

# 高分辨率雷达目标的随机参量脉冲串检测方法

杨建宇<sup>1</sup>, 李俊生<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学电子工程学院, 四川成都 610054; 2. 常州工学院电子信息与电气工程系, 江苏常州 213000)

**摘 要:** 本文从最佳检测理论和高分辨率雷达目标回波特征出发, 将目标上各散射点形成的在时域上分离的回波看成具有随机参量的脉冲串信号, 提出了适用于高分辨率雷达目标单次回波检测的随机参量脉冲串 (RPPT) 检测方法. 计算机仿真结果表明, 在高分辨率雷达中, 这种检测方法比雷达经典检测方法有 2dB 以上的检测性能改善.

**关键词:** 高分辨率雷达; 信号检测; 匹配滤波器

**中图分类号:** TN957.51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-1044-03

## Random Parameters Pulse Train Detector for High Range Resolution Radar

YANG Jian-yu<sup>1</sup>, LI Jun-sheng<sup>2</sup>

(1. Dept. of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

2. Dept. of Electronic Information and Electrical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213000, China)

**Abstract:** By treating time domain separated echoes, caused by the scatters on the target, as a pulse train with random parameters, a new detection method is proposed for high resolution radar target detection based on the theory of optimum detection and the characteristic of target's echoes in a high-range-resolution radar. Computer simulation shows that the new method has at least 2dB improvement in detection performance compared with the traditional detection method.

**Key words:** high resolution radar; signal detection; matched filter

### 1 引言

在低分辨率雷达中, 距离分辨率远大于实际目标尺寸, 可以将目标看成点目标, 回波除含有未知或随机的参量外, 与发射信号具有相同的形式. 所以, 平稳白高斯噪声背景下目标回波的最佳检测器以发射信号的匹配滤波器为核心. 在高分辨率雷达中, 距离分辨率已小于实际目标尺寸, 目标回波应看成散射中心径向分布函数与发射信号作用而形成的在时域上分离的散射中心回波. 每个散射中心回波除含有未知或随机幅度相位外, 均与发射信号具有相同的波形, 而整个目标回波不再与发射信号具有相同波形. 因此, 对发射信号的匹配滤波处理只是对各径向散射中心回波的最佳检测, 并没有充分利用目标回波的全部能量, 不是对整个目标回波的最佳检测方法<sup>[1,5]</sup>.

高分辨率雷达目标探测问题涉及到目标回波模型建模、检测方法及实现问题. 一般将目标回波看成各散射中心三维分布函数在径向上的投影  $h(r)$  或目标冲击响应  $h(t)$  与发射信号  $s_T(t)$  的时域卷积, 因此, 高分辨率雷达的检测性能不仅取决于检测器的结构, 而且取决于发射信号与目标冲击响应的匹配程度<sup>[1]</sup>. 平稳高斯白噪声中目标回波的最佳检测器由两个串接的部分组成, 即发射信号  $s_T(t)$  的匹配滤波器和目标冲击响应  $h(t)$  的匹配滤波器<sup>[1,2]</sup>. 由于目标类别和姿态的不

确定性, 目标的冲击响应  $h(t)$  难以事先获得, 要实现高分辨率雷达目标回波的最佳检测, 在实现中面临较大的困难.

本文根据高分辨率雷达目标回波特征, 将目标回波看成随机参量脉冲串: 每个脉冲是目标上散射点的回波, 其波形除时间、相位、幅度为随机变量外, 与发射信号具有相同的波形. 从最佳检测理论中的脉冲串信号检测方法出发, 可以构造出适合于高分辨率雷达目标检测的随机参量脉冲串 (Random Parameter Pulse Train RPPT) 检测方法.

### 2 雷达经典检测方法分析

设发射信号为:  $s_T(t) = a_T(t) \sin 2 f_0 t$ ;  $a_T(t) = 0 (t < 0$  或  $t > T)$ ; 加性噪声是零均值平稳的高斯白噪声, 其功率谱为  $N_0/2$ . 在低分辨率条件下, 实际目标具有点目标的特征, 目标回波除时间、幅度、相位为随机参量外, 与发射信号具有相同的波形. 设其回波接收信号为:

$$s_R(t) = A a_T(t - \tau) \sin[2 f_0 (t - \tau) + \theta] \quad (1)$$

其中, 频率  $f_0$  已知, 振幅  $A$  服从瑞利分布, 相位  $\theta$  和时延  $\tau$  服从均匀分布, 均为独立随机变量. 它们的概率密度函数分别为

$$p(A) = A / A_0^2 \exp[-A^2 / 2A_0^2] \quad (2)$$

$$p(\theta) = 1/2\pi, \quad \theta \in [0, 2\pi] \quad (3)$$

$$p(\tau) = 1/m, \quad 0 \leq \tau \leq m \quad (4)$$

离散形式的似然比为

$$(x) = K_2 \cdot 1/m \cdot \exp[ K_1 M_1^2 ] \quad (5)$$

$$K_1 = 2A_0^2 / (N_0^2 + N_0 E_0 A_0^2) \quad (6)$$

$$E_0 = \int_0^T a^2(t) dt \quad (7)$$

$$M_i^2 = [ \int_i^{i+T} x(t) a_T(t-i) \sin 2 f_0(t-i) dt ]^2 + [ \int_i^{i+T} x(t) a_T(t-i) \cos 2 f_0(t-i) dt ]^2 \quad (8)$$

其中,  $i = (i-1) \cdot T, i = 1 \sim m, m = T/T_1$ . (9)

对应的检测器结构如图 1 所示.

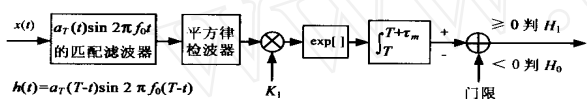


图 1 随机幅、相、到达时间脉冲信号的最佳检测器

以上分析表明,在低分辨率雷达目标的检测中,采用基于对发射信号匹配滤波的经典检测方法,就是对平稳高斯白噪声中随机参量脉冲的最佳检测.但是,在高分辨率条件下,目标回波与发射信号具有显著的差别.此时,对发射信号的匹配滤波并不等于对回波信号的匹配滤波.因此,上述检测方法仅适用于对低分辨率雷达,对高分辨率雷达目标已不再是最佳.

### 3 RPPT 检测方法

当入射波波长远小于目标尺寸时,目标的电磁散射可以认为是某些局部位置上的散射源产生的电磁散射的合成,这些局部性的散射源通常被称为散射中心.由多个散射点构成的目标的回波信号为

$$s_R(t) = k_r \sum_{i=1}^N A_i a_T(t-i) \sin[2 f_0(t-i) + \phi_i] \quad (10)$$

其中,系数  $k_r$  为传输衰减(当各散射点与雷达的距离远大于各散射点间的距离时,可以认为各散射点的衰减系数相同),  $N$  是目标散射点的个数,  $A_i$ 、 $\phi_i$  和  $i$  分别是第  $i$  个散射点的反射强度、回波延时及反射附加相移.

由上式可以看出,目标回波信号是各散射点回波信号的矢量迭加.在高分辨率条件下,距离分辨率已远小于目标尺寸,在发射单个脉冲的条件下,高分辨率雷达目标回波相当于一随机参量脉冲串,各子脉冲相互独立、在时域上一般是相互分离的,且均与发射信号具有相同的波形,只是其时间、相位和幅度是随机的,如图 3 所示.因此,零均值平稳高斯白噪声中的高分辨率雷达目标回波信号检测方法可以归结为随机参量脉冲串(RPPT)检测方法.在时域中对目标回波可能出现的时间区间进行子区间划分,每个子区间的长度  $T_1$  等于距离分辨率对应的时间长度(或 2 倍),并将每个子脉冲看成各子区间内的到达时间、幅度和相位随机的脉冲.按照最佳检测理论脉冲串信号的检测方法,可以得到整个目标回波的检测似然

$$L = \prod_{k=1}^K l_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

其中,  $l_k$  是第  $k$  个子区间的似然比,由式(5)确定.由式(11)、(5)构成的 RPPT 检测方法检测系统如图 2 所示.该检测器由

发射信号的匹配滤波器、平方律检波器、指数放大器、抽头延时线、积分器和乘法器共六级组成.即首先对回波信号进行匹配于发射信号的滤波、平方律检波和指数放大等预处理,然后将最大目标尺寸对预处理后的回波进行滑窗处理,按距离分辨率将滑窗划分为若干子区间,由滑窗内各子区间积分值的乘积得到滑窗似然比;移动滑窗,得到似然比随滑窗位置变化的信号;最后将此信号与门限进行比较判决.

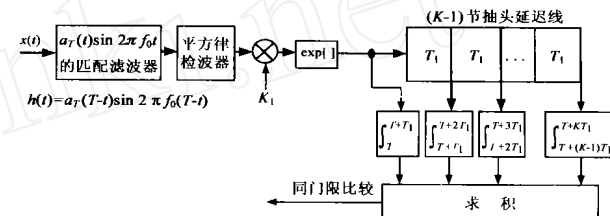


图 2 高分辨率雷达目标回波 RPPT 检测接收机

### 4 仿真结果与性能评估

给定信噪比 SNR,分别在  $H_0$ (噪声)和  $H_1$ (噪声+回波信号)的条件下,独立重复进行  $M$  次试验,得似然比  $l_0(i)$  和  $l_1(i), i = 1 \sim M$ .然后根据给定的虚警概率  $P_f = \alpha$ ,按下式确定

$$\text{门限} : \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u[l_0(i) - \alpha] = \alpha \quad (12)$$

其中  $u[\cdot]$  为单位阶跃函数.检测概率由下式求出:

$$P_d = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u[l_1(i) - \alpha] \quad (13)$$

设定仿真条件为:载频  $f_0 = 5\text{GHz}$ ,发射脉冲宽度  $T_0 = 2\text{ns}$ ,有效目标尺寸  $l = 20\text{m}$ ,距离分辨率  $R = 0.3\text{m}$ ,独立重复试验次数  $M = 1000$ .图 3~5 是仿真试验结果.

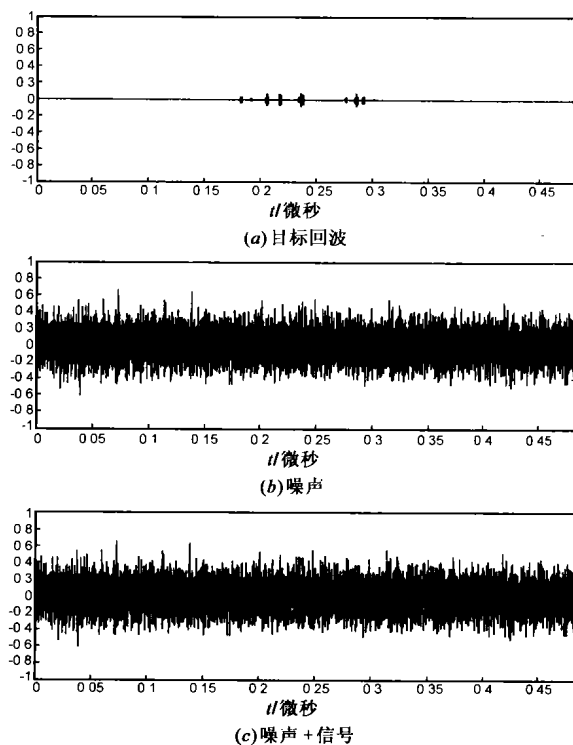


图 3 信号、噪声及噪声中的信号 SNR = 6.34dB

图 3 是目标回波、信号噪声和信号 + 噪声的时域波形。图 4 (a)、(b)、(c) 是图 3 中信号分别采用经典检测器和 RPPT 检测器形成的似然比序列。从图中可以看出,对高分辨率雷达目标检测来说,在相同信噪比条件下,经典检测方法不能有效地区分噪声与信号 + 噪声,而 RPPT 方法可以有效地区分噪声与信号 + 噪声。图 4 中检测器处理形成的似然比序列有若干个周期性峰值出现,这是由于 RPPT 检测方法划分子区间产生的,峰值周期等于子区间长度。

图 4 (d) 是根据若干次上述仿真试验结果经平均后得出的 RPPT 检测方法与雷达经典检测方法的性能对比图。从图

中可以看出 RPPT 检测方法与经典检测方法相比,达到相同的检测能力所需的信噪比可降低约 2dB。

## 5 结论

分析和仿真试验表明,本文提出的基于最佳检测理论和高分辨率雷达目标回波模型提出的 RPPT 检测方法,较为有效地积累了目标各散射点的回波能量,其检测性能在高分辨率雷达中比雷达经典检测方法的检测性能改善 2dB。RPPT 检测方法是我们在高分辨率雷达目标的检测理论和方法论上迈出的有益的一步,可应用在高分辨率雷达的回波的检测中,用于提高其探测性能<sup>[4]</sup>。

## 参考文献:

- [1] A Farina, F A Studer. Detection with high resolution radar: Great promise, big challenge[J]. Microwave Journal, 1991, (5): 263 - 273.
- [2] Merrill Skolnik, et al. An UWB microwave conceptual design[A]. IEEE International Conference [C]. Gorgia, Atlanta: Institute of Electrical & Electronics Engineer Pub, 1995. 16 - 21.
- [3] TANGJinsong, ZHU Zhaoda. Analysis of extended target detectors[A]. Aerospace and Electronics Conference, Proceedings of the IEEE 1996 National [C]. Ohio, Dayton: IEEE Aerospace & Electronics Systems Soc Pub, 1996. 1. 364 - 368.
- [4] 李俊生. 高分辨率雷达目标检测方法[D]. 四川成都: 电子科技大学, 2002.
- [5] 陆林根. 高距离分辨 (HRR) 雷达单个目标回波信号检测[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(9): 22 - 25.
- [6] 陆林根. 高分辨率雷达的目标自动检测器[J]. 电子科学学刊, 1997, 19(2): 195 - 201.

## 作者简介:



杨建宇 男, 1963 年 8 月生于四川省南充市, 1984 年毕业于国防科技大学, 1987、1991 年在电子科技大学获硕士、博士学位, 现为电子科技大学电子工程学院院长、教授、博士生导师, 研究领域: 高分辨率雷达理论、实现技术与应用, 毫米波雷达成像, 数字信号处理, 信号检测与估计。



李俊生 男, 1968 年 2 月生于四川省南充市, 2002 年 3 月获电子科技大学通信与信息系统硕士学位, 现为常州工学院电子信息与电气工程系讲师。

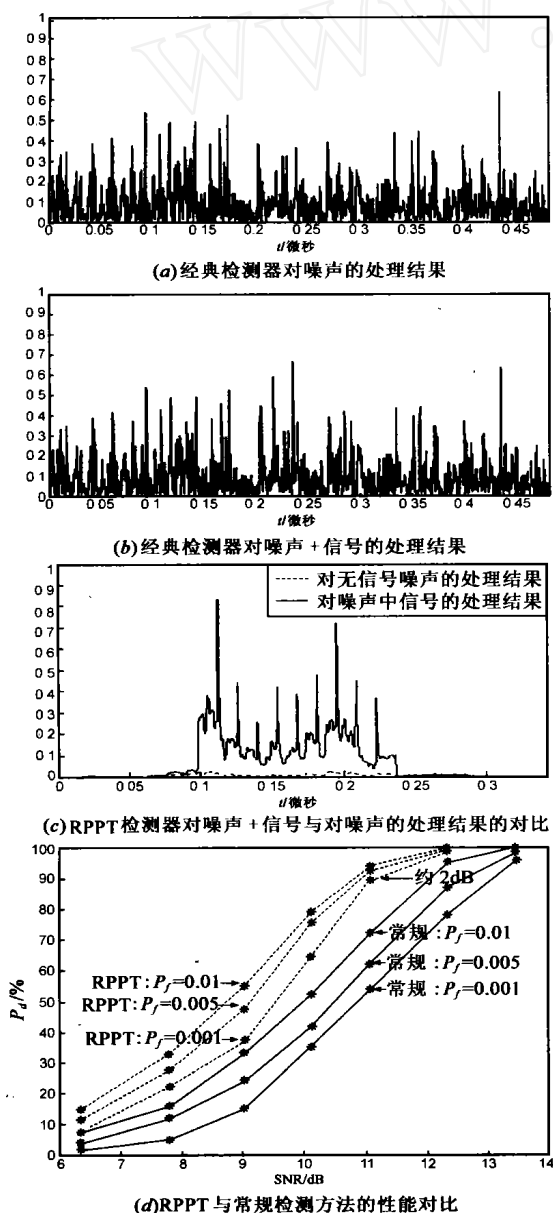


图 4 RPPT 与常规检测器及常规检测方法的对比