

文章编号: 1001-2486 (2001) 05-0054-05

脉冲多普勒雷达对运动目标回波信号的检测*

张军, 付强, 肖怀铁

(国防科技大学自动目标识别重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 分析了倒置接收对目标回波信噪比和杂波特性的影响, 讨论了在相关杂波区对回波信号有效检测的方法。针对如何在“弹-目”相对运动参数未知条件下对高速运动目标进行积累检测这一问题, 提出了一种多周期移位积累的新方法。

关键词: 脉冲多普勒雷达; 检测; 相关杂波

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A

The Detection of the Moving Target by Using Pulsed Doppler Radar

ZHANG Jun, FU Qiang, XIAO Huai-tie

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

Abstract: This paper analyzes the influence of the inversive receiver on the characteristics of the clutter and the ratio of the signal power and the noise power, discusses the effective detection method of the target signal in correlated clutter, and then puts forward a new method named multi-periods shift accumulation for detecting moving target when not knowing the exact movement parameter.

Key words: Pulsed Doppler Radar; Detection; Correlated Clutter

弹载脉冲多普勒雷达对运动目标进行检测的结构, 一般采取 FFT 相干积累后接单元平均恒虚警处理的方案。当导弹处于迎头攻击状态时, 目标回波对抗的杂波一般为白高斯分布的接收机热噪声, 但是, 由于倒置接收机的存在, 白高斯热噪声经过倒置接收机后变成了窄带高斯噪声。当导弹处于追尾攻击状态时, 目标回波对抗的杂波类型变得多种多样, 有可能是高斯噪声, 也有可能是非高斯噪声。由于 FFT 变换是线性变换, 相关高斯噪声经过 FFT 处理后是相关高斯噪声, 非高斯噪声经过 FFT 处理后仍然是非高斯噪声。因此, 在采用 FFT 相干积累后接单元平均恒虚警处理的方案后, 将频域杂波当成白高斯噪声是欠妥当的。如何合理而有效地利用杂波的相关信息来进一步提高系统的检测性能, 是要探讨的问题。PD 雷达杂波由其单点分布和相关结构确定。简单地针对单点分布 (Gauss 分布, K 分布, Weibull 分布) 的检测结构和检测性能已有较成熟的结论。但是, 在传统的恒虚警检测算法中, 杂波的相关性对于检测性能的影响也是很显著的。文献 [1] 表明: 非高斯的杂波在其对数域可由高斯复合模型 (GMD) 拟合。本文在此基础上提出了一种相关雷达杂波的通用模型 (CGMD)^[2], 并将其应用于脉冲多普勒雷达对运动目标回波的检测过程, 提高了系统在相关杂波下的检测性能。针对如何在“弹-目”相对运动参数未知条件下对高速运动目标进行积累检测这一问题, 本文提出了一种多周期移位积累的新方法。理论分析和仿真实验证明, 这种方法具有很好的较好的检测性能。

1 脉冲多普勒雷达相关杂波模型

经过 FFT 相干积累后, 不失一般性, 我们假设运动目标回波在频域仅占据一个多普勒单元。因此, 该多普勒单元采样数据的分布为杂波背景下的条件概率分布:

* 收稿日期: 2001-05-20
基金项目: “九五”部委科技预研项目资助
作者简介: 张军 (1973-), 男, 博士生。

$$P(x_0 | x_i; i = 1, 2, \dots, S) = \frac{P(x_0, x_i; i = 1, 2, \dots, S)}{P(x_i; i = 1, 2, \dots, S)} \quad (1)$$

其中： x_0 为检测多普勒单元的采样， $x_i; i = 1, 2, \dots, S$ 为检测多普勒单元的邻域采样， S 为检测多普勒单元邻域采样数据的个数。一般来说， S 越大，对背景杂波的描述越精确，检测多普勒单元的分布也就越精确。但是， S 增大到一定程度后，不仅增加了系统的运算量，其它因素对检测性能的影响也有可能大于 S 值的选择对检测性能的影响。因此，对 S 值的选择应该兼顾运算量和计算精度之间的动态平衡。

当各个多普勒单元的杂波采样为互不相关的随机变量，即：

$$P(x_i, i = 1, 2, \dots, S) = P(x_1)P(x_2) \dots P(x_S) \quad (2)$$

由概率论知识可知：检测多普勒单元的采样 x_0 在不相关杂波下的条件概率可由下式表示为：

$$P(x_0 | x_i; i = 1, 2, \dots, S) = P(x_0) \quad (3)$$

因此，互不相关的频域噪声背景下，采取 FFT 相干积累后接单元平均恒虚警处理的方案可以获得较好的结果。对于倒置接收后的窄带高斯噪声，我们可以很容易的用多变量的相关高斯分布来拟合背景噪声。假设在单个多普勒单元的采样服从零均值单位方差的背景噪声在多个多普勒单元的采样服从多变量的相关高斯分布：

$$P(x_i, i = 1, 2, \dots, S) = \frac{1}{P(x_0, x_i; i = 1, 2, \dots, S)} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu)^T C^{-1}(x - \mu)\right) \quad (4)$$

其中：

$$\mu = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{S-1} \\ \rho_1 & 1 & \dots & \rho_{S-2} \\ & & \ddots & \\ \rho_{S-1} & \rho_{S-2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

(5) 不失一般性，我们假设目标回波位于第 n 个多普勒单元，则 x_n 的条件分布为：

$$P(x_n | x_i; i = 1, 2, \dots, S, i \neq n) = \frac{P(x_i; i = 1, 2, \dots, S)}{P(x_i; i = 1, 2, \dots, S, i \neq n)} = \frac{1}{(2\pi\delta^2)^{S/2}} \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{2\delta^2}\right) \quad (6)$$

其中： m 为 x_n 的条件均值， δ^2 为 x_n 的条件方差。

特别地，当 $S = 3$ ，即算法只考虑检测多普勒单元左右相邻的两个单元的检测值时，假设噪声输出满足零均值单位方差的高斯分布，且可能包括目标信号回波的输出为 x_2 ， C_1 为 x_1, x_2, x_3 的协方差矩阵， C_2 为 x_1, x_3 的协方差矩阵，

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & \rho_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 1 & \rho_2 \\ \rho_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由 (4)、(6) 式可知： x_2 的条件概率分布为：

$$P(x_2 | x_1, x_3) = \frac{P(x_1, x_2, x_3)}{P(x_1, x_3)} = \frac{1}{(2\pi\delta_n^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(x - re)^2}{2\delta_n^2}\right) \quad (8)$$

由 (8) 式可知， x_2 满足均值为 re 、方差为 δ_n^2 的高斯分布。其中， x_2 的条件均值 m 和条件方差 δ_n^2 可分别由下式描述：

$$m = \frac{\rho_1(x_1 + x_3)}{(1 + \rho_2)}, \quad \delta_n^2 = \frac{(1 - 2\rho_1^2 + \rho_2)}{1 + \rho_2} \quad (9)$$

对于倒置接收后的非高斯杂波，由于非高斯杂波经过取对数变换后可由多个高斯分量的和来拟合，因此，倒置接收后的相关非高斯杂波可由相关高斯混合分布 (CGMD) 来拟合。故有

$$P(x_i, i = 1, 2, \dots, S) = \sum_{k=1}^K \frac{p_k}{((2\pi)^N \det(C))^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu_k)^T C^{-1}(x - \mu_k)\right) \quad (10)$$

同理，位于第 n 个多普勒单元的目标回波 x_n 的条件分布为：

$$P(x_n | x_i; i = 1, 2, \dots, S, i \neq n) = \frac{P(x_i; i = 1, 2, \dots, S)}{P(x_i; i = 1, 2, \dots, S, i \neq n)}$$

$$= \frac{\sum_{k_1} \sum_{k_2} \dots \sum_{k_N} P(x_i, i=1, 2, \dots, S | C) p_{k_1} p_{k_2} \dots p_{k_N}}{\sum_{k_1} \dots \sum_{k_{n-1}} \sum_{k_{n+1}} \dots \sum_{k_N} P(x_i, i=1, 2, \dots, S | C_1, i \neq n) p_{k_1} p_{k_2} \dots p_{k_N}} \quad (11)$$

2 PD 雷达对相关杂波区目标回波信号的检测

PD 雷达对目标回波频谱信号的检测实际上等效于一个在频域上的二元检测问题。

$$\begin{aligned} H_1: y(k) &= s(k) + \Delta(k) \\ H_0: y(k) &= \Delta(k) \end{aligned} \quad (12)$$

仔细分析(9)式可知:当 $S=3$ 时,服从高斯分布的待检测单元的均值 m 与相邻单元的检测值和相关杂波的相关矩阵有关,而方差 δ^2 则仅与相关杂波的相关矩阵有关。因此,对于同一个相关矩阵的相关杂波而言,假设目标频谱位于第 n 个多普勒单元,则 δ^2 可由下式估计:

$$\delta^2 = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k \neq n} |x(k)|^2 \quad (13)$$

其中 N 为整个频域多普勒单元的个数。取 $y = \frac{1}{2\delta^2} |x(k)|^2$ 为检测变量,当没有目标存在时, $y(k)$ 服从自由度为2的通用的 χ^2 分布:

$$f_{y|H_0} = \exp(-y), y \geq 0 \quad (14)$$

其中: $\lambda = \frac{|\mu_n|^2}{2\delta_n^2}$, $\mu_n = re_n + j \cdot im_n$, re_n 为第 n 个多普勒单元的杂波实部的均值, im_n 为第 n 个多普勒单元的杂波虚部的均值。

设给定虚警概率 $P_f = \int_a^\infty f_{y|H_0} dt$,则由 P_f 可确定检测门限 α 。当有目标存在时,假设多普勒单元中目标信号为 $Ae^{j\theta}$, δ_n^2 为第 n 个多普勒单元的条件方差,则容易证明 $y = \frac{1}{2\delta_n^2} |x(k)|^2$ 服从如下分布:

$$f_{y|H_1} = \exp(-\lambda - y) I_0(2\lambda y)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

其中: $\lambda = \frac{|Ae^{j\theta} + \mu_n|^2}{2\delta_n^2}$ 因此,在 P_f 下目标的发现概率为:

$$P_D = \int_a^\infty f_{y|H_1} dt \quad (16)$$

由前面分析可知:对于相关雷达杂波,由于多普勒单元的杂波条件均值不再是恒定值,因此,对于每一次检测而言,其门限 α 是可变的,我们称之为条件门限。

如何在低信噪比下识别远处的威胁目标是现代弹载雷达的一大难题,为了充分利用多帧雷达回波中的数据来检测低信噪比下的目标,适当地进行帧间数据的非相干积累是必要的。

由于导弹自身和来袭目标的高机动性,利用现有方法对弹-目相对运动进行准确的估计从而实现多普勒频谱的精确补偿是非常困难的,而相对加速度引起的目标多普勒谱线的偏移又是制约帧间非相干积累的一大关键因素。为了消除相对加速度对多帧回波信号积累检测性能的影响。本文采取了对弹-目间相对加速度进行搜索预测后对回波信号进行积累检测的方法。该方法首先假设弹-目相对运动在有限的几个检测周期内为恒加速直线运动,在加速度 f 可能的变化范围内确定 P 帧目标回波频谱可能移动的范围 Q ,按照事先预测的加速度值预测回波信号多普勒频谱的位置,将多帧回波信号按照预测的目标多普勒回波信号位置对准后再进行非相干积累。我们称之为多周期移位积累。

设第 P 帧目标回波的频谱为 $x_l(n), l=1, \dots, P$ 。则移位积累后每个多普勒单元的回波为:多周期移位积累

$$z(P, m, q) = \sum_{l=1}^P |x_l(n + [l \cdot q/P])|^2 \tag{17}$$

其中 q 为 P 帧时间内目标多普勒频谱移动距离，同理，取 $y(P, m, q) = \frac{z(P, m, q)}{2\delta^2}$ 为检测变量。

在相关杂波背景下，各个多普勒单元的数据是相关的，但是，多帧目标回波，特别是高机动目标的多帧目标回波仍然可以认为是不相关的。因此，当目标不存在时，容易证明 $y(k)$ 服从自由度为 $2P$ 的非中心 χ^2 分布：

$$f_{y|H_0} = \frac{y^{P-1}}{\Gamma(P)} \cdot e^{-y} \tag{18}$$

其中： $\lambda = \sum_{l=1}^P |\mu_l(n + [l \cdot q/P])|^2$ ， $\mu_l(n + [l \cdot q/P])$ 为第 l 帧目标回波中第 $n + [l \cdot q/P]$ 个多普勒单元的杂波的条件均值。

δ^2 的估计值可以由下式表示：
$$\delta^2 = \frac{1}{P(N-1)} \sum_{k \neq n} z(k) \tag{19}$$

设定虚警概率 $P_f = \int_a^\infty f_{y|H_0} dt$ ，根据 P_f 可唯一地确定门限 $\alpha(P, Q)$ ，当目标存在时，设 δ_n^2 为第 n 个多普勒单元的条件方差，则检测统计量 $y(P, m, q) = \max_{q=1 \dots Q} \frac{z(P, m, q)}{2\delta_n^2}$ 也服从自由度为 $2P$ 的非中心 χ^2 分布。

$$f_{y|H_1} = \frac{y^{\frac{P-1}{2}}}{\lambda} \cdot \exp(-\lambda - y) \cdot I_{P-1}(2\sqrt{\lambda \cdot y}) \tag{20}$$

其中： $\lambda = \sum_{l=1}^P |Ae^{j\theta} + \mu_l(n + [l \cdot q/P])|^2$ 。因此，在 P_f 下目标的发现概率为：

$$P_D = \int_a^\infty f_{y|H_1} dt \tag{21}$$

3 仿真实验研究

图 1 和图 2 分别表示在满足不同相关函数的杂波下对目标信号进行相关检测和传统 FFT 检测的性能与信噪比的关系。由图 1、图 2 的检测性能曲线可知：在相关杂波背景下对回波信号进行检测

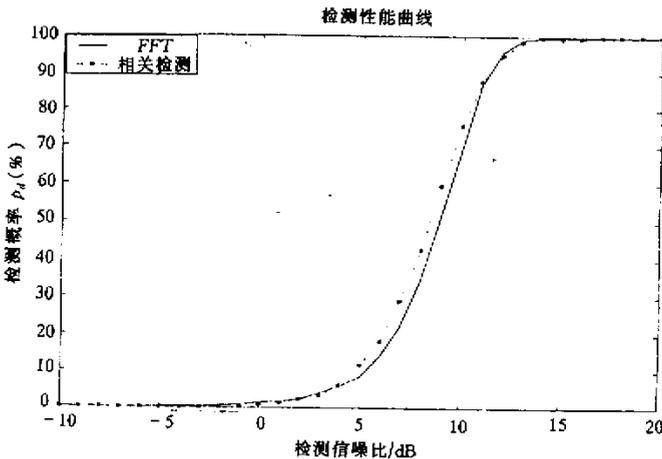


图 1 不同信噪比下的检测性能对比 ($S = 3, \rho_1 = 0.5, \rho_2 = 0.25$)

Fig.2 Detection performance comparison under different SNR

时，充分利用杂波的相关信息可以获得比传统的 FFT 检测加单元平均恒虚警检测方法更好的检测效

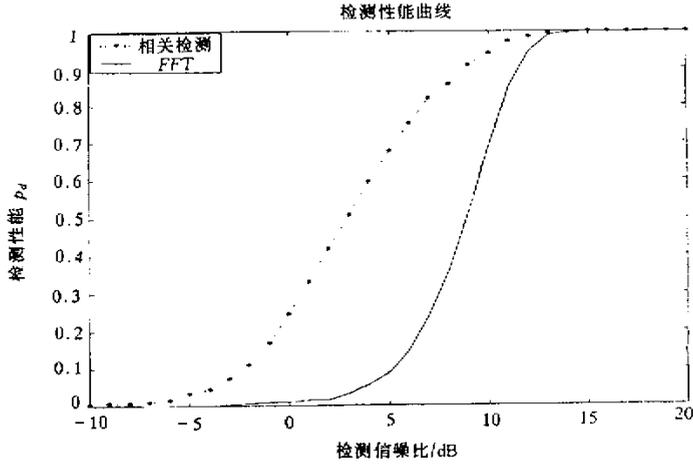


图2 不同信噪比下的检测性能对比 (S = 3 , ρ₁ = 0.9 ρ₂ = 0.8)

Fig.2 Detection performance comparison under different SNR

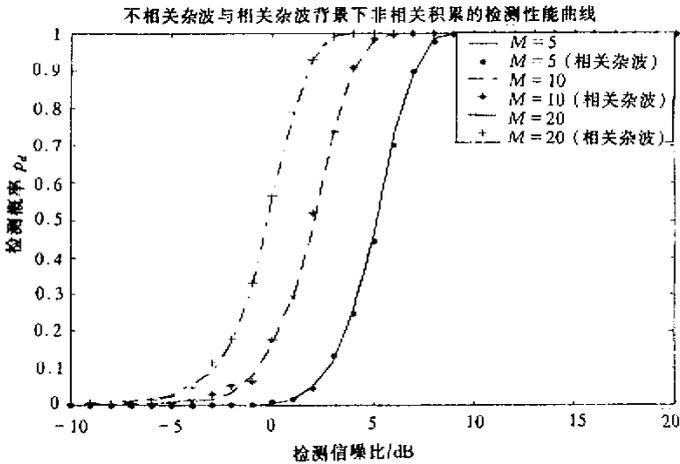


图3 不同信噪比下的检测性能对比 (S = 3 , ρ₁ = 0.9 ρ₂ = 0.8)

Fig.3 Detection performance comparison under different SNR

果。将背景杂波当成白噪声就意味着对噪声分布的一无所知，充分利用有关背景杂波的先验知识是可以进一步提高系统检测性能的。因此，在选择 S 值时，S 越大，意味着对背景杂波有更精确的描述，检测性能将会更高，但是它必将带来更大的运算量。另外，由图1、图2可知，当杂波的相关性越强时，对杂波区目标信号的进行相关检测获得的检测性能增加就越明显。

图3分别示出了当 S = 3 时系统对相关杂波背景中的运动目标回波进行不同点数的多周期移位非相干积累的检测性能对比。其中，M 表示数据积累的点数。由前面分析可知，当 S = 3 时，在同样的相关矩阵条件下，多帧数据的检测单元服从不同均值同方差的高斯分布。仔细分析图3可知：当积累的点数较多时，由于多帧数据的平滑，杂波数据的相关性对多周期移位积累的检测性能的影响不大。

参考文献：

[1] D Blacknell. Target detection in correlated SAR clutter [J]. IEE Proc-Radar Sonar and Navigation, Vol 147.No.1, February 2000.
 [2] D.Blacknell, Target detection in correlated clutter Radar97 [C]. October 1997, 14-16.
 [3] 孙文峰, 何松华, 郭桂蓉, 赵宏钟, 何昭青. 强杂波背景中高距离分辨率雷达运动目标的积累检测. 电子学报, DEC, 1998, 26(12).

