

文章编号:1001-893X(2012)10-1591-05

考虑频率特性的无源 JSR 修正^{*}

王洪迅,王 星,王红卫

(空军工程大学 工程学院,西安 710038)

摘 要:在导弹雷达导引头中已广泛采用匹配滤波技术提高信噪比,但在飞机利用箔条干扰进行末端防卫的过程中,传统分析认为无源干扰信号比(JSR)能够维持不变,这已不符合当前实际。通过分析目标和箔条回波信号频率特性,以及研究经过匹配滤波器后的目标和箔条信号功率,对无源 JSR 进行了修正。最后建立了一种典型飞机自卫模型,进行了对比仿真,结果表明修正后的 JSR 可描述箔条干扰的实际效果,飞机必须通过连续且密集地投放箔条弹,才能维持箔条的干扰。

关键词:导弹雷达导引头;末端防卫;无源干扰;干扰信号比;匹配滤波

中图分类号:TN971 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2012.10.007

Passive JSR Modification Combined with Frequency Characters

WANG Hong-xun, WANG Xing, WANG Hong-wei

(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Matching filter technique has been adopted by missiles' homing radar to improve the SNR (Signal-Noise-Ratio). The traditional concept took it for granted that the JSR (Jamming-to-Signal Ratio) would be kept unchanging in course of fighter's end self-protection by launching chaff ammos, which was not abreast of the times obviously. So the JSR is modified in this paper by analysing target and chaff echos' frequency characters and researching on the both echos' power characters after matching filter. Finally, a contrastive simulation is made according to a typical missile-attacking-fighter model and the result shows that the modified JSR is apt to describe the real chaff jamming efficiency, and the fighter must launch chaff ammos thickly and fastly to keep the chaff jamming.

Key words: missile homing radar; end self-protection; passive jamming; jamming-to-signal ratio; matching filter

1 引 言

箔条干扰是载机应对来袭导弹自卫手段之一,对于保护载机免受雷达制导导弹的打击具有重要意义。无论是三代机,还是三代半,甚至四代机,均装备箔条投放设备用于末端防护;尤其是四代典型战机 F-22,其所装备箔条弹的数量不仅没有减少,反而有所增加。这说明箔条干扰仍然是当前高价值航

空作战平台自卫的重要手段之一。

传统上箔条干扰效果的分析依据是干扰信号比(Jamming-to-Signal Ratio, JSR)^[1-2]。JSR 是雷达、电子战中很重要概念之一,在对箔条干扰性能、雷达抗干扰性能的衡量中有着重要的作用。然而,随着技术的发展,导弹雷达导引头已经根据干扰和目标的频域特征来鉴别目标,使得箔条干扰效能降低,无论是理论上还是实际中均已得到证明。为解释箔条干

^{*} 收稿日期:2012-03-12;修回日期:2012-07-30

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2012JQ8019);陕西省电子信息系统综合重点实验室基金资助项目(201113Y01)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Shaanxi Province(2012JQ8019); Electronic Information System Integrated Key Lab of Shaanxi Province(201113Y01)

扰效能的降低,文献[3]提出“切割效应”对箔条质心干扰有影响,虽与应用密切相关,但并未从频域展开说明;文献[4-5]中体现出箔条与目标回波信号频域特性的明显不同。这表明传统 JSR 分析已不适合当前的应用实际。本文从干扰信号的频域特性出发,提出了一种对 JSR 的修正方式,并根据修正的 JSR 对箔条自卫干扰重新进行探讨。

2 无源干扰传统分析

2.1 无源干扰典型态势

为便于比较,本节以脉冲主动雷达导引头为例,在一个典型的攻防态势下展开 JSR 分析。

图 1 所示为一种典型的战斗机投放箔条进行自卫的态势,目标机 T 的雷达告警器探测并识别出攻击导弹 M 主动脉冲雷达导引头辐射的电磁信号后,立刻发射箔条弹,形成箔条诱饵 C 对雷达 M 进行干扰,从而达到保护 T 的目的。

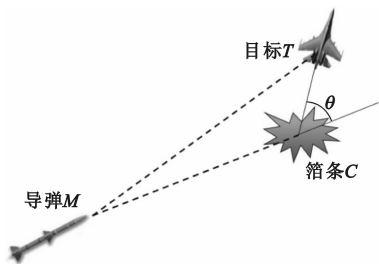


图 1 典型自卫箔条干扰态势

Fig. 1 Typical self-protection situation by chaff bomb

2.2 对 JSR 的传统分析

由文献[6,8]可知,对于雷达 M ,当目标 T 投放箔条 C 后,其收到目标 T 的回波功率为

$$P_T = \frac{P_R G_R^2 \lambda^2 \sigma_T}{(4\pi)^3 R_{TR}^4} \tag{1}$$

箔条 C 的回波功率为

$$P'_C = \frac{P_R G_R^2 \lambda^2 \sigma_C}{(4\pi)^3 R_{CR}^4} \tag{2}$$

根据文献[1-2],传统上 JSR 的定义为干扰信号和目标信号的功率比值。则箔条干扰中无源 JSR 的定义如公式(3)所示:

$$JSR' = P'_C / P_T \tag{3}$$

将公式(1)、(2)代入式(3)并化简可得

$$JSR' = (\sigma_C R_{TR}^4) / (\sigma_T R_{CR}^4) \tag{4}$$

对于箔条干扰一般情况下认为 $R_{CR} \approx R_{TR}$,故:

$$JSR' \approx \sigma_C / \sigma_T \tag{5}$$

公式(1)~(5)中, P_R 为雷达 M 的辐射功率, G_R 为其天线增益, σ_T 为目标截面积, R_{TR} 、 R_{CR} 分别为目标、箔条到雷达的距离, σ_C 为箔条诱饵 C 有效截面积。

2.3 传统分析的局限

公式(5)非常简洁,在指导箔条诱饵的研制生产、战术应用中发挥了极大的作用^[2,7]。然而,由文献[6,8]可知,雷达导引头早已经根据回波信号的频率特性来鉴别目标,但公式(3)仍然仅从回波信号所有功率的角度出发进行考察,无论是从理论分析还是从应用实践,所得结果已不能适用于根据信号频谱特性区分干扰和目标的雷达。

3 目标信号的频谱特性

显然目标回波信号的频谱特性与雷达导引头辐射信号的频谱特性相同。雷达导引头为了达到不同的检测目的,其辐射的信号频谱也不尽相同^[6],本文为了便于分析为了进行分析,以最为常见的单载频脉冲雷达信号为例进行研究。

3.1 雷达辐射信号

单载频脉冲雷达信号的时域表示如公式(6)所示:

$$\begin{cases} s(t) = A_0(t) \cos \omega_0 t \\ A_0(t) = \begin{cases} A, 0 \leq t \leq \tau \\ 0, \text{其他} \end{cases} \end{cases} \tag{6}$$

由于多数雷达导引头在单个脉冲间隔内检测信号,因此仅需考虑单脉冲雷达信号的频谱,在这种情况下雷达辐射信号的频谱如公式(7)所示:

$$S(\omega) = \frac{A\tau_0}{2} \text{sinc} \left[\frac{(\omega - \omega_0)\tau_0}{2} \right] \tag{7}$$

由 Parseval 定理可知:

$$P_R = \int_0^\tau |s(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega)|^2 d\omega \tag{8}$$

3.2 飞机回波信号

由文献[8]可知,首先由于飞机和导弹的运动,飞机回波信号有多普勒频移,如公式(9)所示:

$$\begin{cases} \omega_{TM}(t) = 2[\omega_T(t) + \omega_M(t)] \\ \omega_T(t) = 2\pi \cdot \vec{v}_T(t) / \lambda_M \\ \omega_M(t) = 2\pi \cdot \vec{v}_M(t) / \lambda_M \end{cases} \tag{9}$$

则目标回波信号的频谱为

$$S_T(\omega) = S(\omega - \omega_{TM}) \tag{10}$$

对比公式(1)和(8),可知目标回波信号的频谱

表示方式为

$$P_T = \frac{G_R^2 \lambda^2 \sigma_T}{(4\pi)^4 R_{TR}^4} \int_{-\infty}^{+\infty} |S_T(\omega)|^2 d\omega \quad (11)$$

公式(6)~(11)中, $A_0(t)$ 为脉冲调幅函数, T_A 为脉冲调幅函数的周期(PRI), τ 为脉冲宽度(PW), q 为占空比($\tau \cdot q = T_A$), A 为幅度, $\vec{v}_T$ 和 $\vec{v}_M$ 分别为目标飞机和攻击导弹在其两者连线上的投影。

4 箔条信号的频谱特性

由于箔条诱饵的回波信号是由大量箔条杂乱反射所形成的,因此箔条信号的频谱相当复杂,概括而言,其频谱特性与三个方面有关,其一是雷达信号,其二是其干扰频带,其三是其杂乱运动。其中后两者是箔条自身所具有的特性。

4.1 箔条的干扰频带

为了得到大的有效反射面积,箔条弹的箔条通常采用半波长箔条振子,半波长箔条的干扰频带为中心频率的(15~20)%;且箔条的长径比越大,其干扰频带越窄^[7]。若雷达导引头载频为15 GHz,按10%计算,其干扰频带约为1.5 GHz,这个绝对数值实际上是相当宽的,故分析中不考虑该因素的影响。

4.2 箔条的频谱响应

在战机自卫情况下,箔条的频谱响应特性相当复杂^[10],为便于分析,采用简化方式来研究箔条的频谱响应。由于

$$\sigma_C = \sum_{i=1}^N \sigma_{Ci} \quad (12)$$

$$\omega_{Ci} = 4\pi \cdot [\vec{v}_{Ci}(t) + \vec{v}_M(t)] / \lambda_M \quad (13)$$

因此在归一化的意义上,

$$\bar{\omega}_{CM} = 4\pi \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{Ci}}{\sigma_C} \cdot \frac{\vec{v}_{Ci}(t) + \vec{v}_M(t)}{\lambda_M} \quad (14)$$

化简可得

$$\bar{\omega}_{CM} = 4\pi \cdot \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{Ci} \vec{v}_{Ci}(t)}{\sigma_C \lambda_M} + 2\omega_M(t) \quad (15)$$

一般情况下箔条回波频谱被认为是高斯谱^[7],那么确定其频谱中心频率 ω_{CM} 和频谱宽度 σ_{ω_C} ,即可确定箔条回波频谱。

首先考察 ω_{CM} 。根据箔条弹的应用特性,考虑两个极端情况,首先是其被投放的初始时刻,箔条运动速度与载机基本相同,即 $\omega_C(0) \approx \omega_T(0)$;其次是其投放之后经历了相当长的时间,由于箔条被投放之后受大气阻力的影响,其运动速度迅速降低,最后

只受风的影响,由于 $\vec{v}_{Ci}(t)$ 趋近于一个的稳定值,箔条频谱中心也趋于一个稳定值,通常用指数函数来描述,这个过程如公式(16)所示:

$$\begin{cases} \bar{\omega}_{CM} \approx 2[\omega_T(0) \cdot k_{\omega}(t) + \omega_M(t)] \\ k_{\omega}(t) = e^{-t/T_{\omega}} + \omega_C(\infty) \end{cases} \quad (16)$$

然后考察 σ_{ω_C} ,其变化特性与上述类似。初始情况下虽然其运动速度很快,但箔条速度较分散,因此其频谱宽度较大;最后只受风速影响,箔条速度较集中,其频谱宽度通常只有几十赫,即使在阵风、旋风作用下,其谱宽也只有几百赫^[7],故其谱宽的归一化变化曲线可近似表示为

$$\begin{cases} \sigma_{\omega_C} \approx \sigma_{\omega_C}(0) \cdot k_{\sigma}(t) \\ k_{\sigma}(t) = (e^{-t/T_{\sigma}} + \zeta_{\sigma}) / (1 + \zeta_{\sigma}) \end{cases} \quad (17)$$

最后考虑到箔条弹中的箔条初始投放时是聚成一团的,也就是说 $\sigma_C(0) \approx 0$;经历一段时间后箔条完全散开,使得 $\sigma_C(t) \approx \sigma_C$,故用公式(18)描述该过程:

$$\begin{cases} \sigma_C(t) \approx \sigma_C \cdot k_P(t) \\ k_P(t) = 1 - e^{-t/T_P} \end{cases} \quad (18)$$

结合公式(15)和(2),根据文献[10],箔条回波信号频谱可修正为

$$S_C(\omega) = \frac{\sqrt{P_R}}{\sigma_{\omega_C}} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_{CM})^2}{2\sigma_{\omega_C}^2}\right] \quad (19)$$

其功率可以表示为

$$P_C = \frac{G_R^2 \lambda^2 \sigma_C(t)}{(4\pi)^4 R_{CR}^4} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} |S_C(\omega)|^2 d\omega \quad (20)$$

公式(12)~(20)中, N 为设箔条弹中对敌方雷达信号进行反射的箔条根数, $\vec{V}_{Ci}(t)$ 表示某一时刻 t 某一根箔条 i 在空中的速度, T_{ω} 为箔条频谱中心频率的变化系数, T_{σ} 为箔条频宽的变化系数, ζ_{σ} 为标准偏差的修正系数, T_P 为箔条 RCS 的变化系数。

5 JSR 修正机理分析

文献[6,8]指出,为了选择有用目标信号,抑制各种噪声和干扰,雷达采用匹配滤波技术使雷达接收机输出端信号噪声比最大,尽管实际的雷达采用相关接收机来实现,但匹配滤波器和相关接收机在数学上等价。其他的信号处理技术(如准匹配滤波器)的性能比匹配滤波器略差,因此可以认为匹配滤波是雷达接收机实现最大信噪比的上限。

5.1 匹配滤波概述

雷达接收机采用匹配滤波器可以获得最大输出

信噪比^[6,8-9],其条件是:雷达接收机的频域响应函数为输入信号的复共轭。通常对匹配滤波器进行理论分析时,延时和增益常数不予考虑,由此匹配滤波器的频域响应特性为

$$H(\omega) = S^*(\omega) \tag{21}$$

5.2 JSR 修正

当进入雷达接收机的信号为

$$S_{IN}(\omega) = S_T(\omega) + S_C(\omega) \tag{22}$$

经匹配滤波器后,输出信号频谱为

$$S_o(\omega) = S_T(\omega)H(\omega) + S_C(\omega)H(\omega) \tag{23}$$

其中, $S_C(\omega)H(\omega)$ 表示箔条回波信号经过匹配滤波器后的频谱分量,为箔条干扰分量; $S_T(\omega)H(\omega)$ 表示目标回波信号经过匹配滤波器后的频谱分量,为有用信号分量。比较公式(22)和(3)可以看出,传统 JSR 是从信号全部的功率角度出发定义的,而当前雷达对信号的处理是从频域出发,因此传统的 JSR 定义已不适用于这种雷达。对 JSR 应从有效干扰的角度,即应该从匹配滤波器的输出端进行定义。在不考虑箔条与目标回波信号相关性的前提下,根据公式(11)和(20),箔条信号的功率可表示为

$$P_{Co}(\omega) = \frac{G_R^2 \lambda^2 \sigma_C(t)}{(4\pi)^4 R_{CR}^4} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} |S_C(\omega)H(\omega)|^2 d\omega \tag{24}$$

同理可知,目标信号的功率可表示为

$$P_{To}(\omega) = \frac{G_R^2 \lambda^2 \sigma_T}{(4\pi)^4 R_{TR}^4} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} |S_T(\omega)H(\omega)|^2 d\omega \tag{25}$$

有效干扰信号比 JSR 可修正为

$$JSR = P_{Co}(\omega) / P_{To}(\omega) \tag{26}$$

结合公式(21)、(24)、(25)、(26)可得

$$JSR = \frac{\sigma_C(t)}{\sigma_T} \cdot \frac{R_{TR}^4}{R_{CR}^4} \cdot \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |S_C(\omega)S_T^*(\omega)|^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} |S_T(\omega)S_T^*(\omega)|^2 d\omega} \tag{27}$$

与公式(4)和(5)比较可得

$$JSR = JSR' \cdot k_p(t) \cdot \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |S_C(\omega)S_T^*(\omega)|^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} |S_T(\omega)S_T^*(\omega)|^2 d\omega} \tag{28}$$

根据文献[9],匹配滤波器对波形相同、振幅和延时参量不同的信号具有适应性,但对频移信号不

具有适应性。公式(28)即为根据频率特性对 JSR 修正后的结果,可以看出,由于匹配滤波器频率选择特性和箔条频移的双重作用,使得箔条干扰效果产生了变化。

6 仿真与分析

实际上,图 1 所示的攻防过程中导弹、飞机均在进行机动,但是为了使结果简单明了,且考虑到自卫持续时间不长,因此将图 1 中的态势进行简化,以飞机 T 投放箔条的时刻为参照点,假设飞机和导弹的轨迹均是直线,两者运动轨迹交汇角 $\theta = 30^\circ$ 。飞机速度为 300 m/s,导弹速度为 1 000 m/s,两者初始距离为 8 km。为了便于参照,以初始时刻的目标回波功率为基准,将目标回波信号和箔条回波信号进行了归一化处理。

6.1 无源干扰频谱

对于两者的频谱仿真结果如图 2 所示。

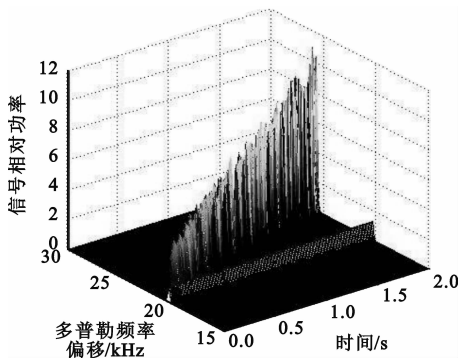


图 2 箔条与目标频谱的变化

Fig.2 Chaff and target frequency characters

图 2 中 X 轴为时间轴(中间至右上), Y 轴为信号的多普勒频率偏移量(中间至左上), Z 轴为信号的相对功率,其中目标的频谱如图中下方的连续隆起部分所示,箔条回波频谱则是动态变化的,其初始部分与目标回波信号频谱重合,随着时间的推移,两者逐渐分开。

6.2 JSR 对比仿真

图 3 为两种 JSR 的仿真结果,其中标有“Input JSR”的为根据公式(3)所得曲线,“Effective JSR”的为根据公式(25)所得曲线,可以看出传统的 JSR 结果是明显不符合实际的;而根据修正后的 JSR 所得结果表明,在题设条件下,大约 0.2 s 之后箔条干扰就失去了干扰效果,这是基本与实际相符的。

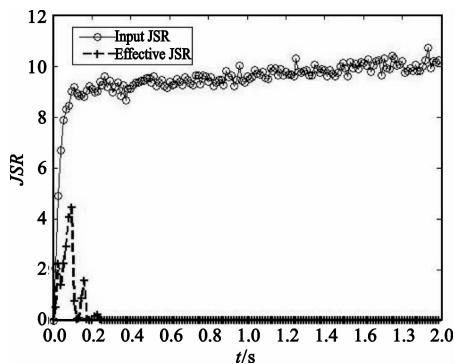


图 3 两种 JSR 取值的变化

Fig.3 Simulation result of input JSR and effective JSR

7 结束语

虽然仿真例中的条件进行了简化,但是结果仍然表明,当箔条弹投放后,对于能根据信号频谱特性进行区别目标的雷达导引头而言,有效的 JSR 并不像传统分析的那样在一个很长的时间内维持较好的干扰效果,而是维持很短。在这种情况下,飞机如欲达到较长的干扰时间,必须通过连续且密集地投放箔条弹,才能达到破坏导弹雷达导引头跟踪的目的。

参考文献:

- [1] 林象平. 雷达对抗原理[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1985:428-440.
LIN Xiang-ping. Radar Countermeasure Theory[M]. Xi'an: Northwest Telecommunication Engineering College Press, 1985:428-440. (in Chinese)
- [2] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:371-378.
WANG Xing. Airborne Countermeasure Theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2008:371-378. (in Chinese)
- [3] 蒋波,曲长文,侯海平. 机载箔条质心干扰研究[J]. 系统仿真学报,2011(4):793-797.
JIANG Bo, QU Chang-wen, HOU Hai-ping. Research on Airborne Chaff Centroid Jamming[J]. Journal of System Simulation, 2011(4): 793-797. (in Chinese)
- [4] 张松柏. 频谱法测量机载箔条弹 RCS 时间特性[J]. 舰船电子对抗,2005(4):10-12.
ZHANG Song-bai. Measurement of The Time Character of Airborne Chaff Flare RCS with The Method of Spectrum Analysis[J]. Shipboard Electronic Counter Measure, 2005(4):10-12. (in Chinese)

- [5] 梅永华,徐金萍,刘洪亮. 一种测量机载箔条云 RCS 时间特性的新方法[J]. 电子科技,2009(6):64-87.
MEI Yong-hua, XU Jin-ping, LIU Hong-liang. A New Method for Measuring the Time Property of the Airborne Chaff Cloud RCS[J]. Electro-Science & Technology, 2009(6): 64-87. (in Chinese)
- [6] 高峰. 雷达导引头概论[M]. 北京:电子工业出版社,2010:125-151.
GAO Feng. Radar Guiding Head Conspectus[M]. Beijing: Electronic Industry Press,2010:125-151. (in Chinese)
- [7] 张永顺,童宁宁,赵国庆. 雷达电子战原理[M]. 北京:国防工业出版社,2006:137-144.
ZHANG Yong-shun, TONG Ning-ning, ZHAO Guo-qing. Radar EW Theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2006:137-144. (in Chinese)
- [8] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 4 版. 北京:电子工业出版社,2010:123-130.
DING Lu-fei, GENG Fu-lu, CHEN Jian-chun. Radar Theory [M]. 4th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:123-130. (in Chinese)
- [9] 赵树杰. 雷达信号处理技术[M]. 北京:清华大学出版社 2010:93-98.
ZHAO Shu-jie. Radar Signal Proceession Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2010:123-130. (in Chinese)
- [10] 陈静. 雷达无源干扰原理[M]. 北京:国防工业出版社,2009:247.
CHEN Jing. Radar Passive Jamming Theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:247. (in Chinese)

作者简介:

王洪迅(1977—),男,河北吴桥人,2006 年获通信与信息系统专业博士学位,现为讲师,主要研究方向为信号处理;

WANG Hong-xun was born in Wuqiao, Hubei Province, in 1977. He received the Ph.D. degree in 2006. He is now a lecturer. His research concerns signal processing.

Email:whxwhxwhx@126.com

王星(1965—),男,辽宁大连人,教授,主要研究方向为电子对抗理论与技术;

WANG Xing was born in Dalian, Liaoning Province, in 1965. He is now a professor. His research concerns theory and technology of electronic warfare.

王红卫(1974—),男,河南平顶山人,硕士,副教授,主要研究方向为电子对抗。

WANG Hong-wei was born in Pingdingshan, Henan Province, in 1974. He is now an associate professor with the M.S. degree. His research concerns electronic warfare.