 δf 变化情况

Fig.6 δf variety in simulation

4 结语

采用有源照射复合干扰,可对空空雷达主动弹产生有效对抗效果。本文中分析计算均以尾后攻击为例,另外笔者对迎头攻击情况进行研究,依然可以得到满意的干扰效果。复合干扰方案对各个方向来袭导弹均可发挥很好的速度干扰效果。在实际作战使用中,可以依据本文所提出的干扰方案,选择合适的干扰调制频率,对抗空空雷达主动弹的攻击,获得最佳干扰效果。

参考文献(References):

- [1] 陈静. 雷达无源干扰原理[M]. 北京:国防工业出版社,2009. CHEN Jing. Principles of radar passive jamming [M]. Beijing: National defense industry press,2009. (in Chinese)
- [2] Skolnik Merrill I著.雷达系统导论[M]. 3版,左声群,译.北京:电子工业出版社,2007. Skolnik Merrill I. Introduction to radar systems [M].3rd ed. ZUO Shengqun translate, Beijing: Publishing house of electronics industry,2007. (in Chinese)
- [3] Marcus S W. Dynamics and radar cross section density of chaff clouds[J]. IEEE transon AES,2004,40(1):932102.
- [4] 孙伟通,姜峰. 无源干扰走廊研究[J]. 光电技术应用,2005,20(6): 28-31. SUN Weitong, JIANG Feng. Research on jamming corridor [J]. Electro-optic technology application,2005,20(6): 28-31. (in Chinese)
- [5] Vakin S A, Shustov L N, Dunwell R H. 电子战基本原理[M]. 吴汉平,译. 北京: 电子工业出版社,2004. Vakin S A, Shustov L N, Dunwell R H. Fundamentals of electronic warfare [M]. WU Hanping translate, Beijing: Publishing house of electronics industry, 2004. (in Chinese)
- [6] 唐政,高晓光,张莹. 利用有源干扰提高箔条干扰效果的方法[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(6): 1043-1045. TANG Zheng, GAO Xiaoguang, ZHANG Ying. Method of improving chaff-interference by the active jamming[J]. Systems engineering and electronics,2008,30(6): 1043-1045. (in Chinese)
- [7] 李洋,吴华,王红卫,等. 一种高效的有源照射箔条云复合干扰方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(4): 39-43. LI Yang, WU Hua, WANG Hongwei, et al. An effective compound jamming method nased on radiation on chaff cloud [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition,2011,12(4): 39-43. (in Chinese)
- [8] 王洪迅,王星,宋强,等. 机载有源无源复合干扰的本征多普勒频率分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2013, 11(2): 239-244. WANG Hongxun, WANG Xing, SONG Qiang, et al. Native doppler frequency feature of aero-active-passive-complex electronic counter-measures[J]. Journal of terahertz science and electronic information technology,2013,11(2): 239-244. (in Chinese)
- [9] 王洪迅,卢楠,王红卫,等. 有源无源复合干扰机理与效能分析[J]. 火力与指挥控制,2012,37(6): 43-46. WANG Hongxun, LU Nan, WANG Hongwei, et al. Analysis of mechanism and efficiency of active-passive-complex ECM [J]. Fire control & command control,2012,37(6): 43-46. (in Chinese)
- [10] Peyton Z, Peebles J R. Bistatic radar cross sections of chaff [J]. IEEE transaction on aerospace and electronic system, 2004,20(2): 128-140.
- [11] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京: 国防工业出版社,2008. WANG Xing. Airborne countermeasure counter measure theory[M]. Beijing: National defense industry press,2008. (in Chinese)
- [12] Knott E F, Lewinski D J, Hunt S D. Chaff theoretical/analytical characterization and validation program[R]. ADA105893, 2003.
- [13] 才干. 机载无源干扰技术应用的研究[D]. 西安:西北工业大学,2007. CAI Gan, Research on the Application of airborn passive jamming tactics [D]. Xi'an: Northwestern polytechnical university,2007. (in Chinese)

(编辑:徐敏)