

基于航迹速度修正频谱分析的防空雷达虚假目标判别方法

王华彬 徐牧* 王成 赵庆全

(空军装备研究院雷达与电子对抗研究所 北京 100085)

摘要: 该文研究了防空雷达虚假目标判别问题, 针对航迹欺骗干扰、杂波剩余假航迹干扰等能够形成航迹的虚假目标, 从回波频谱分析角度着手, 结合航迹速度修正处理, 提出了一种全新的判别方法。该方法将虚假目标判别归结为二元假设检验问题, 推导了以多普勒频率差为统计量的似然比判别表达式, 给出了判别门限的计算公式, 并基于实际防空雷达数据验证了方法的有效性, 为解决防空雷达目标真伪判别提供了有效的技术途径。

关键词: 虚假目标判别; 防空雷达; 频谱分析

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)03-0382-07

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.13045

False Target Discrimination of Air Surveillance Radar Based on Track Velocity Modification and Frequency Spectrum Analysis

Wang Hua-bin Xu Mu Wang Cheng Zhao Qing-quan

(Radar Research Institute of Air Force Equipment Academy, Beijing 100085, China)

Abstract: In this paper, the false target discrimination strategy of an air surveillance radar is studied. To distinguish a false target, such as clutter residual false track or false track deception, a novel method based on track velocity modification and frequency spectrum analysis is proposed. This method can provide a solution for the false target discrimination problem. The discrimination issue is determined to be the problem of bivariate hypothesis testing, and the likelihood ratio formula is deduced by calculating the judge threshold. The method is verified with the experimental results of real surveillance radar data.

Key words: False target discrimination; Air surveillance radar; Frequency spectrum analysis

1 引言

防空雷达是我国防空预警网骨干装备, 受电子干扰及杂波影响, 其在工作过程中会探测到实际并不存在的虚假目标, 导致不明或异常空情^[1]。对于防空雷达而言, 能够形成航迹的典型虚假目标主要有航迹欺骗干扰和杂波剩余假航迹干扰两类, 二者严重影响雷达正常的跟踪录取与空情上报。其中, 航迹欺骗干扰利用射频存储器件存储雷达信号, 控制干扰信号转发时机, 在预设方位和距离处产生虚假点迹, 被雷达编批而形成虚假航迹^[2-5]; 杂波剩余假航迹干扰是指当雷达工作于强杂波区, 每次雷达扫描及对消处理后可能产生大量剩余点迹, 对消剩余的强杂波点被错误关联而形成虚假航迹^[6-9]。

上述虚假目标在防空雷达 PPI 显示器上形成虚假航迹, 雷达操纵员难以直接判别目标真伪, 已有

研究针对此类目标的判别开展了研究。在航迹欺骗干扰判别方面, 最常用的方法是通过改变天线转速、转向, 分析航迹稳定性及连续性变化实施判别^[2], 另一类方法是基于副瓣匿影等处理手段^[3], 上述典型处理方法在实际应用时会干扰雷达对正常目标的跟踪与录取。在杂波剩余假航迹干扰判别方面, 一类方法是基于神经网络技术, 利用支持向量机等分类器实施判别^[6,7], 该类方法较为复杂, 且选用特征易造成真伪目标的误判; 另一类方法利用运动目标和固定杂波跨周期相关特性不同, 通过分析帧间相关性判别^[8,9], 该类方法对于被雷达编批形成航迹的杂波剩余假航迹干扰抑制作用有限。

针对航迹欺骗干扰、杂波剩余假航迹干扰等虚假目标判别问题, 本文从回波频谱分析角度着手, 结合航迹速度修正处理, 提出一种全新的判别方法。将虚假目标判别归结为二元假设检验问题, 推导了以多普勒频率差为统计量的似然比表达式, 给出了判别门限的计算公式, 实现了对虚假目标的有效判别, 基于实际防空雷达数据验证了方法的有效性。

2013-05-08 收到, 2013-08-06 改回; 2013-08-12 网络优先出版

国家部委基金资助课题

*通信作者: 徐牧 xumu1979xm@163.com

2 判别原理

真实目标与虚假目标表现出来的运动速度的真伪性存在本质区别——对于真实目标，其运动速度是由目标真实运动产生，而虚假目标的运动速度则是由于有意欺骗(航迹欺骗干扰)或错误关联处理(杂波剩余假航迹干扰)产生。通常，可采取两种典型方法估计目标运动速度。一是从频域上分析，通过提取雷达回波多普勒频率进行估计；二是从时域上分析，基于目标斜距变化率进行估计。由于真实目标表现出的速度为真实运动所产生，理论上由上述两种方法估计的速度值应一致；而对于虚假目标，两种方法估计的速度值不一致。证明如下：

(1) 真实目标

假设真实目标以径向速度 v 相对雷达匀速运动， λ 为波长，则回波多普勒频率可表示为 $f_d = 2v/\lambda$ 。采用频域分析方法，不考虑测量误差，通过回波频谱分析估计的回波多普勒频率应为 $\hat{f}_d = f_d$ ，则由频域分析方法估计的目标速度为：

$$\hat{v}_{\text{freq_real}} = \frac{\lambda \hat{f}_d}{2} = v \quad (1)$$

采用时域分析方法，令 t 时刻目标与雷达距离为 $R(t) = R_0 - vt$ ，基于单位时间内斜距变化量估计目标速度，计算公式为：

$$\hat{v}_{\text{time_real}} = \frac{\Delta R}{\Delta t} = \frac{R(t + \Delta t) - R(t)}{\Delta t} = \frac{v\Delta t}{\Delta t} = v \quad (2)$$

经上述推导可知，对于真实目标，有 $\hat{v}_{\text{freq_real}} = \hat{v}_{\text{time_real}}$ 成立。

(2) 航迹欺骗干扰

对于航迹欺骗干扰，通过将接收的雷达信号按一定延迟转发形成干扰信号，令干扰设备相对雷达的运动速度为 v_0 ，则转发的干扰信号将调制由于相对运动而产生的多普勒频率。由于静止目标(零多普勒)极易被雷达系统滤除，干扰设备还可能在转发雷达信号的同时再调制一定的多普勒频率。由于调制出与虚假目标实时航速精确吻合的多普勒频率对信号侦测、存储及转发的要求特别高，处理不好反而影响干扰效果，实际使用时通常任意调制某一固定多普勒频率，只为避免欺骗的虚假点迹被雷达滤除。令调制的径向多普勒频率为 f_{d_false} ，则采用频域分析方法，不考虑测量误差，同理易知目标速度估计值应为：

$$\hat{v}_{\text{freq_decep}} = v_0 + \frac{\lambda}{2} f_{d_false} \quad (3)$$

采用时域分析方法，不考虑测量误差，令相邻两次雷达扫描时刻分别为 t_1 和 $t_2 = t_1 + T_{\text{scan}}$ ， T_{scan} 为

天线扫描周期，产生相邻两次干扰航迹点时的转发延迟分别为 $\Delta t_1, \Delta t_2$ ，易知单位时间内的斜距变化率为 $\Delta R = R(t_1 + T_{\text{scan}}) - R(t_1) = (c/2)(\Delta t_2 - \Delta t_1) + v_0 T_{\text{scan}}$ ，则时域分析估计的目标速度为：

$$\hat{v}_{\text{time_decep}} = \frac{\Delta R}{T_{\text{scan}}} = \frac{c(\Delta t_2 - \Delta t_1)}{2T_{\text{scan}}} + v_0 \quad (4)$$

由于 f_{d_false} 是由欺骗干扰设备任意调制的频率，难以与目标斜距变化率随时保持一致。因此，对于航迹欺骗干扰，可认为 $\hat{v}_{\text{freq_decep}} \neq \hat{v}_{\text{time_decep}}$ 成立。

(3) 杂波剩余假航迹干扰

对于杂波剩余假航迹干扰，其频谱在零频附近有所展宽，令其中心多普勒频率为 $f_{d_clutter}$ ，采用频域分析方法，不考虑测量误差，易知目标速度估计值应为：

$$\hat{v}_{\text{freq_clutter}} = \frac{\lambda f_{d_clutter}}{2} \quad (5)$$

采用时域分析方法，不考虑测量误差，则目标速度估计值为：

$$\hat{v}_{\text{time_clutter}} = \frac{\Delta R}{T_{\text{scan}}} = \frac{(R_2 - R_1)}{T_{\text{scan}}} \quad (6)$$

其中 R_2 和 R_1 分别为相邻两次扫描错误关联的航迹点斜距，其由跟踪录取系统决定，与杂波频谱无关。因此，对于杂波剩余假航迹干扰，可认为 $\hat{v}_{\text{freq_clutter}} \neq \hat{v}_{\text{time_clutter}}$ 成立。

由上述推导可知，通过对比时域分析与频域分析两种方法所估计的目标速度值，可有效区分真伪两类目标。因此，本文一方面从时域上基于斜距变化率估计目标多普勒；另一方面从频域上基于回波频谱分析估计目标多普勒，将“频域估计多普勒与时域估计多普勒是否一致”作为判别依据，并将虚假目标判别归结为二元假设检验问题，实现了虚假目标判别。

3 基于航迹速度修正频谱分析的虚假目标判别方法

判别流程可概述为：首先，根据雷达终端录取的航迹数据估计目标运动速度，考虑到防空雷达脉冲重频低所造成的测速模糊，基于脉冲重频等工作参数进行航迹速度模糊修正，估计模糊的目标多普勒，简称“时域估计多普勒”；其次，基于多帧回波数据进行傅里叶分析，通过回波频谱谱峰搜索估计目标多普勒，简称“频域估计多普勒”；最后，计算“时域估计多普勒”与“频域估计多普勒”差值，并将此差值作为判别统计量，构建似然比判别表达式，利用统计判决实现虚假目标判别。算法流程如图1所示。

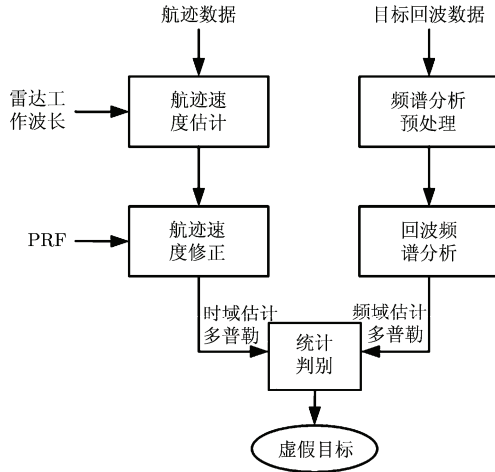


图1 基于航迹速度修正频谱分析的虚假目标判别算法流程图
Fig. 1 Flow diagram of the proposed false target discrimination method

3.1 航迹速度估计

基于防空雷达连续扫描获得的目标航迹点坐标, 计算单位时间内目标径向斜距变化量, 估计径向航迹速度。令估计所使用的两个目标航迹点的极坐标分别为 $P_1(\rho_1, \theta_1)$, $P_2(\rho_2, \theta_2)$, 间隔时间为 Δt , 易知径向航迹速度的估计公式为:

$$\hat{v}_r = \frac{\rho_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - \rho_1}{\Delta t} \quad (7)$$

3.2 航迹速度修正

防空雷达通常具有较低的脉冲重复频率, 基于频域分析估计的目标速度可能存在模糊, 若雷达脉冲重频为 PRF, 则回波多普勒频率的不模糊区间限于 $[-PRF/2, PRF/2]$ 范围内。对于由目标径向斜距变化率估计的航迹速度, 其对应的多普勒频率通常严重模糊, 为与频域估计多普勒进行有效对比, 结合 PRF 对航迹速度进行修正, 计算修正后带模糊的航迹多普勒频率。修正前的航迹多普勒为:

$$\hat{f}_{d_trk} = \frac{2\hat{v}_r}{\lambda} \quad (8)$$

式中 λ 为雷达工作波长。对 \hat{f}_{d_trk} 进行模糊修正, 获得带模糊的航迹多普勒频率, 修正公式为:

$$\hat{f}_{d_time} = \begin{cases} \text{mod}(\hat{f}_{d_trk}, \text{PRF}), & 0 \leq \text{mod}(\hat{f}_{d_trk}, \text{PRF}) \leq \frac{\text{PRF}}{2} \\ \text{mod}(\hat{f}_{d_trk}, \text{PRF}) - \text{PRF}, & \frac{\text{PRF}}{2} < \text{mod}(\hat{f}_{d_trk}, \text{PRF}) < \text{PRF} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\text{mod}(\cdot)$ 为取模运算, PRF 为雷达脉冲重频, 将 \hat{f}_{d_time} 记作“时域估计多普勒”。

3.3 频谱分析预处理

为分析目标回波频谱, 需采集波束驻留期间的多帧目标回波数据, 若驻留时间较长, 为避免由于目标距离单元未对齐而对频谱分析结果造成影响, 可进行包络对齐预处理, 采用经典的互相关法^[10]补偿并对齐回波包络。

3.4 目标回波频谱分析

选择包络对齐后的目标距离单元, 通过对目标距离单元内多帧回波数据进行傅里叶分析, 获得目标回波频谱, 即

$$A(f) = \text{FFT}[s(m, n_{\text{target}})] \quad (10)$$

式中的 $\text{FFT}(\cdot)$ 为傅里叶算子, $s(m, n)$ ($m = 1, \dots, N_r$, $n = 1, \dots, N_a$) 为目标“方位-距离”2 维窗口数据, N_r 和 N_a 分别为距离维和方位维采样单元数, n_{target} 为目标单元, $A(f)$ 即为目标频谱。计算 $A(f)$ 中最强频谱分量作为目标多普勒频率的有效估计, 记作“频域估计多普勒”, 即:

$$\hat{f}_{d_freq} = \arg \max_f |A(f)|, \quad f \in \left[-\frac{\text{PRF}}{2}, \frac{\text{PRF}}{2}\right] \quad (11)$$

3.5 虚假目标判别

(1) 问题描述

由于测量误差的存在, 无论时域估计抑或频域估计, 目标多普勒测量都存在误差。定义“时域估计多普勒”与“频域估计多普勒”差值为:

$$\Delta f = \hat{f}_{d_time} - \hat{f}_{d_freq} = (f_{d_time} - f_{d_freq}) + (\tilde{f}_{d_time} - \tilde{f}_{d_freq}) \quad (12)$$

f_{d_time} , f_{d_freq} 分别为 \hat{f}_{d_time} , \hat{f}_{d_freq} 的真值, \tilde{f}_{d_time} , \tilde{f}_{d_freq} 为误差。

对于真实目标, $f_{d_time} = f_{d_freq}$, 则 Δf 是由综合误差 $\Delta \tilde{f} = \tilde{f}_{d_time} - \tilde{f}_{d_freq}$ 决定的随机量; 对于虚假目标, f_{d_time} 与 f_{d_freq} 存在差异, 不妨令 $f_{d_time} = f_0 + f_{d_freq}$, 此时 Δf 是由 f_0 及 $\Delta \tilde{f}$ 决定的随机量。因此, 虚假目标判别在本质上可归结为二元假设检验问题^[11]。

(2) Δf 统计分布

根据式(7)、式(8), 由于雷达系统存在测距误差及测角误差, \tilde{f}_{d_time} 可视为服从均值为 0, 方差为 $\sigma_{f_{d_time}}^2$ 的高斯分布, 即 $\tilde{f}_{d_time} \sim N(0, \sigma_{f_{d_time}}^2)$, 由微分公式推导可知:

$$\sigma_{v_r}^2 = \left[\left(\frac{\cos(\theta_1 - \theta_2)}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta t} \right)^2 \right] \sigma_R^2 + \left(\frac{2\rho_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{\Delta t} \right)^2 \sigma_\theta^2 \quad (13)$$

其中, $\sigma_{v_r}^2$ 为径向速度测量误差, σ_R^2 为雷达测距精

度, σ_θ^2 为雷达测角精度。若时域估计时的相邻两次雷达观测下目标方位角差别不大, 可近似认为 $\theta_1 \approx \theta_2$, 则此时可进一步简化为:

$$\sigma_{v_r}^2 \approx \frac{2\sigma_R^2}{\Delta t^2} \quad (14)$$

在求得 $\sigma_{v_r}^2$ 的基础上, 所要求解的 $\sigma_{f_{d_time}}^2$ 即可通过下式获得:

$$\sigma_{f_{d_time}}^2 = \frac{4}{\lambda^2} \sigma_{v_r}^2 \quad (15)$$

同理, 频域上的傅里叶分析同样存在误差, \tilde{f}_{d_freq} 也可视为服从均值为 0, 方差为 $\sigma_{f_{d_freq}}^2$ 的高斯分布, 即 $\tilde{f}_{d_freq} \sim N(0, \sigma_{f_{d_freq}}^2)$ 。借鉴速度测量误差理论, 基于频域傅里叶分析估计回波多普勒频率, 估计误差 $\sigma_{f_{d_freq}}^2$ 可通过下式计算获得^[12]:

$$\sigma_{f_{d_freq}}^2 = \frac{3}{8\pi^2 \left(\frac{E}{N_0} \right) (NT_r)^2} \quad (16)$$

式中 (E/N_0) 为信噪比, N 为积累脉冲数, T_r 为脉冲重复周期。

根据概率论原理, 由式(12)可知, 当 $\tilde{f}_{d_time} \sim N(0, \sigma_{f_{d_time}}^2)$, $\tilde{f}_{d_freq} \sim N(0, \sigma_{f_{d_freq}}^2)$ 时, 综合误差 $\tilde{\Delta f}$ 同样将服从高斯分布, 记为 $\Delta f \sim N(0, \sigma_{\Delta f}^2)$, 其方差可通过下式计算获得:

$$\sigma_{\Delta f}^2 = \sigma_{f_{d_freq}}^2 + \sigma_{f_{d_time}}^2 \quad (17)$$

根据以上推导结论, 则对于真实目标, $\Delta f \sim N(0, \sigma_{\Delta f}^2)$; 对于虚假目标, $\Delta f \sim N(f_0, \sigma_{\Delta f}^2)$ 。

(3) 似然比判决式

根据二元假设检验理论^[11], 基于 Δf 的统计分布建立如下假设:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{虚假目标假设 } H_1: \\ p(\Delta f | H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta f}} \exp\left(-\frac{(\Delta f - f_0)^2}{2\sigma_{\Delta f}^2}\right) \\ \text{真实目标假设 } H_0: \\ p(\Delta f | H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta f}} \exp\left(-\frac{\Delta f^2}{2\sigma_{\Delta f}^2}\right) \end{array} \right. \quad (18)$$

构建似然比判决式为:

$$\Lambda(\Delta f) = \frac{p(\Delta f | H_1)}{p(\Delta f | H_0)} \stackrel{H_1}{\geq} \eta' \quad (19)$$

式中 η' 为判决门限, 将式(18)代入式(19), 两边取对数, 经推导可建立形式简单的对数似然比表达式, 即:

$$\Delta f \cdot f_0 \stackrel{H_1}{\geq} \eta'' \quad (20)$$

其中

$$\eta'' = \sigma_{\Delta f}^2 \ln \eta' + f_0^2 / 2 \quad (21)$$

由于虚假目标航迹多普勒可能为正, 也可能为负, 即 f_0 符号未知。在此情况下, 应进行双边检验, 构建最终的似然比判别表达式可表示为:

$$|\Delta f| \stackrel{H_1}{\geq} \eta \quad (22)$$

在实施虚假目标判别时, 首先根据算法流程步骤估计 \hat{f}_{d_time} , \hat{f}_{d_freq} 并计算获得 Δf , 即可通过式(22)进行判别——若 $|\Delta f| > \eta$, 则判为虚假目标, 否则为真实目标。

(4) 判别门限选取

由式(22)易知, 影响最终判别效果的重要因素即是 η 的取值。在统计检测理论中, 有贝叶斯准则、最小错误概率准则、Neyman-Pearson 准则等可供选择^[11]。本文采用雷达信号检测常用的 Neyman-Pearson 准则, 设定虚警概率值 P_{fa} (表示将真实目标误判为虚假目标的概率), 则根据该准则可推导 η 与 P_{fa} 之间满足以下关系:

$$P_{fa} = 2 \int_{\eta}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta f}} \exp\left(-\frac{\Delta f^2}{2\sigma_{\Delta f}^2}\right) d\Delta f \quad (23)$$

在实际应用中, 由用户设置 P_{fa} 值, 即可根据式(23)计算出当前 P_{fa} 条件下应取的 η 值。

4 实验分析

本文提出的虚假目标判别方法适用于各型相参体制雷达, 通过多型现役装备上的实际应用, 验证了本文方法对杂波剩余假航迹干扰、航迹欺骗干扰等虚假目标判别的有效性。本节选取其中的典型实验结果予以说明。

图 2 为对杂波剩余假航迹干扰的判别实验结果, 所选雷达记为 I 型雷达, 其典型工作参数见表 1。图 2(a) 为某次雷达扫描接收到的目标回波, 目标中心位于“距离单元 51, 方位单元 42”处, 经事后印证查明, 该目标为强杂波区内误起批的杂波剩余假航迹干扰。由航迹数据估计可得目标径向速度为 256 m/s, 航迹多普勒为 2193 Hz, 经航迹速度修正可得“时域估计多普勒”为 113 Hz, 如图 2(b) 中虚线位置所示。基于傅里叶分析获得目标回波频谱如图 2(b) 中实线所示, 可得“频域估计多普勒”为 0.15 Hz, 频率差值 $|\Delta f| = 112.85$ Hz。设置典型虚警概率值 $P_{fa} = 10^{-6}$, 根据雷达测距误差、积累脉冲数、重复周期等, 计算可得似然比判决表达式门限约为 $\eta = 10$ Hz。 $|\Delta f| > \eta$, 成功将该批空情判为虚假目标, 判别结果与印证查明结论一致。

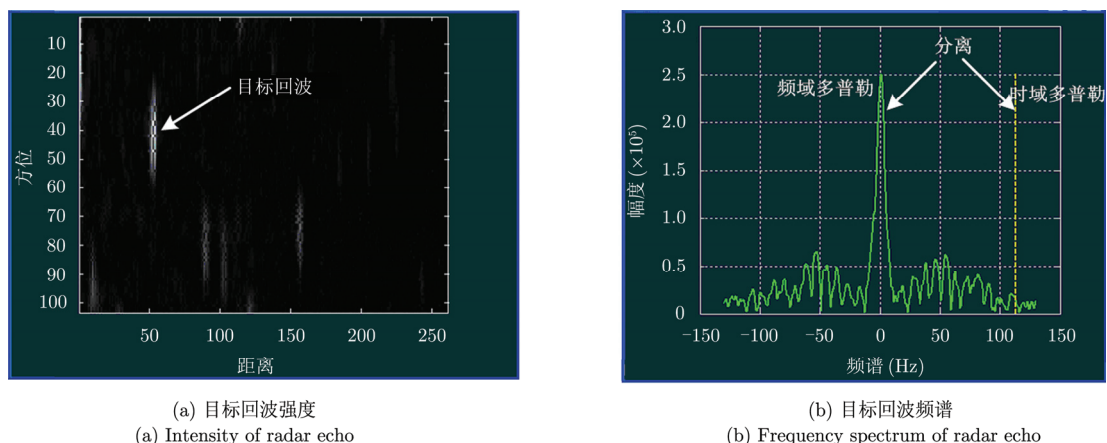


图2 防空雷达虚假目标判别实例(雷达: L波段两坐标雷达, 类型: 杂波剩余假航迹干扰)

Fig. 2 False target discrimination result (Radar: L band 2-D, target type: clutter residual false track)

表1 防空雷达主要指标参数列表

Tab. 1 List of main parameters of experimental radars

雷达参数	I型防空雷达	II型防空雷达
雷达体制	相参脉冲压缩	相参脉冲压缩
工作频段	L	VHF
脉冲重复频率(Hz)	260	217
天线扫描周期(s)	10	20

图3为对航迹欺骗干扰的判别实验结果, 所选雷达同样为I型雷达。此次实验选用国内某单位研制生产的便携式欺骗干扰设备, 固定部署于雷达附近, 通过存储转发方式从雷达旁瓣注入干扰信号, 并按照航迹速度100 m/s调制多普勒频率, 形成虚假目标航迹。对于此次扫描, “时域估计多普勒”约为113 Hz, “频域估计多普勒”约为77 Hz, $|\Delta f|=36$ Hz, $|\Delta f| > \eta$, 同样将该批空情判为虚假目标。

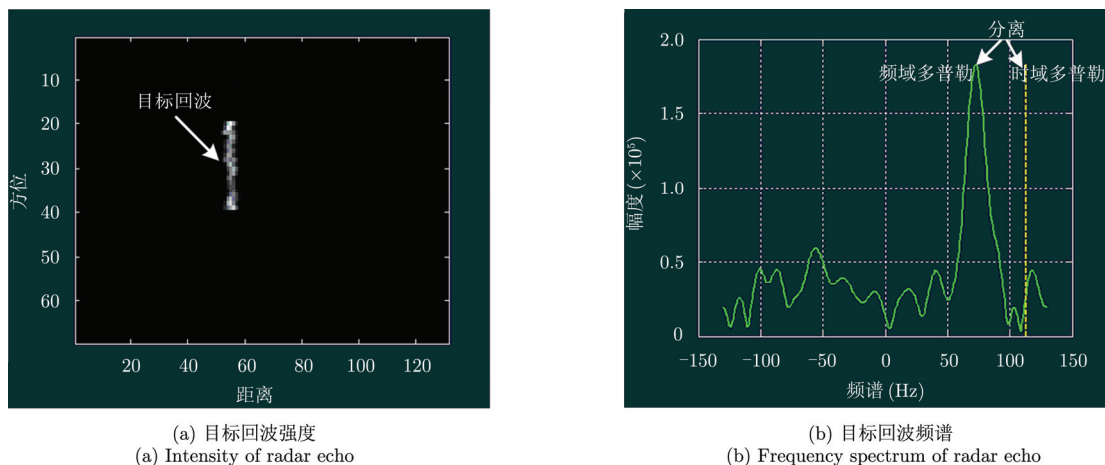


图3 防空雷达虚假目标判别实例(雷达: L波段两坐标雷达, 类型: 航迹欺骗干扰)

Fig. 3 False target discrimination result (Radar: L band 2-D, target type: false track deception)

为进行对比验证, 进一步给出判别真实目标的应用实例, 实验结果如图4所示, 所选雷达为II型雷达, 其典型工作参数见表1, 经事后印证查明, 本批目标为大型民航飞机。对于此次扫描, “时域估计多普勒”约为91 Hz, “频域估计多普勒”约为96.5 Hz, 频率差值 $|\Delta f|=5.5$ Hz。设置典型虚警概率 $P_{fa}=10^{-6}$, 根据II型雷达参数计算可得门限 $\eta=24$ Hz。 $|\Delta f| < \eta$, 成功将该空情判为真实目标, 判别结果与印证查明结论一致。

5 结论

针对防空雷达虚假目标判别问题, 本文将“频域估计多普勒频率值与时域估计多普勒频率值是否一致”作为虚假目标判别依据, 提出一种全新的基于航迹速度修正频谱分析的虚假目标判别方法, 将虚假目标判别归结为二元假设检验问题, 利用统计检验方法实现了对虚假目标的有效判别, 基于采集实际的防空雷达数据验证了方法的有效性。

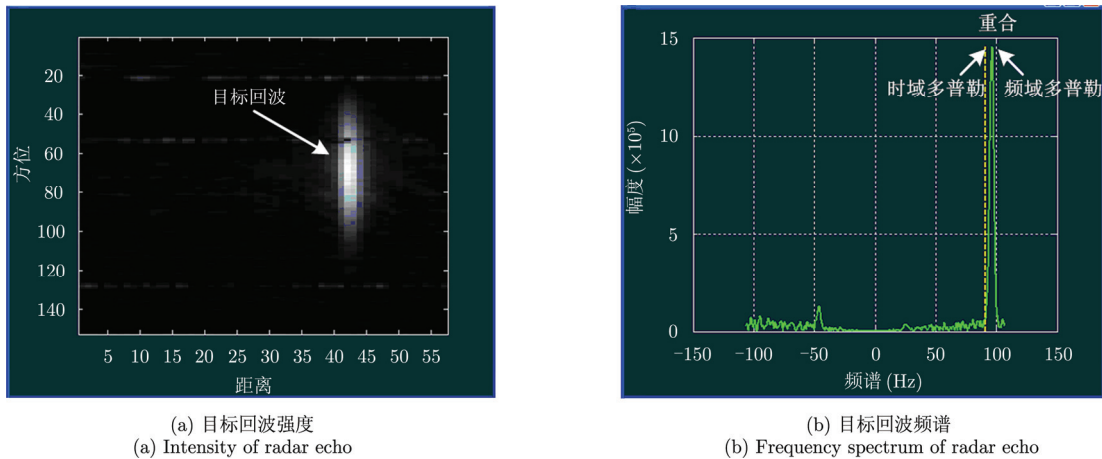


图4 防空雷达真实目标判别实例(雷达: VHF 波段两坐标雷达, 目标类型: 大型民航飞机)

Fig. 4 Real target discrimination result (Radar: VHF band 2-D, target type: civil aircraft)

需要说明的是, 若欺骗干扰设备性能先进, 能够在欺骗航迹持续时间内准确调制出与目标实时航迹严格吻合的实时多普勒频率, 本文方法对此将难以判别, 如何判别此类航迹欺骗干扰将在后续研究工作中重点开展。

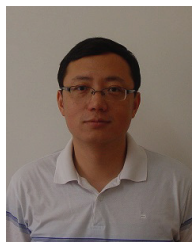
参考文献

- [1] 酈能敬, 王被德, 沈齐, 等. 对空情报雷达总体论证理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 31-36.
Li Neng-jing, Wang Bei-de, Shen Qi, *et al.* Air Surveillance Radar System Analysis: Principles and Practice[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 31-36.
- [2] 鲁晓倩. 组网雷达航迹干扰研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2007: 51-52.
Lu Xiao-qian. Study of netted radar track jamming[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2007: 51-52.
- [3] 倪建春, 王宝. 有源欺骗干扰及雷达反对抗策略研究[J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(3): 5-8.
Ni Jian-chun and Wang Bao. Research into the active deception jamming and radar counter-countermeasure[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2011, 34(3): 5-8.
- [4] 李森, 李彦志, 司瑾, 等. 一种警戒雷达航迹干扰方法及其仿真研究[J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(5): 19-23.
Li Sen, Li Yan-zhi, Si Jin, *et al.* A jamming method to surveillance radar track and its simulation analysis[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2011, 34(5): 19-23.
- [5] 周续力. 对搜索警戒雷达的距离欺骗和航迹欺骗研究[D]. [硕士学位论文], 中北大学, 2008: 26-27.
Zhou Xu-li. Research on rang deception and track deception against surveillance and warning radar[D]. [Master dissertation], North University of China, 2008: 26-27.
- [6] 窦泽华, 张仕元, 李明. 基于雷达回波识别的杂波抑制[J]. 信号处理, 2009, 25(8): 1193-1197.
Dou Ze-hua, Zhang Shi-yuan, and Li Ming. Clutter suppression based on radar return classification[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(8): 1193-1197.
- [7] 窦泽华, 李明, 张仕元. 基于神经网络的杂波抑制[C]. 第十届全国雷达学术年会, 北京, 2008, 10: 221-224.
Dou Ze-hua, Li Ming, and Zhang Shi-yuan. Clutter suppression based on neural network[C]. The 10th Radar Conference of China, Beijing, 2008, 10: 221-224.
- [8] 王银波. 多雷达视频融合系统设计[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2009: 24-26.
Wang Yin-bo. Multi-radar digital video fusion system design[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2009: 24-26.
- [9] 马原. 多雷达融合后的弱小目标跟踪技术研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2009: 11-12.
Ma Yuan. Study of dim-target detection based on multi-radar data fusion[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2009: 11-12.
- [10] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 237-272.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technique[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 237-272.
- [11] 刘福声, 罗鹏飞. 统计信号处理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 132-155.
Liu Fu-sheng and Luo Peng-fei. Statistical Signal Process[M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 1999: 132-155.
- [12] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 72-74.
Lin Mao-yong and Ke You-an. Radar Signal Theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984: 72-74.

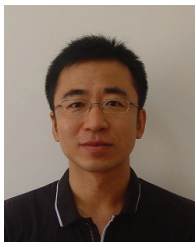
作者简介



王华彬(1965-),男,河北隆尧人,国防科技大学工学硕士,空军装备研究院雷达与电子对抗研究所副所长,高级工程师。研究方向为预警监视体系及型号论证、雷达工程、预警监视作战仿真等,获军队科技进步一等奖 5 项,二等奖 3 项,发表论文二十余篇。



王 成(1977-),男,陕西西安人,国防科技大学工学博士,空军装备研究院雷达与电子对抗研究所主任,高级工程师。研究方向为雷达信号处理、雷达组网数据融合、预警监视作战仿真等,获军队科技进步一等奖 2 项,发表论文十余篇。



徐 牧(1979-),男,黑龙江哈尔滨人,国防科技大学工学博士,空军装备研究院雷达与电子对抗研究所工程师。研究方向为雷达工程、雷达信号处理、雷达目标识别等,获军队科技进步一等奖 2 项,发表论文十余篇。



赵庆全(1973-),男,四川夹江人,中国人民解放军军械工程学院工学硕士,空军装备研究院雷达与电子对抗研究所副主任,高级工程师。研究方向为雷达工程,获军队科技进步一等奖 3 项,二等奖 1 项。