

文章编号:1001-2486(2011)05-0134-06

## 基于频域分离的拖曳式诱饵与目标辨识\*

宋志勇,祝依龙,肖怀铁,卢再奇

(国防科技大学 ATR 重点实验室,湖南长沙 410073)

**摘要:**诱饵与目标的辨识是拖曳式诱饵干扰对抗的基本问题。干扰过程中导弹、目标、诱饵三角几何关系的变化导致了目标与诱饵的多普勒频率存在差异,为从频域实现目标与诱饵的分辨提供了可能。在详细分析迎头及尾追场景下目标与诱饵频域可分性的基础上,采用L类魏格纳分布(LWVD),利用其能够提高方位向分辨率和抑制交叉项的优点,实现了导引头波束内目标与诱饵的频域分离,然后结合拖曳式诱饵干扰回波的特点以及攻击场景等辅助信息实现了二者的身份辨识。仿真实验验证了该方法的有效性。

**关键词:**拖曳式诱饵;多普勒频差;L类魏格纳分布;多普勒分离;身份辨识

**中图分类号:**TN973.3 **文献标识码:**A

## Distinguishing the Towed Radar Active Decoy and Target Based on the Separation in Doppler

SONG Zhi-yong, ZHU Yi-long, XIAO Huai-tie, LU Zai-qi

(ATR Key Laboratory, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Distinguishing the decoy and the target is the fundamental problem in countering the Towed Radar Active Decoy (TRAD) jamming. In the course of TRAD jamming, the triangular geometry relationship among the missile, the target and the decoy changes. That brings about the differences of Doppler frequency between decoy and target. Thus it provides the possibility to distinguish the target and decoy in frequency domain. Based on the analysis of the frequency separability in the head-on attack and chase attack scenarios, the L class of Wigner Ville Distribution (LWVD), with the advantages of improving the azimuth resolution and inhibiting the cross terms, was adopted to separate the target and decoy. Then by combining the auxiliary information of echo characteristics and attack scenarios, the identity recognition between the target and the decoy was achieved. The simulation results validated the availability.

**Key words:** towed radar active decoy; doppler difference; L class of wigner ville distribution; doppler separation; identity recognition

电子战技术、隐身技术的发展以及作战环境的复杂多变,使得各种精确制导武器面临巨大挑战。拖曳式有源雷达诱饵(TRAD)作为一种新型欺骗干扰手段,主要用于破坏雷达导引头寻的系统对目标的搜索和跟踪,减小目标的暴露概率和导弹的杀伤力,提高目标的对抗力和生存力。因其具有高效能、强可控性和低成本等优点而成为欺骗和威胁空空导弹最为有效的方法,成为战机的重要保护手段<sup>[1]</sup>。

拖曳式诱饵的干扰对抗,根本问题是分析提取目标与诱饵之间的特征差异,通过有效利用这一差异实现对二者的正确辨识。这些特征差异包括回波幅度、时域、频域、空域以及极化特征等。目标和诱饵之间的多普勒差异是由于导弹、目标和诱饵之间的三角几何关系改变以及导引头天线

波束指向变化导致目标和诱饵相对于导引头的径向速度不同而产生的。多普勒差异的存在为从频域分辨目标和诱饵提供了可能。目前关于拖曳式诱饵干扰的研究主要集中在干扰原理分析<sup>[2-3]</sup>、性能仿真<sup>[4]</sup>和效果评估<sup>[5]</sup>等方面,而关于抗干扰的研究则很少。在研究编队目标架次识别问题时,文献[6-7]说明了单个目标的多普勒频率的变化可以用线性调频模型来比较准确的描述。对于拖曳式诱饵干扰场景由于考虑到导弹的制导攻击以及目标和诱饵的机动飞行,与编队目标的情况虽然不是完全一致,但是在很短的相参积累时间内导弹与目标、导弹与诱饵之间的相对运动可以近似看作是一种匀加速直线运动,而这一运动形式导致的多普勒变化可以一定程度上用线性调频模型来近似。因此本文将雷达导引头接收到的

\* 收稿日期:2011-04-15

作者简介:宋志勇(1983—),男,博士生。

诱饵和目标的混合回波近似看作是一个多分量的线性调频信号。时频分析类方法<sup>[8-10]</sup>通常可以较好地解决这类多分量信号的分离问题,因此本文根据拖曳式诱饵的干扰特点采用 LWVD<sup>[11]</sup>变换,充分利用其在提高横向分辨率和抑制交叉项方面的优势,在多普勒维实现了目标和诱饵的分离,同时结合回波特性以及攻击场景等辅助信息实现了二者的身份辨识。

## 1 拖曳式诱饵频域可分性

末制导阶段,弹目交会主要存在迎头和尾追两种攻击场景,随着弹目、弹诱相对运动以及三角几何关系的改变,目标和诱饵的多普勒频率呈现时变特性,二者的多普勒差异也不断变化。下面以简单转发诱饵为例,分析两种场景下的多普勒差异情况。

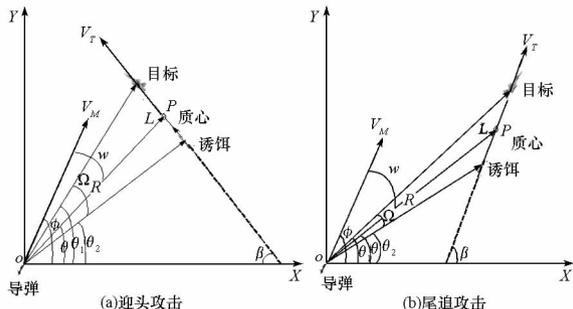


图1 导弹迎头、尾追攻击二维几何关系图

Fig. 1 The triangular geometry relationship under the head-on attack and chase attack

图1为导弹迎头和尾追攻击的几何关系图。图中目标拖曳着诱饵横向飞行,速度方向与水平线的夹角为 $\beta$ ,大小皆为 $V_T$ ;导弹与目标和诱饵形成的质心 $P$ 的距离为 $R$ ,质心位置 $P$ 由波束指向和目标诱饵功率关系决定。导弹速度方向与水平线的夹角为 $\phi$ ,大小为 $V_M$ ;雷达视线方向与水平线的夹角为 $\theta$ , $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 分别为弹目连线、弹诱连线与水平线的夹角, $\Omega = \theta_1 - \theta_2$ 为目标和诱饵相对于导引头的张角, $w = \phi - \theta$ 表示天线转角,即视线方向和航向的夹角,且 $w = [0, \pi/4]$ 。设诱饵干扰信号与目标回波信号的功率比为 $k$ (通常称作干扰压制比),则导引头雷达天线波束指向的角度为

$$\theta = \frac{\Omega}{2} \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1} \quad (1)$$

设在一个处理时长周期内, $V_T$ 、 $V_M$ 和 $\phi$ 均保持不变,则迎头攻击下目标与诱饵的多普勒差异为

$$\Delta f_{d1} = \frac{2V_T [\cos(\beta + \theta_1) - \cos(\beta + \theta_2)]}{\lambda} + \frac{2V_M [\cos(\phi - \theta_1) - \cos(\phi - \theta_2)]}{\lambda} \quad (2)$$

尾追攻击下目标与诱饵的多普勒差异为

$$\Delta f_{d2} = \frac{2V_M [\cos(\phi - \theta_1) - \cos(\phi - \theta_2)]}{\lambda} - \frac{2V_T [\cos(\beta - \theta_1) - \cos(\beta - \theta_2)]}{\lambda} \quad (3)$$

定义频域分离因子 $P_{FPM}$ 为目标诱饵多普勒差异 $|\Delta f_d|$ 与雷达系统频率分辨率 $\delta_f$ 之间的比值,即

$$P_{FPM} = \frac{|\Delta f_d|}{\delta_f} \quad (4)$$

则可以看出 $P_{FPM}$ 越大,表示可分性越强。

下面分析频域分离因子 $P_{FPM}$ 与各参量之间的关系,将式(2)、式(3)分解可得

$$\Delta f_{d1} = \frac{2V_T}{\lambda} 2\sin \frac{2\beta + (\theta_1 + \theta_2)}{2} \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} + \frac{2V_M}{\lambda} 2\sin \frac{2\phi - (\theta_1 + \theta_2)}{2} \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (5)$$

$$\Delta f_{d2} = \frac{2V_M}{\lambda} 2\sin \frac{2\phi - (\theta_1 + \theta_2)}{2} \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} - \frac{2V_T}{\lambda} 2\sin \frac{2\beta - (\theta_1 + \theta_2)}{2} \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (6)$$

由于 $\Omega$ 较小(不超过半波束宽度),则近似有 $\sin \Omega \approx \Omega$ 和 $(\theta_1 + \theta_2)/2 \approx \theta$ 成立。设拖曳线长度为 $L$ ,则 $\Omega$ 满足

$$\Omega \approx \frac{L \sin \theta}{R} \quad (7)$$

从而,式(5)、式(6)可以进一步化简为

$$\Delta f_{d1} \approx \left[ -\frac{2V_T}{\lambda} \sin(\beta + \theta) + \frac{2V_M}{\lambda} \sin w \right] \frac{L \sin \theta}{R} \quad (8)$$

$$\Delta f_{d2} \approx \left[ \frac{2V_M}{\lambda} \sin w - \frac{2V_T}{\lambda} \sin(\beta - \theta) \right] \frac{L \sin \theta}{R} \quad (9)$$

因此可以得到迎头和尾追两种攻击场景下频域分辨因子 $P_{FPM}$ 的表达式分别为

$$P_{FPM1} = \left| -V_T \sin(\beta + \theta) + V_M \sin w \right| \frac{2L \sin \theta}{\lambda R \delta_f} \quad (10)$$

$$P_{FPM2} = \left| V_M \sin w - V_T \sin(\beta - \theta) \right| \frac{2L \sin \theta}{\lambda R \delta_f} \quad (11)$$

由上式可见, $P_{FPM}$ 受到各参量 $V_T$ 、 $V_M$ 、 $\theta$ 、 $\beta$ 、 $w$ 、 $L$ 、 $R$ 、 $\delta_f$ 及 $\lambda$ 的限制,需要根据实际情况综合考虑。

实际上,上述仅从几何关系的角度分析多普勒差异并不能完全反映制导攻击过程中目标和诱饵真实的多普勒差异情况。因为攻击中导弹的运动状态受到制导率以及过载的制约,目标和诱饵

的飞行也要受到机动加速度的制约。因此只有结合制导场景条件进行分析,才能获得整个攻击中的真实多普勒差异。场景设置为:目标在第1s内作匀速直线飞行,1s后开始拖曳着诱饵在方位维上进行机动以形成三角态势,俯仰维上的飞行角度保持不变。导弹运动采用比例导引,当目诱张角大于 $1/2\theta_{BW}$ 或弹诱距离小于导弹杀伤半径时,即认为目标已经逃离波束或导弹已命中诱饵,仿真停止。参数设置如表1所示。

表1 仿真参数列表

Tab.1 The parameter setting of the simulation

参数	迎头攻击	尾追攻击
初始位置	导弹:(0,0,0)	导弹:(0,0,0)
目标位置	目标:(9850,1000,1000)	目标:(10150,1000,1000)
(m) 诱饵位置	诱饵:(10000,1000,1000)	诱饵:(10000,1000,1000)
飞行速度	导弹:1000m/s;目标:300 m/s;诱饵:300m/s	
速度	目标、诱饵的法向加速度: $6g\ m/s^2$	

其他参数: 载频: 6GHz; 波长: 5cm; 脉冲重复频率: 100kHz  
 导引头波束宽度:  $6^\circ$ ; 比例导引系数: 3  
 参数: 拖曳线长度:  $L=150m$ ; 干扰压制比:  $K=10$   
 导弹杀伤半径:  $15m$ ; 仿真时间步长  $T: 0.01s$

由表1的参数设置,可得两种攻击场景下的三维轨迹如图2所示。

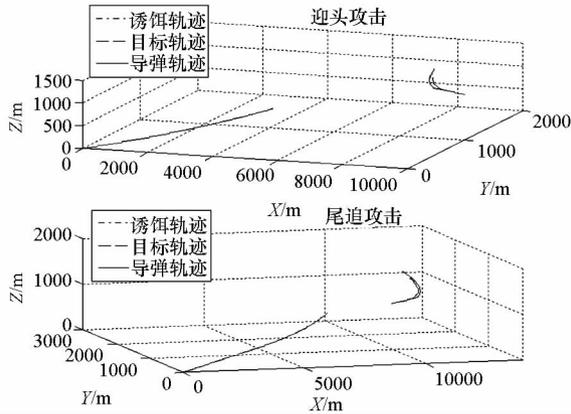


图2 迎头以及尾追攻击三维轨迹

Fig.2 The 3 dimension trajectory under the head-on attack and chase attack

图3根据图2的三维轨迹给出了导弹攻击前置角在 $\pm 20^\circ$ 之间时,迎头和尾追攻击下雷达导引头接收到的目标和诱饵的多普勒差异的变化曲线。

从图3可以看出,无论是迎头还是尾追攻击,在拖曳式诱饵释放初期,由于目标尚未机动,三角态势暂未形成,此时目标和诱饵的多普勒基本相等,差异很小。随着机动的进行以及弹目距离的接近,三角态势逐渐形成,目诱张角增大,多普勒

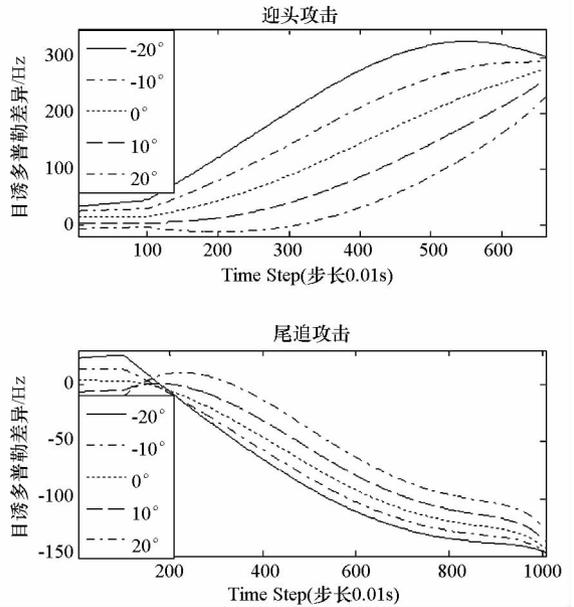


图3 迎头和尾追攻击下目标与诱饵的多普勒差异曲线  
Fig.3 The Doppler difference curve of the target and decoy under the head-on attack and chase attack scenarios

差异也逐渐变大。迎头攻击时弹目、弹诱之间的相对速度大,因此迎头攻击下的多普勒差异大于尾追攻击下的多普勒差异,对于目标诱饵分离很有利。同时,尾追攻击时导弹与目标和诱饵同向飞行,因此尾追过程的持续时间比迎头过程长,因而可用于分离目标和诱饵的时间也要长一些。所以两种场景对分辨目标和诱饵各有优势和劣势。可分性结果表明:无论何种攻击场景,雷达导引头接收到的目标和诱饵的多普勒频率以及二者的多普勒差都是时变的。当导弹前置攻击角处于 $\pm 20^\circ$ 之间时,目标与诱饵的多普勒差大于100Hz的时间在秒级左右,而多普勒差大于50Hz的时间则更长,并且这一差异程度在诱饵释放的中期可以达到。考虑到目标展宽、相参积累时间限制等因素,如果通过相关处理方法能使系统具有50Hz以上的多普勒分辨率,那么就能够在两种场景下实现目标和诱饵的频域有效分离。

## 2 LWVD 频域分离

拖曳式诱饵干扰过程中,目标和诱饵的多普勒频率在确定的积累时间内并不是一个常数,即不是平稳的运动。如果仍采用傅立叶变换的方法将会造成多普勒频谱的展宽,导致目标和诱饵的谱线相互混叠而无法分离。目前,对于这类非平稳信号通常采用时频分析的方法来解决。其中又以基于二次时频分析瞬时成像方法应用最为广泛,成像效果好且运算量较小。本文将L类魏格纳分布(LWVD)应用于诱饵与目标的辨识,在多

普勒维实现目标和诱饵的分离。下面简单分析 LWVD 及其点散布函数(PSF)。

LWVD 最先由 Stankovic 提出,对于解析信号  $s(t)$ , LWVD 定义如下:

$$\text{LWVD}(t, w) = \int s^L \left( t + \frac{\xi}{2L} \right) s^{*L} \left( t - \frac{\xi}{2L} \right) \exp(-j\omega\xi) d\xi \quad (12)$$

其中,  $L$  为正整数, 当  $L = 1$  时 LWVD 退化为 WVD。LWVD 具有与 WVD 相同或相似的优良性质, 如满足边缘条件以及时移不变性、频移不变性等<sup>[11]</sup>。

为定量衡量 LWVD 横向分辨率的好坏, 下面推导其点散布函数 PSF。在导引头波束内, 目标和诱饵可以看作两个强散射点, 对于任意理想散射点目标  $P(x, y)$ , 回波信号可表示为

$$s(f, t) = \exp \left( -j \frac{4\pi f r_t}{c} \right) \text{rect} \left( \frac{f - f_0}{B} \right) \text{rect} \left( \frac{t}{T} \right) \quad (13)$$

回波信号首先经距离压缩得到目标距离像序列, 即对频率  $f$  做逆傅里叶变换 (IFT), 由此得到

$$s'(\tau, t) = B \text{sinc} \left[ B \left( \tau - \frac{2}{c} x \right) \right] \exp \left[ j2\pi f_0 \left( \tau - \frac{2}{c} x \right) \right] \cdot \exp \left[ -j2\pi (\alpha t + \beta t^2) \right] \text{rect} \left( \frac{t}{T} \right) \quad (14)$$

其中:

$$\alpha = \frac{2f_0}{c} y \omega, \quad \beta = \frac{f_0}{c} x \omega^2 \quad (15)$$

获得距离压缩后的信号  $s'(\tau, t)$  后, 再对时间  $t$  做 LWVD, 并取  $t = 0$  时刻作为横向分辨结果。令  $\xi' = \xi/2L$ , 并做简单推导, 可以得到

$$s''(\tau, v) = 2LB^{2L} T \text{sinc}^{2L} \left[ B \left( \tau - \frac{2}{c} x \right) \right] \text{sinc} \left( \frac{v - \alpha}{T/2L} \right) \quad (16)$$

对所得结果取模并进行定标, 则可以获得 PSF 的表达式, 如下:

$$I(r, l) = 2LTB^{2L} \left| \text{sinc}^{2L} \left( \frac{r - x}{\Delta r} \right) \right| \left| \text{sinc} \left( \frac{l - y}{\Delta l/2L} \right) \right| \quad (17)$$

对于时延  $\tau$  和频移  $v$  的标定分别为

$$\tau = \frac{r}{B\Delta r}; \quad v = \frac{l}{T\Delta l} \quad (18)$$

其中,  $\Delta r$  和  $\Delta l$  分别为距离向和方位向的分辨率。

$$\Delta r = \frac{c}{2B}; \quad \Delta l = \frac{c}{2f_0\omega T} \quad (19)$$

由 PSF 表达式可知, LWVD 变换不敏感于回波中二次相位项, 散射点方位向响应为辛克函数

( $\text{sinc}(\cdot)$ ), 且方位向分辨率比 WVD ( $L = 1$ ) 提高  $L$  倍。与 WVD 类似, LWVD 也存在交叉项问题。文献[12]采用频域加窗方法抑制交叉项, 得到了很好的效果。

目标和诱饵的频域分离主要利用二者在横向多普勒上的差异。当目标和诱饵的多普勒差异与系统分辨率可比时, 利用 LWVD 可在横向上得到目标和诱饵的多普勒像, 从而实现二者的频域分离。

### 3 辅助信息身份辨识

当使用 LWVD 获得目标和诱饵分离的多普勒像以后, 如何辨别目标和诱饵的各自身份成为需要解决的主要问题。在拖曳式诱饵干扰场景中, 可以利用辅助信息来判定二者的身份。

(1) 拖曳式诱饵对雷达导引头的角度欺骗是典型的非相干两点源干扰。干扰过程中, 雷达波束中心将指向目标和诱饵的能量重心。为更好地实现角度欺骗, 使雷达波束中心尽可能靠近诱饵, 通常要求诱饵干扰功率是目标回波功率的 2 ~ 10 倍<sup>[4]</sup>。因此在获得的目标和诱饵分离的多普勒像中, 诱饵多普勒像的幅度比目标多普勒像幅度要大很多, 简单利用这一幅度特征信息就能够有效辨别二者的身份。

(2) 不同攻击场景下, 目标和诱饵的多普勒大小关系不相同。迎头攻击中, 导弹与目标和诱饵相对飞行, 目标拖曳着诱饵进行机动过程中, 诱饵多普勒频率比目标多普勒频率要小; 而在尾追攻击中, 导弹与目标和诱饵相向飞行, 诱饵多普勒频率比目标多普勒频率要大。而干扰过程中导弹处于迎头攻击还是尾追攻击这一场景信息是可以获取到的。因此简单利用导弹攻击场景信息所指示的多普勒大小关系能够正确的辨别目标和诱饵的身份。

因此, 综合利用以上两种辅助信息可以在已实现频域分离的回波多普勒像上正确地辨别出目标和诱饵的身份, 为后续导引头调整波束指向实现目标跟踪提供依据。

### 4 仿真实验

通过仿真实验验证本文提出的方法对目标和诱饵频域辨识的效果。仿真场景以及参数设置分别如图 2 和表 1 所示。其中目标信噪比表示为  $\mathcal{R}_t$ , 诱饵信噪比表示为  $\mathcal{R}_d$ , 导弹初始攻击角为  $6^\circ$ 。为了与辨识效果进行对比分析, 图 4 给出了导弹前置攻击角为  $6^\circ$  时迎头及尾追攻击场景下目标与诱饵多普勒差异的变化曲线。

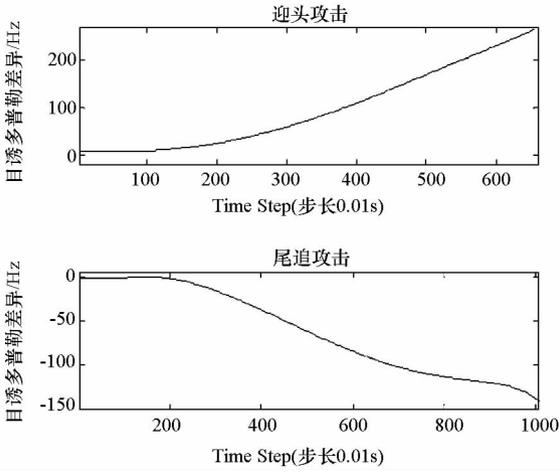
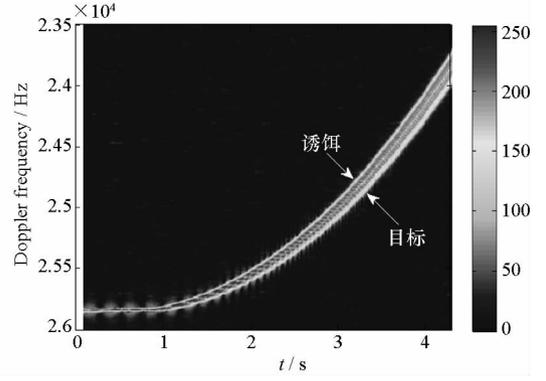


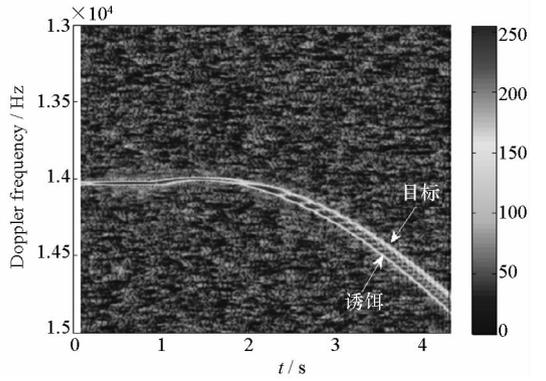
图4 前置攻击角为 $6^\circ$ 时目标与诱饵的多普勒差异  
Fig.4 The Doppler difference between target and decoy when the attack angle is  $6^\circ$

根据图2迎头以及尾追攻击场景下的运动轨迹,图5、图6分别给出了利用LWVD方法对这两种典型攻击场景下目标和诱饵进行多普勒分辨的结果。其中相参积累时间为20ms,对应多普勒分辨率50Hz。考虑到末制导阶段时间很短以及制导率和过载的限制,在对目标和诱饵进行身份辨识后必须留足一定时间用于导弹调整雷达波束指向以正确跟踪目标。因此这里只考虑雷达导引头从0时刻到4.5s内对目标和诱饵进行频域辨识,剩下的时间留给导引头进行其它处理。

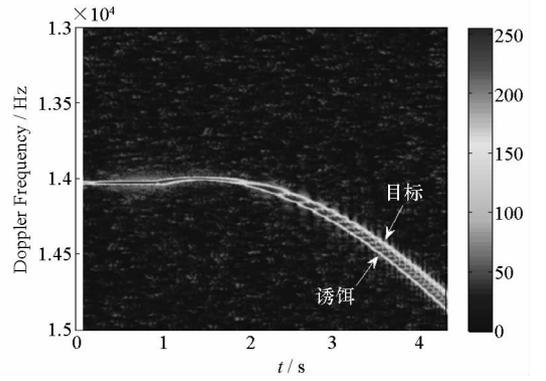


(c) ( $\mathcal{R}_T = 19\text{dB}, \mathcal{R}_D = 22\text{dB}$ )

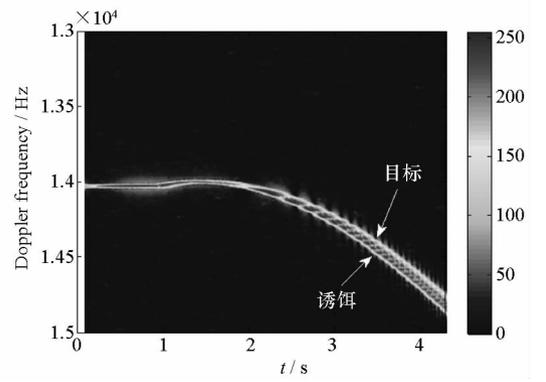
图5 迎头攻击场景下目标与诱饵多普勒分辨结果  
Fig.5 The discrimination results of the target and decoy under head-on attack scene in Doppler



(a) ( $\mathcal{R}_T = 13\text{dB}, \mathcal{R}_D = 16\text{dB}$ )

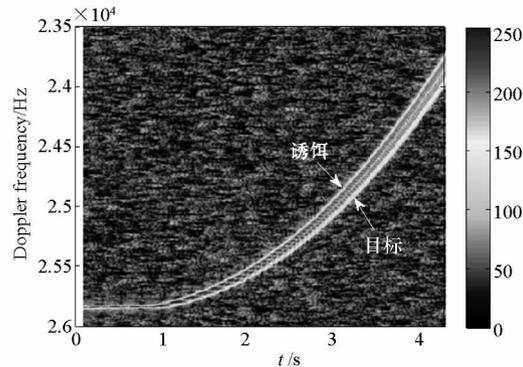


(b) ( $\mathcal{R}_T = 16\text{dB}, \mathcal{R}_D = 19\text{dB}$ )

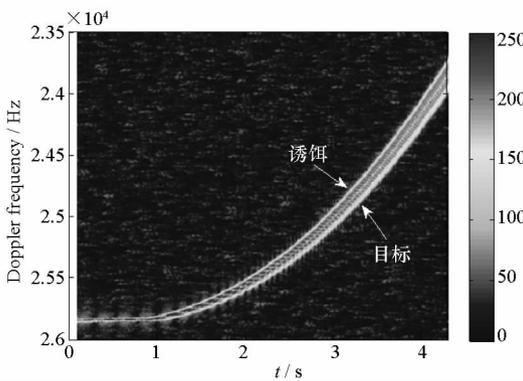


(c) ( $\mathcal{R}_T = 19\text{dB}, \mathcal{R}_D = 22\text{dB}$ )

图6 迎头攻击下目标与诱饵多普勒分辨结果  
Fig.6 The discrimination results of the target and decoy under chase attack scene in Doppler



(a) ( $\mathcal{R}_T = 13\text{dB}, \mathcal{R}_D = 16\text{dB}$ )



(b) ( $\mathcal{R}_T = 16\text{dB}, \mathcal{R}_D = 19\text{dB}$ )

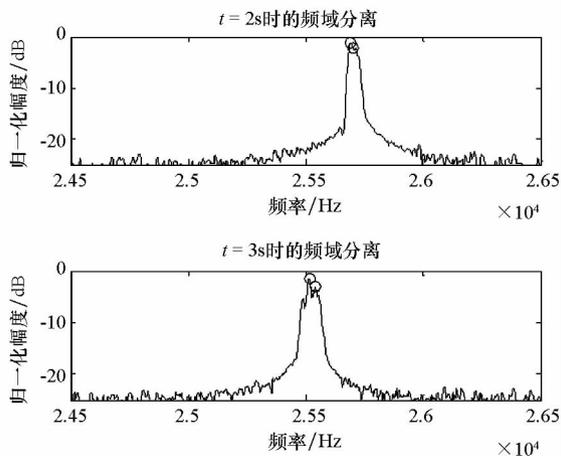


图7 迎头攻击固定时刻频域分离图

Fig. 7 The frequency separation in fix time under head-on attack

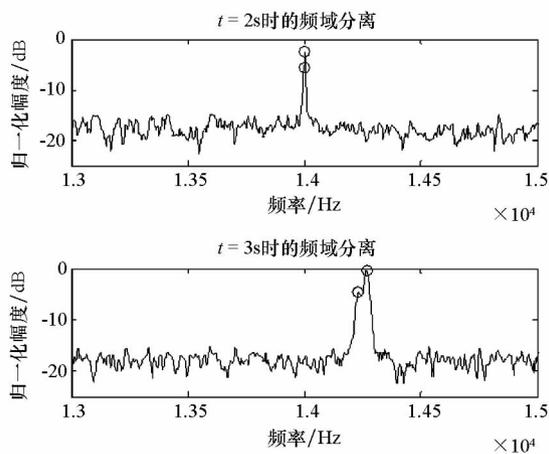


图8 尾追攻击固定时刻频域分离图

Fig. 8 The frequency separation in fix time under chase attack

从图5的分辨结果可以看出,采用LWVD处理后,迎头攻击下目标和诱饵的谱线从第2s开始出现明显的展宽,第3s时二者的谱线基本可以分离,第3.5s时谱线分离已经十分明显。这一结果与图4的分析完全吻合。此时根据相关辅助信息可以在分离的谱线上辨识出目标和诱饵的身份。从图6可以看出,与图5相比在相同的系统分辨条件下谱线分离的程度明显减弱。这一点与图4分析的多普勒差异变化曲线相当吻合。图6中目标和诱饵在第3.5s左右基本可以分离,第3.7s时谱线分离已经十分明显。同样根据相关辅助信息可以正确辨识出目标与诱饵的谱线。同时还可以看出:不同信噪比条件下目标和诱饵分离的程度有所不同,但目标诱饵分离的总体趋势是一致的,信噪比越高,分离越明显。图7、图8分别针对图5(a)、图6(a)的时频分析结果给出了迎头和尾追攻击场景下 $t = 2s$ 和 $t = 3s$ 两个固定时刻多普勒分离的情况。从图中可以看出目标与诱饵的多普勒分离情况与前面的分析完全吻合。可见,采用

LWVD方法能够有效地提高目标方位向的分辨率,通过频域加窗较好地抑制了交叉项干扰,有效实现了目标和诱饵的频率分离,同时结合辅助信息在4.5s时间内正确实现了目标与诱饵的身份辨识,为后段的目标跟踪和打击提供了时间和依据。

## 5 结论

拖曳式诱饵干扰过程中三角态势的形成以及变化导致了雷达接收到的目标和诱饵回波信号在多普勒频率方面存在差异。本文在对拖曳式诱饵干扰过程中频域可分性进行详细分析的基础上,将LWVD方法应用于拖曳式诱饵与目标的频域分离,通过利用回波特性以及场景信息辅助实现了目标和诱饵的身份辨别。结合迎头以及尾追两种典型场景仿真验证了该方法的分辨性能。仿真结果表明,文中提出的方法能够有效实现目标与诱饵的多普勒维辨识。

## 参考文献:

- [1] 王万通,庞国荣. 拖曳式有源雷达诱饵质心转移干扰[J]. 电子对抗技术,1998,13(3):21-26.
- [2] 耿艳,白渭雄,苗松娟. 两点源对单脉冲雷达角度欺骗干扰的仿真与分析[J]. 火力与指挥控制,2010,35(7):151-157.
- [3] 侯向辉,刘晓东,李仙茂. 拖曳式诱饵诱骗防空导弹探讨[J]. 舰船电子对抗,2010,33(1):40-43.
- [4] 白渭雄,李爱飞,李树斌. 雷达诱饵的干扰仿真及分析[J]. 电子信息对抗技术,2008,23(4):53-57.
- [5] 范文同,王星,叶广强. 机载拖曳式有源诱饵作战效能研究[J]. 现代电子技术,2010,33(3):10-12.
- [6] 赵学云,刘铮. 基于Randon-WVD变换的编队目标架次识别[J]. 电子与信息学报,2007,29(3):544-548.
- [7] 邢孟道,保铮. 低分辨雷达的一维横向成像及提高分辨率的方法[J]. 西安电子科技大学学报,2000,27(6):700-704.
- [8] 黄小红,姜卫东,邱兆坤,等. 基于时频的逆合成孔径雷达的距离-瞬时多普勒成像方法[J]. 国防科技大学学报,2002,24(6):34-36.
- [9] Chen V C, Miceli W J. Time-varying Spectral Analysis for Radar Imaging of Maneuvering Targets [J]. IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, 1998, 145(5): 262-268.
- [10] 袁俊泉,皇甫堪,王展. 海洋环境中基于WVD的LFM信号检测方法[J]. 国防科技大学学报,2002,24(4):73-76.
- [11] Stankovic L. A Multitime Definition of Wigner Higher Order Distribution; L-wigner Distribution [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1994, 1(7): 106-109.
- [12] Stankovic L. A Method for Improved Distribution Concentration in the Time-frequency Analysis of Multicomponent Signals Using the L-wigner Distribution [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(5): 1262-1268.