

T/R-R 型双基地系统识别欺骗式假目标

杨 林 徐 晖 孙仲康

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

摘 要 本文提出一种利用 T/R-R 型双基地系统识别欺骗式假目标的方法。在给出双基地系统数据相关算法的基础上,提出了真假目标的识别准则,仿真实验表明,该方法在电子战条件下识别欺骗式假目标是行之有效的。

关键词 欺骗式假目标, 双基地系统, 识别, 点迹相关

分类号 TN974

Identification Method of False-Targets in T/R-R Bistatic Radar System

Yang Lin Xu Hui Sun Zhongkang

(Institute of Electronic Engineering, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract This paper presents an identification method of deception false targets in bistatic radar system. On the basis of the data correlation algorithm in bistatic radar system, the identifying rules of the real and the false targets are provided. The experimental simulations show that the method is effective to identify the false targets in the condition of EW.

Key words false targets, bistatic radar system, identification, measurement correlation.

1 有源欺骗式假目标

欺骗式干扰指的是人为地模拟雷达目标信号特性,使雷达获得假的信息,从而使欺骗意图得以实现。用应答式干扰机对警戒雷达进行假目标干扰^[1],因为假目标和目标信号混杂在一起不易分辨,使敌警戒雷达提供错误情报,在很大程度上迷惑敌人而使其兵力分散。欺骗式干扰对跟踪雷达产生距离牵引、角度牵引、速度牵引,增大跟踪误差,甚

至使被跟踪的真目标完全丢失。欺骗式干扰的特点就是干扰信号具有与雷达目标信号同样的形式，并加上各种假信息的调制。所以，雷达目标信号与欺骗式干扰信号既有共同点也有不同之处，只有存在共同点，才能使信号的真假难以识别，同时也只有存在差别，干扰信号才能达到欺骗的目的（距离、方位、速度）。本文中只考虑如何识别干扰机产生的对于警戒雷达的欺骗式干扰（假目标）。下面讨论对于搜索警戒雷达的有源假目标干扰的两种主要形式（距离欺骗假目标、角度欺骗假目标）。

1.1 距离欺骗假目标

这种技术的目的并不是想使雷达得不到真实的反射信号，也不是使它得不到目标回波到达雷达接收机的时间，其目的是在偏离目标的不同位置上给雷达产生许多假目标，使得该雷达不能区分真假。因此，尽管真实目标包含在显示出的许多目标之内，但若雷达没有识别真假目标的能力，则必然将所有目标都作为真实目标处理。

为了能够在真实目标之前的位置上产生假目标，这种 ECM 技术必须依赖于雷达载频或波形至少在相邻两个脉冲间隔保持稳定（脉冲多普勒雷达本身要求载频及脉冲重复频率特别稳定，所以这种雷达特别容易受到该 ECM 技术的干扰）。若雷达采用载频捷变，重频捷变及波形捷变技术，则 ECM 系统无法在真实目标之前产生假目标。

1.2 角度欺骗假目标

目标发射的电磁波或目标反射雷达探测信号对于雷达接收机的到达角定义为雷达接收天线主波束的指向角。根据这个定义，若某个信号被雷达接收并检测到，那么这个信号源（电磁辐射源或被探测目标的反射信号）肯定处于该雷达天线的主波束之中。然而，如果信号从接收天线主波束之外的旁瓣进入，且信号功率超过了雷达的目标检测门限，雷达的结论也是该信号源位于主波束之中。角度欺骗假目标正是利用了雷达测角的这一弱点实施对雷达的角度欺骗，即干扰信号从旁瓣进入天线。超低旁瓣天线及天线的旁瓣对消和旁瓣匿隐技术对于这种假目标干扰具有较强的削弱能力。

如果干扰发射机功率足以补偿旁瓣损失，并在主瓣、旁瓣上都施放干扰，就可以在雷达显示设备上形成很多批的假目标。如果只在旁瓣上施放干扰，而在主波瓣上不施放干扰，若干扰的功率远大于真目标回波的功率，则雷达就无法根据假目标所出现的方向来判断目标的真实方向，因而欺骗效果更大。

本文研究二维 T/R-R 双基地雷达系统识别有源欺骗式假目标的方法。T/R 站发射雷达电磁波信号照射目标，测量目标距离、方位角，R 站不发射电磁波信号，接收目标的反射回波，测量距离和、方向角，两站之间满足时间、空间、相位同步关系。在电子战环境下，T/R 站发射电磁波，容易受到敌方侦察定位并受到干扰；R 站隐蔽工作，被动测量目标回波信号，因此干扰机很难将波束方向对准 R 站进行干扰。考虑欺骗式干扰机对准 T/R 站施放假目标信号，由于干扰波束宽度有限，若 R 站接收不到假目标信号，则利用 R 站的观测信息即可判断假目标的存在。适应电子战环境，文中主要研究 R 站也接收到假目标信号情况下，如何判断假目标的存在。由于假目标产生器（False Targets Generator）在不知 R 站的存在或其具体位置的情况下，很难形成在 T/R 站和 R 站看来都在同一位置的假目标。这一事实成为判断假目标是否存在及进行识别的依据。

2 T/R-R 型双基地雷达系统目标定位及误差计算

这里仅给出 R 站利用距离和以及到达角信息的被动定位及误差协方差计算公式, 受篇幅限制, T/R 站的定位及误差协方差计算公式略^[2]。设 ρ_R 表示电磁波由 T/R 站发射, 经目标反射到达 R 站的距离, φ_R 表示在 R 站的目标回波的到达角。 $(x_T, y_T)^T, (x_R, y_R)^T$ 分别表示发射站与接收站的站址, $(x, y)^T$ 表示目标位置。

$$\text{定位方程: } \begin{cases} \rho_R = \sqrt{(x - x_T)^2 + (y - y_T)^2} + \sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2} \\ \varphi_R = \text{tg}^{-1} \frac{y - y_R}{x - x_R} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{目标位置为: } \begin{cases} x = x_R + r_R \cos(\varphi_R) \\ y = y_R + r_R \sin(\varphi_R) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{其中 } r_R \text{ 表示目标到 R 站的距离, 为: } r_R = \frac{\rho_R^2 - [(x_R - x_T)^2 + (y_R - y_T)^2]}{2[\rho_R + (x_R - x_T)\cos\varphi_R + (y_R - y_T)\sin\varphi_R]} \quad (3)$$

$$\text{由于测量数据是有误差的, 即 } \begin{cases} \rho_R^m = \rho_R + d\rho_R \\ \varphi_R^m = \varphi_R + d\varphi_R \end{cases} \quad (4)$$

$d\rho_R, d\varphi_R$ 分别表示 R 站测距离和误差与测方向角误差。实际应用时, 由于不可能获得真实数据 ρ_R, φ_R , 通常利用实测数据 ρ_R^m, φ_R^m 代替其真实数据 ρ_R, φ_R , 从而得到有误差的目标位置的近似值。

文献 [2] 中给出了利用 ρ_R, φ_R 求解目标位置的定位误差分析, 限于篇幅这里不作详细推导只给出结果。文中还说明了目标位置在直角坐标系中的误差 $(dx, dy)^T$ 与测量误差 $(d\rho_R, d\varphi_R)^T$ 在一阶近似意义下成线性关系, 而且高斯分布仍然有效, 因此 $dX = (dx, dy)^T$ 是零均值高斯分布的随机变量。

$$\text{定位误差协方差矩阵为: } P_{dx} = E [dX \ dX^T] = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \frac{1}{|C|^2} \left[\frac{\cos^2 \varphi_R}{r_R^2} \sigma_{\rho_R}^2 + (c_{R2} + c_{T2})^2 \sigma_{\varphi_R}^2 \right] \\ \sigma_{xy} = \frac{1}{|C|^2} \left[\frac{\sin^2 \varphi_R}{2r_R^2} \sigma_{\rho_R}^2 - (c_{R1} + c_{T1})(c_{R2} + c_{T2}) \sigma_{\varphi_R}^2 \right] \\ \sigma_y^2 = \frac{1}{|C|^2} \left[\frac{\sin^2 \varphi_R}{r_R^2} \sigma_{\rho_R}^2 + (c_{R2} + c_{T2})^2 \sigma_{\varphi_R}^2 \right] \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中 } |C| = \frac{(c_{R1} + c_{T1})\cos\varphi_R}{r_R} + \frac{(c_{R2} + c_{T2})\sin\varphi_R}{r_R} \quad (7)$$

$$c_A = \frac{x - x_i}{r_i}, \quad c_D = \frac{y - y_i}{r_i}, \quad (i = R, T) \quad (8)$$

3 双基地系统点迹相关识别假目标方法

3.1 双基地系统中点迹相关处理

设目标实际位置为 $Z = (x, y)^T$, 设 T/R 站观测目标位置为 $Z_1 = (x_1, y_1)^T$, R 站观测目标位置为 $Z_2 = (x_2, y_2)^T$, 判断 Z_1, Z_2 是否为对于同一个目标的位置求解, 称之

为点迹相关问题 (measurement correlation)^[3]。假设 Z_1 、 Z_2 是 T/R 站与 R 站对于同一个目标的位置解，即

$$\begin{cases} Z_1 = Z + dZ_1 \\ Z_2 = Z + dZ_2 \end{cases} \quad (9)$$

因此 $Z_1 - Z_2 = dZ_1 - dZ_2$ (10)

其中 $dZ_1 = (dx_1, dy_1)^T$, $dZ_2 = (dx_2, dy_2)^T$ 分别为 T/R 站、R 站关于目标位置的直角坐标系中的误差， dZ_1 、 dZ_2 是彼此近似独立的服从零均值高斯分布的随机变量，则 $Z_1 - Z_2$ ， $dZ_1 - dZ_2$ 也是服从零均值高斯分布的随机变量。

$$Z_1 - Z_2 \text{ 的概率密度为: } p(Z_1 - Z_2) = \frac{1}{2\pi \det|\Sigma|} \exp[(Z_1 - Z_2)^T \Sigma^{-1} (Z_1 - Z_2)] \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Sigma &= E[(Z_1 - Z_2)^T (Z_1 - Z_2)] = E[(dZ_1 - dZ_2)^T (dZ_1 - dZ_2)] \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 & \sigma_{x_1 y_1} + \sigma_{x_2 y_2} \\ \sigma_{x_1 y_1} + \sigma_{x_2 y_2} & \sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\sigma_{x_i}^2 = E(dx_i^2)$, $\sigma_{y_i}^2 = E(dy_i^2)$, $\sigma_{x_i y_i} = E(dx_i \cdot dy_i)$, $i = 1, 2$ (13)

令 $\sigma_x^2 = \sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2$, $\sigma_y^2 = \sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2$ (14)

$$\rho = \frac{\sigma_{x_1 y_1} + \sigma_{x_2 y_2}}{\sqrt{(\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2)(\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2)}} \quad (15)$$

则 $\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho \sigma_x \sigma_y \\ \rho \sigma_x \sigma_y & \sigma_y^2 \end{bmatrix}$ (16)

$d_{12} = (Z_1 - Z_2)^T \Sigma^{-1} (Z_1 - Z_2)$ 是 Z_1 、 Z_2 之间的马氏距离，且服从 χ^2 分布。

式中 $Z_1 - Z_2 = dZ = (x_1 - x_2, y_1 - y_2)^T = (dx, dy)^T$ (17)

对 dx , dy 作如下坐标旋转变换: $\begin{cases} \Delta x = dx \sin \varphi + dy \cos \varphi \\ \Delta y = dx \cos \varphi - dy \sin \varphi \end{cases}$ (18)

其中 $\varphi = 0.5 \text{tg}^{-1}(\frac{2\rho\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2})$ (19)

因此 $p(dZ) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[-\frac{a^2 b^2}{2(1-\rho^2)\sigma_x^2\sigma_y^2} \left(\frac{\Delta x^2}{a^2} + \frac{\Delta y^2}{b^2}\right)\right]$ (20)

其中: $\begin{cases} a^2 = \sigma_x^2 \cos^2 \varphi + \sigma_y^2 \sin^2 \varphi + \rho \sigma_x \sigma_y \sin(2\varphi) \\ b^2 = \sigma_x^2 \sin^2 \varphi + \sigma_y^2 \cos^2 \varphi - \rho \sigma_x \sigma_y \sin(2\varphi) \end{cases}$ (21)

令 $\frac{a^2 b^2}{2(1-\rho^2)\sigma_x^2\sigma_y^2} \left(\frac{\Delta x^2}{a^2} + \frac{\Delta y^2}{b^2}\right) = c^2$ (22)

且 $A = \frac{a^2 b^2}{2(1-\rho^2)\sigma_x^2\sigma_y^2}$ (23)

令 $\begin{cases} \Delta x = ra \cos \theta \\ \Delta y = rb \sin \theta \end{cases}$ (24)

因此 dZ 属于误差椭圆 $d_{12} \leq c^2$ 内的概率为:

$$P = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \int_0^{\frac{c}{\sqrt{A}}} \int_0^{2\pi} abre^{-A r^2} dr d\theta \quad (25)$$

$$\text{于是} \quad c^2 = -\ln\left(1 - \frac{P \cdot a \cdot b}{\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}}\right) \quad (26)$$

这样数据相关问题即为在一定置信概率 P 条件下的统计判决问题:

$d_{12} \leq c^2$, H_0 成立, 即认为 T/R 站与 R 站的观测数据来源于同一个目标;

$d_{12} > c^2$, H_1 成立, 认为 T/R 站与 R 站的观测数据来自不同的目标。

将上述判决准则应用于双基地系统识别欺骗式假目标, H_0 定义的事件为双站的观测来源于一个共同的真目标, H_1 定义的事件为双站的观测不是来源于一个共同的真目标。

3.2 双基地系统识别假目标方法

假设 T/R 站在一个扫描周期内观测到 m_1 个目标, 观测点迹集合为 $S_1 = [Z_{11}, Z_{12}, \dots, Z_{1m_1}]$, R 站观测到 m_2 个目标, 观测点迹集合为 $S_2 = [Z_{21}, Z_{22}, \dots, Z_{2m_2}]$ 。从 S_1 、 S_2 中各取一测量值构成一匹配对 $[Z_{1i}, Z_{2j}]$ ($i \in [1, 2, \dots, m_1]$, $j \in [1, 2, \dots, m_2]$), 所有匹配对构成一个匹配集合: $T = \{ [Z_{1i}, Z_{2j}]_{\substack{i \in [1, 2, \dots, m_1] \\ j \in [1, 2, \dots, m_2]}} \}$, 该集合中共有 $m_1 \times m_2$ 个匹配对。

计算所有匹配对内部两元素之间的马氏距离 $d_{[Z_{1i}, Z_{2j}]}$, 与门限 $c_{[Z_{1i}, Z_{2j}]}$ 比较, 作统计判决, 若 H_0 成立则该匹配对称为相关匹配对, H_1 成立则该匹配对称为不相关匹配对。

$p(Z_{1i} - Z_{2j}) = \frac{1}{2\pi \det |\Sigma_{[Z_{1i}, Z_{2j}]}|} \exp\{-(Z_{1i} - Z_{2j})^T \Sigma_{[Z_{1i}, Z_{2j}]}^{-1} (Z_{1i} - Z_{2j})\}$ 称作相关概率。

以下给出识别真假目标的几个准则:

(1) 一观测站的某个观测数据不能与另一观测站的任何观测数据构成相关匹配对, 则该观测数据判定为假目标数据。

(2) 一观测站的某个观测数据能与另一观测站的多个观测数据构成相关匹配对, 则认为具有最大相关概率的匹配对形成最终的相关匹配, 该匹配对内的元素不再与其它观测数据作相关匹配判决。

(3) 将所有的相关匹配对依相关概率自大到小排序, 根据准则 2 保留真目标数据, 剔除假目标数据。

4 仿真实验及结论

仿真实验只考虑干扰机施放距离欺骗假目标, 且只出现一个假目标信号。实际电子战环境下往往是大批假目标, 在真目标回波也能被接收到的情况下, 本文考虑的这个假目标是所有假目标中与真目标位置最为靠近的, 若该假目标能识别出来, 则其它假目标也能识别出来。本文考虑假目标与真目标的间距、观测站的测量精度、双基地系统的布站等因素对于识别效果的影响。在固定条件下作 100 次 Monte Carlo 仿真计算, 识别率定义为真目标识别出来的次数与仿真次数之比。只有当真实目标数据组成的匹配对既构成相关匹配且具有最大相关概率时, 才认为真目标识别出来, 同时假目标数据相应地也识别出来。限于篇幅这里只给出几组数据说明。表 1 给出了文中各仿真实验的条件。其中 Δ 表示真目标位置与假目标位置的间距 (单位: km), σ_r 表示 R 站测距离和精度 (单位:

km), σ_r 表示 T/R 站测距精度 (单位: km), σ_{φ_1} 表示 R 站测方向角精度 (单位: 弧度), σ_{φ_2} 表示 T/R 站测方位角精度 (单位: 弧度), T/R 站、R 站位置的单位是 km。

表 1

| 表 4-0 | T/R 站位置 | R 站位置 | Δ | σ_ρ | σ_r | σ_{φ_1} | σ_{φ_2} |
|-------|---------|----------|----------|---------------|------------|----------------------|----------------------|
| 条件 1 | (0, 0) | (0, 80) | 1 | 0.05 | 0.05 | 0.001 | 0.001 |
| 条件 2 | (0, 0) | (0, 80) | 0.5 | 0.05 | 0.05 | 0.001 | 0.001 |
| 条件 3 | (0, 0) | (0, 80) | 1 | 0.025 | 0.025 | 0.001 | 0.001 |
| 条件 4 | (0, 0) | (0, 80) | 1 | 0.05 | 0.05 | 0.002 | 0.002 |
| 条件 5 | (0, 0) | (0, 120) | 1 | 0.05 | 0.05 | 0.001 | 0.001 |

图 1~图 5 给出了对应各条件的识别率图, 图中 x, y 表示目标位置 (单位都是 km), z 坐标表示相应位置的识别率。相关匹配时置信概率都取作 $P=0.9999$ 。对图 1~图 5 分析不难看出, 文中讨论的真假目标的识别方法是行之有效的。从各图中的结果可以得出以下结论:

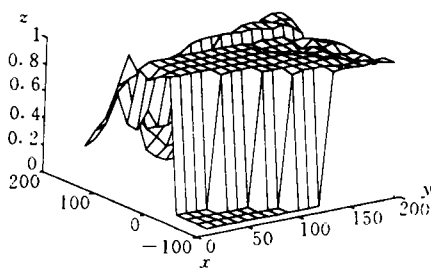


图 1

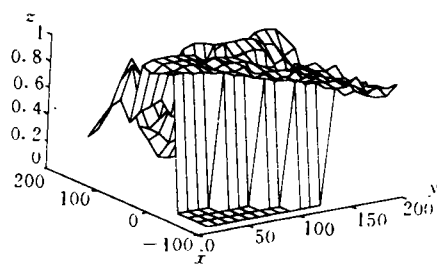


图 2

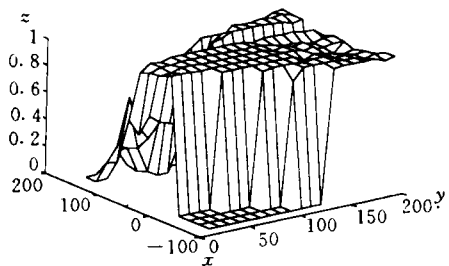


图 3

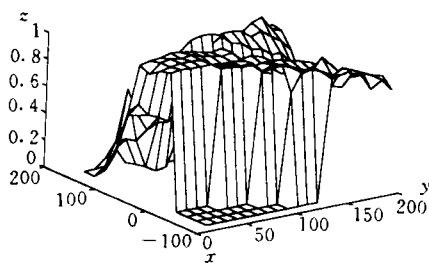


图 4

(1) 不同区域的识别效果相差很大, 高识别率区域集中在从 T/R 站和 R 站辐射出的扇形区域;

(2) 与 R 站横坐标相同的区域附近识别率降低;

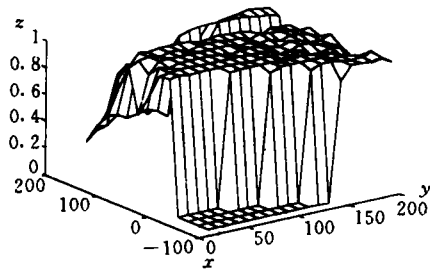


图 5

(3) 测角精度对于识别率影响很大；测距精度对识别率的影响程度相对较低；

(4) 在远离观测站一定区域，真假目标之间的间距越小识别率越低；另一方面当间距增大到一定程度，识别率可以达到 100%；

(5) 布站方式即 R 站的位置改变对于各区域的识别率也有程度不同的影响。

参 考 文 献

- 1 Van Brunt, L. B., Applied ECM v. 1. Dunn Loring Va., EW Engineering, Inc, 1978
- 2 孙仲康等. 单/多基地有源无源定位技术. 国防工业出版社, 1996
- 3 C. B. Chang, L. C. Youens. Measurement Correlation for Multiple Sensor Tracking in a Dense Target Environment, IEEE Trans on Automatic Control. Vol. Ac-27, No. 6 Dec 1982: 1250~1252

(责任编辑 潘 生)