

文章编号: 1672-2892(2013)02-0239-06

## 机载有源无源复合干扰的本征多普勒频率分析

王洪迅<sup>1</sup>, 王星<sup>1</sup>, 宋强<sup>2</sup>, 康鹰<sup>3</sup>, 刘涛<sup>3</sup>

(1.空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038; 2.中国人民解放军 95209 部队, 湖南 长沙 410111;  
3.中国电子科技集团公司 第29所, 四川 成都 610036)

**摘要:** 通过有源干扰照射箔条诱饵所形成的有源无源复合干扰, 其本征多普勒频率特性是影响干扰效果的关键因素之一。通过建立干扰态势, 分析出干扰方、被干扰方、箔条诱饵三者的位置、距离、角度关系, 进而在不同条件下对目标回波、箔条回波、箔条转发干扰回波频率特性随时间的变化进行分析。结果表明, 箔条转发干扰回波的本征多普勒频移与目标回波的多普勒频移不同, 干扰方需通过频率调制, 改变箔条转发干扰信号回波的频率特性, 才能达到干扰的目的。

**关键词:** 有源无源复合干扰; 转发干扰回波; 本征多普勒频率特性

**中图分类号:** TN955<sup>+</sup>.3

**文献标识码:** A

## Native Doppler Frequency Feature of aero-active-passive-complex Electronic Counter-Measures

WANG Hong-xun<sup>1</sup>, WANG Xing<sup>1</sup>, SONG Qiang<sup>2</sup>, KANG Ying<sup>3</sup>, LIU Tao<sup>3</sup>

(1.Astronautics&Cosmonautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China;  
2.Unit 95209, PLA, Changsha Hunan 410111, China;  
3.Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract:** Active-passive-complex Electronic Counter Measures(ECM) is formed by chaff reflecting active-ECM signals, and the Native Doppler Frequency Feature(NDFF) is one of the key factors which are relative to jamming effects. By setting counter-situation, the positions, distances and angles of jammer, radar and chaff are obtained. The NDFF of targets echo, chaff echo, and repeater jamming echo signals of chaff are analyzed relative to time under several situations. And results show that the NDFF of echo repeater jamming signals is different from that of echo signals for target. The jammer must change the frequency features of echo repeater jamming signals by frequency-modulation so as to interfere with the radar.

**Key words:** active-passive-complex-Electronic Counter Measures; reflecting jamming signals; Native Doppler Frequency Feature

综合文献[1-7]可知, 针对敌火控雷达或导弹雷达导引头, 当前机载电子对抗系统的对抗手段主要有 2 种: 有源干扰和无源干扰。但随着雷达技术的发展, 雷达可采用跟踪干扰源方式抗有源干扰; 采用多普勒滤波抗无源干扰, 从而使得干扰效能大为降低。在这种情况下, 利用有源干扰照射箔条诱饵形成复合干扰, 既可使箔条诱饵附加目标的频率特性, 又可使雷达无法精确跟踪干扰源, 合并了有源干扰无源干扰的优点, 因而成为提高干扰效果的措施之一。复合干扰效果与很多因素有关, 复合干扰信号的频率特性为其中之一。文献[7]对复合干扰信号的功率特性进行了分析, 但复合信号的频率特性, 也是复合干扰需要考量的重要因素之一, 文献[8]中雷达采用频域处理技术, 使得有效压制系数比绝对压制系数要小。总的来看, 复合干扰信号的频率特性主要受 2 个因素的影响: 一是攻防双方与箔条诱饵的相对位置及运动关系; 二是对干扰信号的调制。因为后者引起复合干扰信号频率特性的变化, 受前者的影响很大, 因此本文重点研究由前者引发的干扰回波频率特性; 另一方面, 在这种复合干扰中, 由前者所引起的多普勒频率变化特性是复合干扰信号所固有的, 因此将之定义为干扰信号的本征多普勒频率特性(NDFF)。

### 1 复合干扰态势

实际的复合干扰过程中，攻防双方的运动关系特别复杂，尤其是被攻击方，需用有效的机动摆脱攻击。由于各种机动体现为攻防双方相对角度和距离的变化，因此本文把其机动分解，构建典型的复合干扰态势，以研究复合干扰的 NDFF。

攻击场景如图 1 所示，攻击飞机/导弹 R 对目标飞机 T 发起攻击，T 探测到 R 的信号之后，立即发射箔条诱饵 C，同时目标飞机上的有源干扰设备转发接收的雷达信号，并将其照射到箔条诱饵 C 上，C 对干扰信号进行二次辐射，被敌火控雷达或者攻击导弹的雷达导引头所接收，从而形成有源无源复合干扰。

考虑到箔条投放后，形成的箔条诱饵下降速度相对于飞机速度而言较小，飞机自卫的情况下持续时间不长，飞机在高度维变化不大，为便于分析，建立简化的二维态势模型，如图 2 所示。攻击机 R 平稳飞行，速度值  $V_R$ ，目标机 T 按交叉斜线飞行，速度值  $V_T$ ，两航线交叉角为  $\theta$ 。t=0 时  $T(0,0),R(L,D)$ ，目标机 T 投放箔条弹形成箔条诱饵，进而形成假目标 F。由于复合干扰是箔条反射的干扰回波，因此 F 必然在雷达 R 与箔条诱饵 C 的连线或延长线上。

在这种态势下，雷达可收到 3 种回波信号：目标直接回波信号、箔条诱饵直接回波信号、箔条诱饵转发目标干扰机的干扰信号。这 3 种信号的频率特性与目标、雷达、箔条的位置和相互运动、干扰机的干扰样式直接相关。可以看出，题设条件下复合干扰信号的多普勒频率特性是在其 NDFF 的基础上，经干扰机调制后产生的。为了得到复合干扰信号的 NDFF，这里假设干扰样式为直接转发式干扰，除了增大干扰功率外，不进行任何干扰样式的调制。

### 2 复合干扰态势关系

#### 2.1 位置关系

设起始时刻为  $t_0=0$ ，则时刻  $t$  目标位置为：

$$\begin{cases} s_{TX}(t) = |V_T| \cos \theta \cdot t \\ s_{TY}(t) = |V_T| \sin \theta \cdot t \end{cases} \quad (1)$$

雷达位置为：

$$\begin{cases} s_{RX}(t) = L - |V_R| \cdot t \\ s_{RY}(t) = D \end{cases} \quad (2)$$

箔条诱饵中心位置为：

$$\begin{cases} s_{CX}(t) = 0 \\ s_{CY}(t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

攻击机航线与目标机航线交点 O 为：

$$\begin{cases} s_{OX}(t) = H / \tan \theta \\ s_{OY}(t) = H \end{cases} \quad (4)$$

#### 2.2 距离关系

根据式(1)~式(4)，可以得知图 2 中各种距离关系如式(5)所示。其中  $R_{RT}$  表示目标 T 和雷达 R 之间的距离，其余符号含义类似。

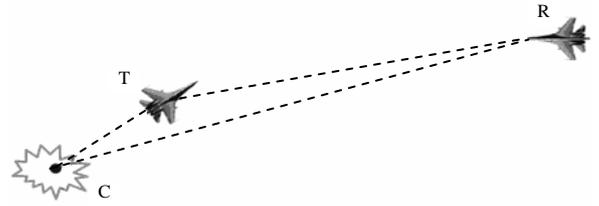


Fig.1 Situation of aero-active-passive-complex ECM  
图 1 有源/无源复合干扰态势示意图

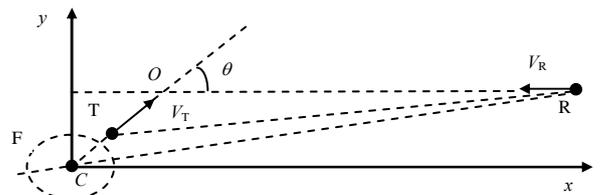


Fig.2 Model of aero-active-passive-complex ECM  
图 2 有源/无源复合干扰态势模型

$$\begin{cases} R_{RT}=R_{TR}=\sqrt{[s_{TX}(t)-s_{RX}(t)]^2+[s_{TY}(t)-s_{RY}(t)]^2} \\ R_{RC}=R_{CR}=\sqrt{[s_{CX}(t)-s_{RX}(t)]^2+[s_{CY}(t)-s_{RY}(t)]^2} \\ R_{TC}=R_{CT}=\sqrt{[s_{CX}(t)-s_{TX}(t)]^2+[s_{CY}(t)-s_{TY}(t)]^2} \\ R_{RO}=R_{OR}=\sqrt{[s_{OX}(t)-s_{RX}(t)]^2+[s_{OY}(t)-s_{RY}(t)]^2} \\ R_{OT}=R_{TO}=\sqrt{[s_{OX}(t)-s_{TX}(t)]^2+[s_{OY}(t)-s_{TY}(t)]^2} \\ R_{OC}=R_{CO}=\sqrt{[s_{OX}(t)]^2+[s_{OY}(t)]^2} \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 角度关系

根据余弦定理和式(5), 可求得:

$$\begin{cases} \cos \theta_{TRC} = (R_{CR}^2 + R_{TR}^2 - R_{CT}^2) / (2R_{CR} \cdot R_{TR}) \\ \cos \theta_{RCT} = (R_{CR}^2 + R_{CT}^2 - R_{TR}^2) / (2R_{CR} \cdot R_{CT}) \\ \cos \theta_{CTR} = (R_{TR}^2 + R_{CT}^2 - R_{CR}^2) / (2R_{TR} \cdot R_{CT}) \\ \cos \theta_{RRT} = (R_{TR}^2 + R_{OR}^2 - R_{OT}^2) / (2R_{TR} \cdot R_{OR}) \\ \cos \theta_{RRC} = (R_{CR}^2 + R_{OR}^2 - R_{OC}^2) / (2R_{TR} \cdot R_{OR}) \\ \cos \theta_{TTC} = \cos \pi = -1 \\ \cos \theta_{TTR} = \cos(\pi - \theta_{CTR}) = -\cos \theta_{CTR} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\theta_{TRC}$  表示目标 T 和箔条 C 相对于雷达 R 的张角;  $\theta_{RRT}$  表示攻击机 R 速度矢量相对于攻击机 R 与目标机 T 连线的夹角, 其余符号含义类似。

## 3 多普勒频移特性

为了便于比较, 首先给出目标、箔条直接回波信号的多普勒频移, 然后给出复合干扰的本征多普勒频移。

### 3.1 目标直接回波的多普勒频移

由文献[1-2]可知, 对于目标直接回波信号的多普勒频率偏移为:

$$\Delta f_T \approx 2(\mathbf{V}_T \cos \theta_{TTR} + \mathbf{V}_R \cos \theta_{RRT}) / \lambda_R \quad (7)$$

### 3.2 箔条直接回波的多普勒频移

对于箔条直接回波的信号, 大量箔条从战斗机上投放出之后, 其运动特性非常复杂。在主要考虑其频谱特性的前提下, 采用了简化分析的方式, 来分析箔条直接回波的频谱变化情况。设箔条有  $N$  根, 在某一时刻  $t$ , 箔条  $i$  在空中的速度为  $\mathbf{V}_{Ci}(t)$ , 由于

$$\sigma_C = \sum_{i=1}^N \sigma_{Ci} \quad (8)$$

$$\Delta f_{Ci} \approx 2(\mathbf{V}_{Ci}(t) \cos \theta_{CCRi} + \mathbf{V}_R \cos \theta_{RRCi}) / \lambda_R \quad (9)$$

因此在归一化的意义上

$$\Delta \bar{f}_C = 2 \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{Ci}}{\sigma_C} [\mathbf{V}_{Ci}(t) \cos \theta_{CCRi} + \mathbf{V}_R \cos \theta_{RRCi}] / \lambda_R \quad (10)$$

实际上  $\sigma_{Ci}$  速率在空间呈正态分布, 使得箔条的多普勒频移也呈正态分布, 根据文献[9], 其速率分布为:

$$g(v) = \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(v-v_0)^2}{2\sigma_v^2} \right] \quad (11)$$

式中:  $v_0$  为平均速率, 表示箔条诱饵的中心速率;  $\sigma_v$  为标准偏差, 表示箔条诱饵速率带宽。其  $v_0$  平均速率的归一化变化曲线可近似为:

$$k_{v_0}(t) = \exp\left(-\frac{t}{T_v}\right) \quad (12)$$

式中  $T_v$  为  $v_0$  平均速率的变化系数。

式(10)根据式(12)进行修正, 即可得到箔条诱饵中心频率的变化情况; 另一方面,  $\sigma_v$  频带宽度变化特性与上述类似。归一化变化曲线可近似为:

$$k_{\sigma_v}(t) = \left(\exp\left(-\frac{t}{T_\sigma}\right) + \zeta_\sigma\right) / (1 + \zeta_\sigma) \quad (13)$$

式中:  $T_\sigma$  为  $\sigma_v$  标准偏差的变化系数;  $\zeta_\sigma$  为标准偏差的修正系数。

### 3.3 复合干扰的本征多普勒频移

1) 电磁波从雷达到目标被飞机 T 接收到, 信号频率为:

$$f_{R-T} = f_R + \frac{1}{2}\Delta f_T = f_R + (\mathbf{V}_R \cos\theta_{RRT} + \mathbf{V}_T \cos\theta_{TTR}) / \lambda_R \quad (14)$$

2) 经过干扰机, 前已假设干扰机不对信号进行干扰频率调制, 信号频率仍为:

$$f_{R-T-J} = f_{R-T} = f_R + \frac{1}{2}\Delta f_T \quad (15)$$

3) 信号转发到箔条上。频率为:

$$f_{R-T-J-C} = f_R + \frac{1}{2}\Delta f_T + \frac{1}{2}\Delta f_{CT} = f_R + (\mathbf{V}_R \cos\theta_{RRT} + \mathbf{V}_T \cos\theta_{TTR}) / \lambda_R + (\mathbf{V}_T \cos\theta_{TTC} + \mathbf{V}_C \cos\theta_{CCT}) / \lambda_R \quad (16)$$

4) 信号最后返回雷达, 信号频率为:

$$f_{R-T-J-C-R} \approx f_R + \frac{1}{2}\Delta f_T + \frac{1}{2}\Delta f_{CT} + \frac{1}{2}\Delta f_C \approx f_R + (\mathbf{V}_R \cos\theta_{RRT} + \mathbf{V}_T \cos\theta_{TTR}) / \lambda_R + (\mathbf{V}_T \cos\theta_{TTC} + \mathbf{V}_C \cos\theta_{CCT}) / \lambda_R + (\mathbf{V}_C \cos\theta_{CCR} + \mathbf{V}_R \cos\theta_{RRC}) / \lambda_R \quad (17)$$

因此该目标的频率偏移为:

$$\Delta f_{JB} = f_{R-T-J-C-R} - f_R = \frac{1}{2}(\Delta f_T + \Delta f_C + \Delta f_{CT}) \quad (18)$$

$$\Delta f_{JB} = [\mathbf{V}_R(\cos\theta_{RRT} + \cos\theta_{RRC}) + \mathbf{V}_T(\cos\theta_{TTC} + \cos\theta_{TTR}) + \mathbf{V}_C(\cos\theta_{CCR} + \cos\theta_{CCT})] / \lambda_R \quad (19)$$

式(14)~(19)中:  $\theta_{TTR}$  为 T 目标速度矢量相对于 TR 连线的夹角;  $\theta_{RRT}$  为 R 飞机速度矢量相对于 RT 连线的夹角;  $f_R$  为雷达信号频率;  $\Delta f_{J1}, \Delta f_{J2}$  为干扰机附加频率偏移;  $\Delta f_{CT}$  为箔条相对于目标的频率偏移。

需要说明的是, 式(19)中  $|\mathbf{V}_C|$  项不是唯一的值, 而是呈现正态分布形式, 其中心速率根据式(12)进行修正, 目标回波也呈现高斯分布形式, 只是带宽较小; 对于转发回波, 其带宽应该是箔条回波带宽和目标回波带宽之和, 应根据式(13)修正。

## 4 仿真与分析

根据上述分析, 本文对在不同条件下, 箔条直接回波信号、目标直接回波信号、干扰转发信号的本征多普勒频率特性进行了仿真。需要说明的是, 由于 3 种信号 NDFP 变化可以反映出信号的变化规律, 因此仿真未考虑信号带宽的变化。

### 4.1 攻角的影响

假设目标机速度  $V_T=400$  m/s, 攻击机速度  $V_R=400$  m/s。图 3 仿真了不同攻角的 NDFP 的变化。

对图 3 任一幅图而言, 在攻角相同情况下, 随着时间的推移, 箔条散开速度降低, 箔条回波的中心多普勒频移与目标回波逐渐分开。而复合干扰的 NDFP 与目标、箔条诱饵回波的多普勒频移一开始就明显不同, 其变化趋势与箔条相似。

从图 3 可以看出: 受攻防双方速度的影响, 在攻角较小时, 干扰转发回波的 NDFP 最后趋近于箔条回波的

NDFF；当攻角由小变大时，目标回波的多普勒频移逐渐缩小，箔条回波的 NDFF 逐渐接近目标回波的 NDFF，干扰转发回波的 NDFF 随着攻角的增大，逐渐与箔条回波的 NDFF 分离， $\theta=90^\circ$ 时，干扰转发回波的多普勒频移近似为目标的一半；随着攻角的继续增大，箔条回波的 NDFF 逐渐远离目标回波，干扰转发回波的 NDFF 则趋近目标回波。

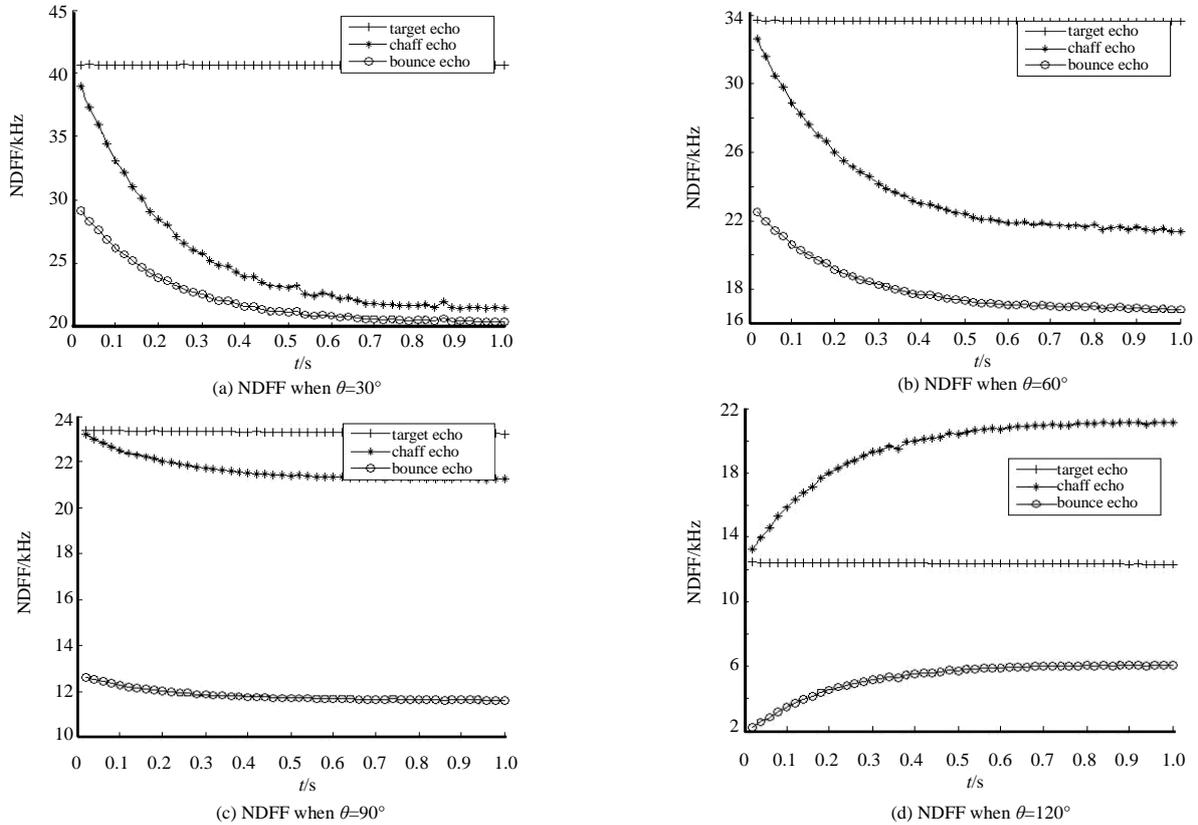


Fig.3 NDFF of three signals relative to attack angles  
图 3 三种回波信号本征频移随攻角的变化特性

#### 4.2 速度的影响

图 4、图 5 分别给出了攻角  $\theta=30^\circ, 90^\circ$ 条件下 3 种信号的 NDFF 随攻防双方速度的变化情况。可以看出，相同攻角的情况下，随着攻击机攻击速度变小，目标机攻击速度的变大，复合干扰的 NDFF 也随之变小，这说明复合干扰本征的 NDFF 受攻击机速度影响较大。

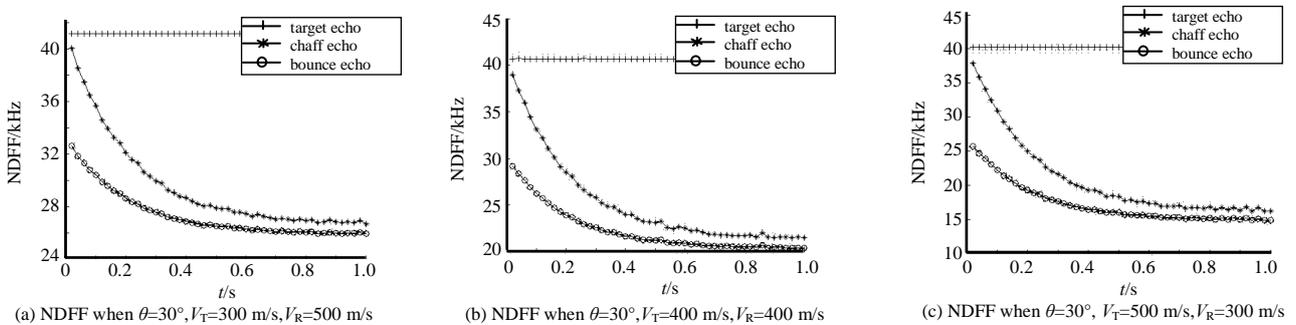


Fig.4 Three signals' NDFF relative to velocities when  $\theta=30^\circ$   
图 4  $\theta=30^\circ$ 三种回波信号多普勒频移随两者相对速度的变化特性

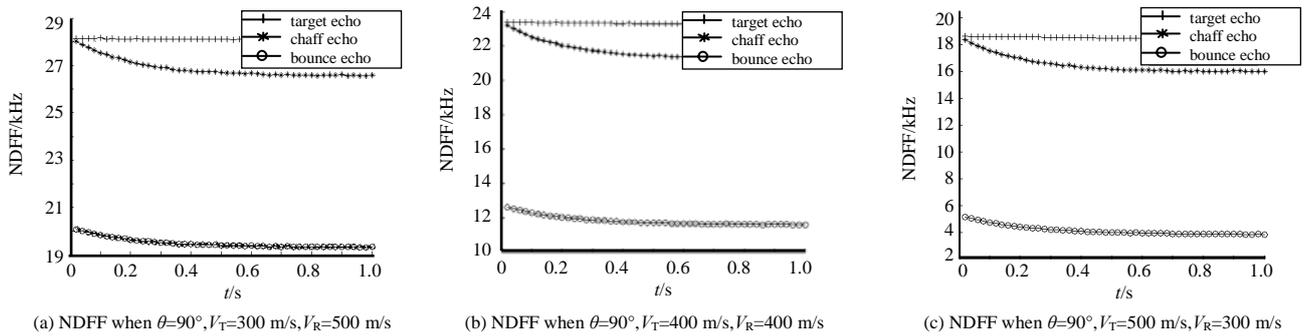


Fig.5 Three signals' NDFF relative to velocities when  $\theta=90^\circ$   
图 5  $\theta=90^\circ$  三种回波信号多普勒频移随两者速度的变化特性

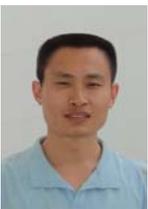
## 5 结论

尽管仿真模型经过简化,但是多种结果均表明:复合干扰的 NDFF 与目标直接回波的 NDFF 在多种情况下均不相同,这对目标的自卫防护而言是极其不利的。在这种情况下干扰方必须根据不同的态势条件,对于干扰信号进行相位/频率调制,改变箔条转发干扰信号回波的多普勒频率特性,使之能够覆盖或者混淆目标真实回波的多普勒频率,才有可能破坏雷达对目标速度的跟踪。

### 参考文献:

- [1] 林相平. 雷达对抗原理[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [2] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [3] 刁鸣. 雷达对抗技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- [4] Richard G Wiley. 电子情报:雷达信号的截获与分析[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [5] 张巨泉,李潮,黄洪旭. 航空武器仿真中雷达干扰效果评估模块[J]. 现代雷达, 2004,26(4):1-4.
- [6] Sergei A Vakin, Lev N Shustov, Robert H Dunwell. 电子战基本原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [7] 王红卫,刘亲社,王星. 照射箔条在机载电子对抗中的功率分析[J]. 现代防御技术, 2007,35(1):52-55.
- [8] 张云秀. 雷达对抗中3种压制系数的比较[J]. 信息与电子工程, 2011,9(4):413-417.
- [9] 陈静. 雷达无源干扰原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.

### 作者简介:



王洪迅(1977-),男,河北省吴桥县人,博士,讲师,主要研究方向为信号处理.email: whxwhxwhx@126.com.

王星(1965-),男,辽宁省大连市人,教授,主要研究方向为电子对抗理论与技术.

宋强(1978-),男,湖北省武穴市人,工程师,主要研究方向为电子对抗装备维护.

康鹰(1980-),男,沈阳市人,工程师,主要研究方向为电子对抗装备与技术.

刘涛(1980-),男,河南省商丘市人,工程师,主要研究方向为电子对抗装备与技术.