

一种空间不可分辨多目标存在性检测的新方法

赵 锋, 毕 莉, 闵 涛, 王雪松, 肖顺平

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 在弹道导弹防御中, 空间不可分辨多目标对地基防御雷达的跟踪、识别和制导均构成了严重威胁, 雷达必须采取特殊手段来对其进行处理, 而对其存在性的检测则是其他所有处理的前提和基础. 实验表明, 当存在不可分辨多目标时, 线性调频脉冲信号脉冲压缩输出主瓣的相位将发生剧烈变化, 而在单目标条件下则相对缓慢, 这就为不可分辨多目标存在性检测提供了新的思路. 本文提出了采样相位差模型, 分析推导了单目标和多目标条件下采样相位差的统计特性, 并以此为依据, 采用广义似然比检测法对不可分辨多目标的存在进行检测. 最后, 蒙特卡洛仿真结果验证了本文算法的有效性和可行性.

关键词: 线性调频脉冲; 相位特性; 不可分辨多目标; 采样相位差; 广义似然比

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 10-2258-06

A New Method for Detecting the Presence of Multiple Unresolved Targets

ZHAO Feng, BI Li, MIN Tao, WANG Xue-song, XIAO Shun-ping

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: In ballistic missile defense, the situation of unresolved targets is of great threaten to the tracking, identification and guidance of ground based radars, and some special efforts must be adopted to deal with it, among which the detection of the presence of unresolved targets is the precondition and basis of all the others. It is indicated by tests that, when multiple unresolved targets exist, the main lobe's phase of LFM pulse compress output changes tempestuously, other than single target case where the phase changes tardily. The difference between those two cases above can provide a new way to detect the presence of unresolved targets. In this paper, the model of sample phase error is put forward, and its statistic characteristics under the condition of single target and multiple unresolved targets are derived. Based on what above, a general likelihood ratio test is developed to detect the presence of unresolved targets. Finally, the Monte Carlo simulation result identifies the validity of the models.

Key words: linear frequency modulation (LFM); phase characteristics; multiple unresolved targets; sample phase error; general likelihood ratio

1 引言

众所周知, 雷达通常从距离(时域)、角度(空域)和径向速度(频域)上对多目标进行分辨, 其中距离分辨率由信号带宽决定, 角度分辨率由 3dB 波束宽度决定, 而径向速度分辨率则由相参信号的累积时间决定^[1]. 当空间多个目标之间的位置和速度差很小, 以至于上述三种途径均无法进行分辨时, 就称这些目标为空间不可分辨目标. 在弹道导弹防御背景下, 如果导弹防御雷达对不可分辨多目标情况缺乏特殊处理能力, 将会带来一系列的严重后果. 对不可分辨多目标的检测和估计对于弹道导弹防御雷达来说是一个迫切需要解决的问题, 而其中对其存在性的检测则是解决其他问题前提和基础.

长期以来, 对于空间不可分辨多目标的检测算法绝

大部分都是利用的目标的方位信息^[2~12], 归纳起来, 这些方法所依据的物理本质是密集多目标存在条件下的角闪烁效应^[13], 这对于防御飞机等近程空中目标的雷达来说比较有效, 但是对于作用距离动辄几千公里的弹道导弹防御雷达来说, 上述方法不再适用. 因为对于远程和超远程雷达来说, 由于其径向分辨率远胜于切向分辨率, 因此在径向上仍处于同一分辨单元内的目标, 角闪烁噪声所形成的雷达测角误差很小^[14], 相对于噪声误差来说可以忽略不计. 换句话说, 目标的方位信息属于切向信息, 它依赖于目标的径向距离, 当目标的径向距离很大时(如几千公里), 上百米的目标切向距离所引起的角度差也是微乎其微的.

线性调频脉冲信号是目前大型相控阵雷达普遍采用的信号形式^[15], 单目标条件下, 脉冲压缩输出主瓣内

的相位随时间变化缓慢,变化率为目标多普勒频率;而当多个目标位于雷达同一分辨单元内时,主瓣内相位将产生剧烈变化,这就为弹道导弹防御雷达对不可分辨多目标存在的检验提供了新的、有效的依据.因此,本文首次提出了采样相位差模型,并对噪声条件下采样相位差的统计特性进行了数学推导;在此基础上,对该特性加以利用,采用广义似然比方法对不可分辨多目标的存在进行检测,给出了检测门限的计算方法.最后给出了蒙特卡洛仿真结果,对本文方法的有效性进行了验证.

2 线性调频信号脉冲压缩输出相位特性

2.1 单目标条件

脉冲压缩输出信号 $s_o(t)$ 可以表示为

$$s_o(t) = aA \cdot u\left(\frac{t - t_0 - \Delta t}{2T}\right) \cdot \exp[j2\pi f_d(t - t_0 - \Delta t) + j\phi] \cdot \frac{\sin\left[\pi B\left(t - t_0 - \Delta t + \frac{f_d}{B}T\right)\left(1 - \frac{|t - t_0 - \Delta t|}{T}\right)\right]}{\pi B\left(t - t_0 - \Delta t + \frac{f_d}{B}T\right)} \quad (1)$$

其中, A 为信号幅度, B 和 T 分别为发射信号的带宽和脉宽, Δt 为回波延时, f_d 为目标的多普勒频移, a 为匹配滤波器的幅度系数, t_0 为滤波器时间延时参数, ϕ 为初始相位. $u(\cdot)$ 为矩形函数,其定义为

$$u(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq 0.5 \\ 0, & |t| > 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

不妨设峰值时刻为零时刻,且记 $\Delta t_d = \frac{f_d}{B}T$,则脉压

输出信号主瓣范围为 $\left[-\frac{1}{B}, \frac{1}{B}\right]$, 相位特性为 $2\pi f_d(t - \Delta t_d) + \phi$. 通常情况下 $f_d \ll B$, 因此在主瓣范围内相位可以近似认为不变.

图 1 给出了加窗和不加窗两种情况下脉压压缩输出信号的相位曲线,其中带宽为 1MHz,对应的主瓣范围为 $(-10^{-6}\text{s}, 10^{-6}\text{s})$,加窗的类型为 Hamming 窗.结果表明,两种情况下主瓣内的相位保持不变.

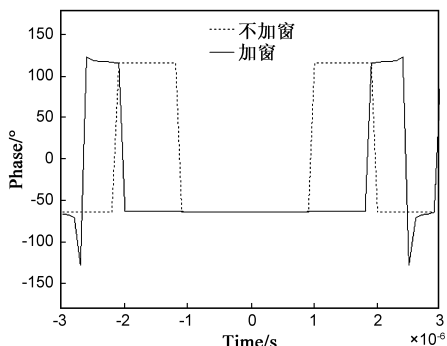


图1 单个目标条件下脉压输出相位特性

2.2 多目标条件

简便起见且不影响问题的说明,这里考虑距离分辨单元内两个目标的情况.令脉压输出信号叠加后的等效峰值点为时间零点,设两个目标脉压输出峰值点时刻分别为 t_1 和 t_2 ,则 $\left[-\frac{1}{B}, \frac{1}{B}\right]$ 内的信号形式为

$$s_o(t) \approx aA_1 \cdot \exp[j2\pi f_d \Delta t_d + j\phi_1] \cdot \text{sinc}[\pi B(t - t_1)] + aA_2 \cdot \exp[j2\pi f_d \Delta t_d + j\phi_2] \cdot \text{sinc}[\pi B(t - t_2)] = A_\Sigma(t) \cdot \exp[j2\pi f_d \Delta t_d + j\phi(t, t_1, t_2, A_1, A_2)] \quad (3)$$

$$\text{其中 } A_\Sigma^2(t) = a^2 \{ A_1 \cos \phi_1 \text{sinc}[\pi B(t - t_1)] + A_2 \cos \phi_2 \text{sinc}[\pi B(t - t_2)] \}^2 + a^2 \{ A_1 \sin \phi_1 \text{sinc}[\pi B(t - t_1)] + A_2 \sin \phi_2 \text{sinc}[\pi B(t - t_2)] \}^2 \quad (4)$$

$$\phi(t, t_1, t_2, A_1, A_2) = \tan^{-1} \frac{A_1 \sin \phi_1 \text{sinc}[\pi B(t - t_1)] + A_2 \sin \phi_2 \text{sinc}[\pi B(t - t_2)]}{A_1 \cos \phi_1 \text{sinc}[\pi B(t - t_1)] + A_2 \cos \phi_2 \text{sinc}[\pi B(t - t_2)]} \quad (5)$$

图 2 给出了该条件下脉冲压缩输出相位曲线的仿真结果,信号的带宽 B 同样为 1MHz,加 Hamming 窗,两个目标之间的间距为距离分辨单元的 $1/5$.结果表明,只要两个目标之间存在距离差,脉冲压缩输出主瓣内的相位特性便会较单目标情况有显著区别.该结论可以很容易地扩展到多目标的情况,这就给密集多目标的存在性检测提供了又一条思路.

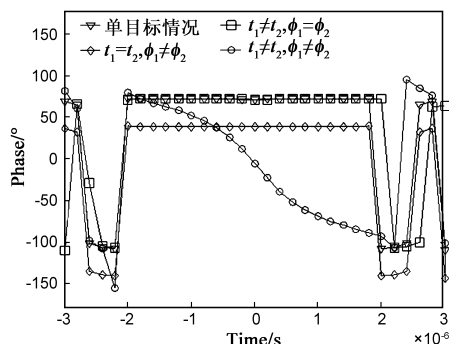


图2 两个目标条件下脉压输出相位特性

3 脉压输出采样相位差及其统计模型

3.1 脉压输出采样相位差

这里对脉压输出时域主瓣的复数信号进行采样,并选取一定间隔的两个采样,分别记为 z_1 和 z_2 ,它们可以由同相和正交两个通道的分量表示为

$$z_1 = z_{11} + jz_{Q1}, \quad z_2 = z_{12} + jz_{Q2} \quad (6)$$

进一步地,各通道的采样观测值可以由信号和噪声叠加的形式表示为

$$z_{11} = s_{11} + n_{11}, \quad z_{Q1} = s_{Q1} + n_{Q1} \quad (7)$$

$$z_{12} = s_{12} + n_{12}, \quad z_{Q2} = s_{Q2} + n_{Q2} \quad (8)$$

其中, s_{n1} 、 s_{n2} 、 s_{Q1} 、 s_{Q2} 为采样的信号部分, n_{n1} 、 n_{n2} 、 n_{Q1} 、 n_{Q2} 则是对应的噪声部分. 通常, 观测噪声可以认为服从零均值高斯分布, 而不同通道之间的噪声不相关. 这里取两个采样的时间间隔为距离分辨单元长度, 则同一个通道的两个采样点噪声之间也不相关. 按照以上规则选取的两个采样点相位之差即为本文所指的脉压输出采样相位差, 以下简称采样相位差, 记为 $\Delta\phi_z$.

3.2 采样相位差统计模型

设距离分辨单元内有 M 个目标, 它们脉压输出的峰值位置分别为 t_1, t_2, \dots, t_M , 幅度最大值分别为 C_1, C_2, \dots, C_M , 回波的初始相位分别为 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M$. 设第一个采样点的时间为 t_{s1} , 则第二个采样点时间为 $t_{s2} = t_{s1} + 1/B$, 线性调频脉冲压缩输出的归一化函数为 $\mathcal{C}(t)$ (以峰值时刻为时间零点), 则两个采样点的正交双通道观测值可以表示为

$$z_{I1} = \sum_{i=1}^M C_i \mathcal{N}(t_{s1} - t_i) \cos \phi_i + n_{I1}, \quad (9)$$

$$z_{Q1} = \sum_{i=1}^M C_i \mathcal{N}(t_{s1} - t_i) \sin \phi_i + n_{Q1}$$

$$z_{I2} = \sum_{i=1}^M C_i \mathcal{N}(t_i - t_{s2}) \cos(\phi_i + 2\pi \frac{f_d}{B}) + n_{I2}, \quad (10)$$

$$z_{Q2} = \sum_{i=1}^M C_i \mathcal{N}(t_i - t_{s2}) \sin(\phi_i + 2\pi \frac{f_d}{B}) + n_{Q2}$$

为了得到采样相位差统计模型, 这里首先研究单个采样相位的统计模型. 不失一般性, 这里以第一个采样为例进行分析. 设正交两个通道的噪声方差相等, 均为 σ_n^2 , 则 z_{I1} 和 z_{Q1} 分别服从均值为 s_{I1} 和 s_{Q1} 、方差为 σ_n^2 的高斯分布. 该采样点的相位 ϕ_{z1} 可以表示为

$$\phi_{z1} = \tan^{-1} \left(\frac{z_{Q1}}{z_{I1}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^M C_i \mathcal{N}(t_{s1} - t_i) \sin \phi_i + n_{Q1}}{\sum_{i=1}^M C_i \mathcal{N}(t_{s1} - t_i) \cos \phi_i + n_{I1}} \right) \quad (11)$$

由于涉及三角函数的运算, 因此, 直接运用概率统计理论中关于随机向量函数分布的计算公式对 ϕ_{z1} 的概率密度函数进行解析求解非常困难, 这里采用图解加拟合的方式间接得到其近似分布.

图 3 给出了高斯噪声条件下 ϕ_{z1} 取值的 100,000 次蒙特卡洛仿真结果, 仿真中设采样点信噪比为 20dB, 无噪声条件下信号的相位 $\phi_{s1} = \tan^{-1} \left(\frac{s_{Q1}}{s_{I1}} \right)$ 为 45° . 图 4 给出了 ϕ_{z1} 分布的高斯函数拟合结果, 其中均值取真值 45° , 方差取根据误差传递公式计算的结果 $\sigma_1^2 = \frac{\sigma_n^2}{B_1^2} (B_1 \triangleq \sqrt{z_{I1}^2 + z_{Q1}^2})$. 从图中较好的拟合效果可以得出结论, 在目标信号相位 ϕ_{s1} 和采样点幅度 B_1 一定的条件下,

ϕ_{z1} 的条件概率密度函数近似为

$$f(\phi_{z1} | \phi_{s1}, B_1) = \frac{B_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp \left[-\frac{B_1^2(\phi_{z1} - \phi_{s1})^2}{2\sigma_n^2} \right] \quad (12)$$

同理, ϕ_{z2} 条件概率密度函数为

$$f(\phi_{z2} | \phi_{s2}, B_2) = \frac{B_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp \left[-\frac{B_2^2(\phi_{z2} - \phi_{s2})^2}{2\sigma_n^2} \right] \quad (13)$$

由于两个采样的噪声相互独立, 则 ϕ_{z1} 和 ϕ_{z2} 的分布也相互独立, 它们的差 $\Delta\phi_z$ 亦服从条件高斯分布, 即

$$f(\Delta\phi_z | \phi_{s1}, \phi_{s2}, B_1, B_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\Delta} \exp \left[-\frac{(\Delta\phi_z - \Delta\phi_s)^2}{2\sigma_\Delta^2} \right] \quad (14)$$

其中

$$\Delta\phi_s = \phi_{s2} - \phi_{s1} =$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^M C_i \mathcal{N}(t_i - t_{s2}) \sin(\phi_i + 2\pi \frac{f_d}{B})}{\sum_{i=1}^M C_i \mathcal{N}(t_i - t_{s2}) \cos(\phi_i + 2\pi \frac{f_d}{B})} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^M C_i \mathcal{N}(t_{s1} - t_i) \sin \phi_i}{\sum_{i=1}^M C_i \mathcal{N}(t_{s1} - t_i) \cos \phi_i} \right) \quad (15)$$

$$\sigma_\Delta^2 = \left(\frac{1}{B_1^2} + \frac{1}{B_2^2} \right) \sigma_n^2 \quad (16)$$

单目标条件下, $M=1$, 则采样相位差服从均值为 $2\pi \frac{f_d}{B}$, 方差为 $\left(\frac{1}{B_1^2} + \frac{1}{B_2^2} \right) \sigma_n^2$ 的条件高斯分布.

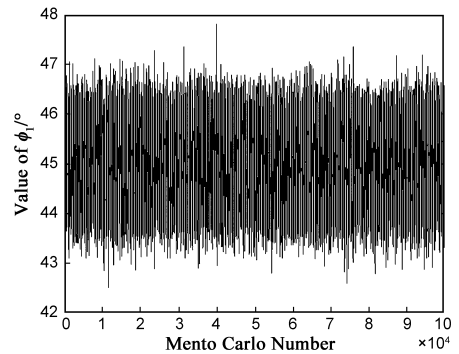


图3 采样点相位蒙特卡洛仿真结果

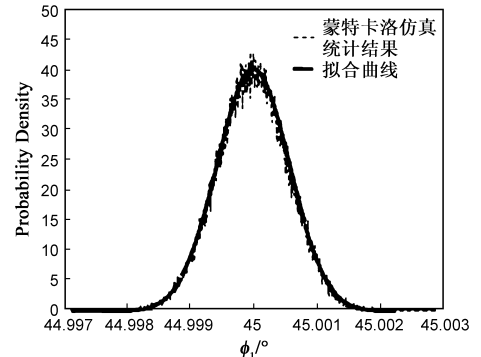


图4 采样点相位统计特性拟合曲线

在多目标条件下, $M > 1$, 可得

$$\Delta\phi_s = 2\pi \frac{f_d}{B} + \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M C_i C_j \mathbf{N}(t_{s1} - t_i) \mathbf{N}(t_{s2} - t_j) \sin(\phi_i - \phi_j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M C_i C_j \mathbf{N}(t_{s1} - t_i) \mathbf{N}(t_{s2} - t_j) \cos(\phi_i - \phi_j)} \right) \quad (17)$$

由于 $\phi_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 服从 $0 \sim 2\pi$ 之间的均匀分布且相互独立, 因此 $\Delta\phi_s$ 也近似为 $0 \sim 2\pi$ 之间的均匀分布, 则 $\Delta\phi_z$ 可以看作两个随机变量的和, 其中一个是服从 $0 \sim 2\pi$ 之间的均匀分布, 另一个服从零均值的高斯分布. 考虑到相位是以 2π 为周期, 则 $\Delta\phi_z$ 服从 $0 \sim 2\pi$ 之间的均匀分布.

4 密集多目标存在性检测算法

这里采用广义似然比准则进行检测. 设雷达共发射了 N 个脉冲, 对于第 n 个脉冲可以获得采样相位差的观测值 $\Delta\phi_{zn}$, 以及两个采样的幅度 B_{n1} 和 B_{n2} , 记 $\mathbf{b}_n = \frac{1}{B_{n1}} + \frac{1}{B_{n2}}, \mathbf{b}_N = (b_1 b_2 \dots b_N)^T, \boldsymbol{\varphi}_N = (\Delta\phi_{z1} \Delta\phi_{z2} \dots \Delta\phi_{zN})^T$. 由于各脉冲测量之间相互独立, 因此在 \mathbf{b}_N 已知的条件下, 采样相位差的观测集 $\boldsymbol{\varphi}_N$ 的联合条件概率密度函数为各次测量值条件概率密度函数的乘积, 即

$$f(\boldsymbol{\varphi}_N | \mathbf{b}_N) = \prod_{n=1}^N f(\Delta\phi_{zn} | b_n) \quad (18)$$

设 H_0 代表单目标情况, H_1 代表多目标情况. 则根据上述分析, 可以得到两种情况下的似然函数分别为

$$f(\boldsymbol{\varphi}_N | H_0, \mathbf{b}_N) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \right)^N |\mathbf{R}_N|^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[-\frac{(\boldsymbol{\varphi}_N - \bar{\boldsymbol{\varphi}}_N)^T \mathbf{R}_N^{-1} (\boldsymbol{\varphi}_N - \bar{\boldsymbol{\varphi}}_N)}{2\sigma_n^2} \right] \quad (19)$$

$$f(\boldsymbol{\varphi}_N | H_1, \mathbf{b}_N) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^N \quad (20)$$

其中

$$\bar{\boldsymbol{\varphi}}_N = (\Delta\phi_0 \Delta\phi_0 \dots \Delta\phi_0)^T \quad (21)$$

$$\mathbf{R}_N = \text{diag}(b_1 b_2 \dots b_N) \quad (22)$$

可以得到广义似然比为

$$L(\boldsymbol{\varphi}_N | \mathbf{b}_N) = \frac{f(\boldsymbol{\varphi}_N | H_1, \mathbf{b}_N)}{\max_{\Delta\phi_0} [f(\boldsymbol{\varphi}_N | H_0, \mathbf{b}_N)]} \quad (23)$$

根据似然函数(19)可以求得 $\Delta\phi_0$ 的最大似然估计 $\Delta\hat{\phi}_0$ 为

$$\Delta\hat{\phi}_0 = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{\Delta\phi_{zn}}{b_n}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{b_n}} \quad (24)$$

记 $\hat{\boldsymbol{\varphi}}_N = (\Delta\hat{\phi}_0 \Delta\hat{\phi}_0 \dots \Delta\hat{\phi}_0)^T$, 将其代入似然比函数(23)可得

$$L(\boldsymbol{\varphi}_N | \mathbf{b}_N) = \frac{|\mathbf{R}_N|^{\frac{1}{2}} \exp \left[\frac{(\boldsymbol{\varphi}_N - \hat{\boldsymbol{\varphi}}_N)^T \mathbf{R}_N^{-1} (\boldsymbol{\varphi}_N - \hat{\boldsymbol{\varphi}}_N)}{2\sigma_n^2} \right]}{\left(\frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_n} \right)^N} \quad (25)$$

记 $Y_N = (\boldsymbol{\varphi}_N - \hat{\boldsymbol{\varphi}}_N)^T \mathbf{R}_N^{-1} (\boldsymbol{\varphi}_N - \hat{\boldsymbol{\varphi}}_N)$, 则根据式(25)可以将检测算法表示为

$$Y_N \stackrel{H_1}{\underset{H_0}{\geq}} \eta \quad (26)$$

η 为检测门限, 其值的确定方法采用 Neyman-Pearson 准则. 根据式(19)可以看出, 在 H_0 的条件下, $\frac{\Delta\phi_{zn} - \Delta\phi_0}{b_n \sigma_n}$ 服从

标准正态分布, 则 $\frac{Y_N}{\sigma_n^2}$ 为 N 个标准正态分布随机变量的平方和, 考虑到 $\Delta\phi_0$ 是 φ_N 的线性组合, 因此 $\frac{Y_N}{\sigma_n^2}$ 服从 $N-1$ 个自由度的 χ 方分布. 记 $\eta' = \eta/\sigma_n^2$, 则检测算法可以变换为

$$\frac{Y_N}{\sigma_n^2} \stackrel{H_1}{\underset{H_0}{\geq}} \eta' \quad (27)$$

在给定虚警概率 P_f 的条件下, η' 可以通过查表获得.

5 仿真结果与分析

仿真中设雷达采用线性调频信号, 带宽为 1MHz, 匹配滤波采用 Hamming 窗, 目标多普勒频移为 f_d . 设置的检测门限对应的虚警概率为 0.01. 蒙特卡洛次数为 10000. 为了简便起见同时不影响问题的说明, 仿真中选取两个目标同时落入分辨单元的情况. 图 5 分别给出了检测概率与信噪比、脉冲个数、目标间距以及单个目标信噪比之间关系的仿真结果曲线. 其中 SNR_1 和 SNR_2 分别代表两个目标的信噪比, T_s 代表采样间隔, ΔT 代表目标之间的间距, M 代表脉冲个数.

对图 5 的四幅图进行分析不难得到以下结论:

(1) 对多目标存在性的检测概率随着目标信噪比的增大而增大. 因为信噪比的增大能够使采样相位分布与高斯过程之间的拟合程度更好, 算法更加准确.

(2) 对多目标存在性的检测概率随着检测脉冲的增加而增大. 脉冲个数的增加意味着统计样本数的增大, 可以使检测统计量的统计特性更加接近于理论推导的结果, 从而提高检测的性能.

(3) 对多目标存在性的检测概率随着目标相对间距的增加而增大. 目标相对间距的增大, 意味着两个采样之间的相位差变化加剧, 更加有利于检测信息的提

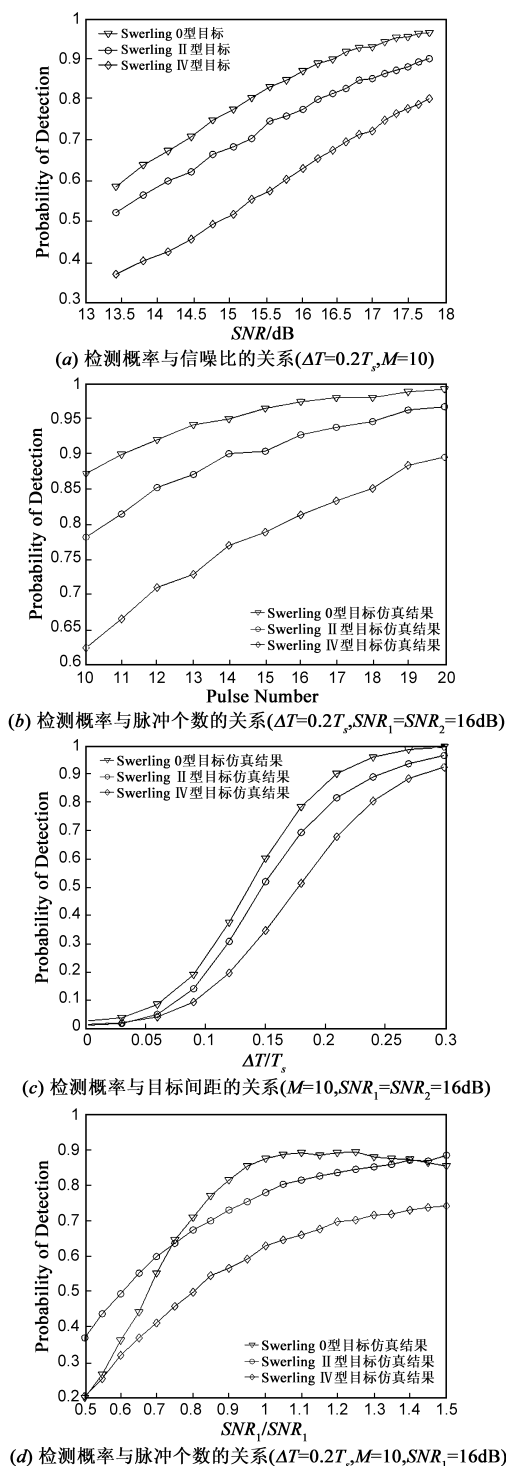


图5 多目标存在性探测概率仿真结果

取和利用,因此雷达可以更容易地鉴别出多目标的存在。

(4)相同条件下,起伏目标比起伏目标的检测性能好,Swierling II型目标条件比 Swierling IV型目标的检测性能好。

(5)目标间的信噪比相差较大时,雷达对多目标存

在性的检测性能会有所下降.实际上,基于采样相位差检测多目标的存在,其依据可以用数学语言描述为:当多个二维矢量的幅度发生不同程度的变化时,它们和矢量的相位将发生变化.当多个目标中的某一个或少数某几个的回波功率相对较大时,等同于上述多个矢量中的某一个或者少数某几个的幅度值占绝对优势,在这种情况下,和矢量相位的变化程度将减小。

6 结束语

距离分辨单元内多目标的存在会产生距离闪烁效应,使得雷达的距离测量误差增大,本文通过所提出的采样比的概念对雷达的距离测量进行表征,对距离闪烁误差信息进行了提取,建立了其观测统计模型.然后,利用距离闪烁效应所带来的距离测量的额外误差信息,采用最大似然比准则对不可分辨多目标的存在进行了检测.与目前绝大多数算法利用方位信息不同的是,本文算法利用的是目标的径向距离信息.由于径向距离信息具有较强的独立性,因此该算法无论在弹道导弹防御这样的远程情况,还是对防空作战这样的中近程场合均适用.仿真实验的结果充分验证了本文算法在各种类型目标条件下的有效性.同时应该看到,径向速度也是径向信息,能否利用单多目标在径向速度特性上的差别来对不可分辨多目标情况进行检测值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 张光义,赵玉洁.相控阵雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2006.45-47.
- Zhang Guangyi, Zhao Yujie. Phased Array Radar Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 45-47. (in Chinese)
- [2] W D Blair, M Brandt-Pearce. Monopulse processing for tracking unresolved targets[R]. ADA-330556. September 1997.
- [3] W D Blair, M Brandt-Pearce. Unresolved Rayleigh target detection using monopulse measurements[J]. IEEE Trans. on AES, 1998, 2(34): 543-552.
- [4] W D Blair, M Brandt-Pearce. Monopulse DOA estimation of two unresolved Rayleigh targets[J]. IEEE Trans. on AES, 2001, 2(37): 452-468.
- [5] W D Blair, M Brandt-Pearce. Statistical description of monopulse parameters for tracking Rayleigh targets[J]. IEEE Trans. on AES, 1998, 2(34): 597-611.
- [6] A Sinha, T Kirubarajan, Y Bar-Shalom. Maximum likelihood angle extractor for two closely spaced targets[J]. IEEE Trans. on AES, 2002, 38(1): 183-203.
- [7] Zhen Wang, A Sinha, P Willett, Y Bar-Shalom. Angle estimation for two unresolved targets with monopulse radar[J]. IEEE

Trans. on AES, 2004, 40(3): 998 – 1019.

- [8] N Nandakumaran, A Sinha, T Kirubarajan. Joint detection and tracking of unresolved targets with a monopulse radar using a particle filter[A]. Proceedings of the SPIE Conference of Signal and Data Processing of Small Targets, Vol. 5913[C]. San Diego, 2005. 59131T-1 ~ 59131T-12.
- [9] Xin Zhang, P Willett, Y Bar-Shalom. Monopulse radar detection and localization of multiple unresolved targets via joint bin processing[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2005, 53(4): 1225 – 1236.
- [10] N Nandakumaran, A Sinha, T Kirubarajan. Joint detection and tracking of unresolved targets with a joint-bin processing monopulse radar[A]. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, vol. 6236[C]. Florida, 2006. 62360T. 1-62360T. 10.
- [11] Xin Zhang, P Willett, Y Bar-Shalom. Detection and localization of multiple unresolved extended targets via monopulse radar signal processing[J]. IEEE Trans on AES, 2009, 45(2): 455 – 472.
- [12] P Willett, Y Bar-Shalom. Quickest detection and tracking of spawning targets using monopulse radar channel signals[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(3): 1302 – 1308.
- [13] 赵锋, 毕莉, 周颖, 王雪松, 肖顺平. 基于距离闪烁效应的不可分辨多目标存在性检测[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2290 – 2298.
- Zhao Feng, Bi Li, Zhou Ying, Wang Xuesong, Xiao Shun

ping. Detection of presence of multiple unresolved targets based on range glint[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2290 – 2298. (in Chinese)

- [14] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京, 电子工业出版社, 2006.
- [15] Merrill I. Skolnik. 雷达手册[M]. 北京, 电子工业出版社, 2003. 734.
- Merrill I. Skolnik. Radar Handbook[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 734. (in Chinese)

作者简介:



赵 锋 男, 1978 年 7 月生于江苏南京, 博士, 国防科学技术大学电子科学与工程学院讲师, 研究方向为弹道导弹攻防对抗技术、雷达电子战系统建模、仿真与评估.

E-mail: zhfbec@tom.com



毕 莉 女, 1979 年 2 月出生于陕西西安, 国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生, 研究方向为空间目标探测与识别.

E-mail: lilibi11@yahoo.com.cn