

## 步进调频宽带雷达距离扩展目标频域检测算法

刘 博\* 常文革

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘 要:** 论文研究高斯杂波背景下步进调频宽带雷达的距离扩展目标检测问题。根据步进调频宽带雷达目标高分辨距离像的特点, 提出一种基于回波功率谱的距离扩展目标频域检测算法。该算法无需对目标抽取形成 1 维距离像, 直接利用目标高分辨距离像功率谱与杂波功率谱的差异, 在频域实现了距离扩展目标回波能量的积累。推导了算法的检验统计量, 给出了虚警概率的表达式。最后通过 Monte-Carlo 仿真验证了算法的检测性能。仿真结果表明该文的目标检测算法较目标抽取后的检测算法在检测性能上有明显提高, 同时其检测性能也优于同条件下基于视频积累的距离扩展目标检测算法, 并且具有良好的鲁棒性和工程可实现性。

**关键词:** 目标检测; 步进调频; 合成宽带; 高分辨距离像; 功率谱

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)10-2481-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01309

## Range-spread Target Detection of Stepped Chirp Modulated Radar in the Frequency Domain

Liu Bo Chang Wen-ge

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

**Abstract:** A novel range-spread target detection algorithm in Gaussian clutter is addressed for Stepped Chirp Modulated Radar (SCMR). For SCMR, the High Resolution Range Profile (HRRP) of a target is obtained by target extraction from overlapping HRRPs which is caused by oversampling. During the target extraction (sometimes called de-correlation), some strong scatters of the target echo are discarded, as the result, the Signal-to-Clutter Ratio (SCR) might be reduced and the target detection capability is degraded. To solve this problem, a novel target detection algorithm without target extraction is addressed. The new algorithm based on the power spectrum of echoes uses not only the amplitude information, but also the phase information of the overlapping HRRPs of a target to improve the SCR, therefore, has significant performance. The test statistic and the false alarm probability of the detector are derived. Finally, the detection performance is assessed by Monte-Carlo simulation, and the results indicate that the proposed algorithm is effective. In addition, the proposed algorithm is robust and easy to implement in practical application.

**Key words:** Target detection; Stepped chirp modulated signal; Synthesis wideband; High Resolution Range Profile (HRRP); Power spectrum

### 1 引言

高距离分辨(High Range Resolution, HRR)雷达目标回波分布在不同的距离单元中, 呈现为“1 维距离像”, 因此 HRR 雷达目标被称为距离扩展目标<sup>[1,2]</sup>。相对于低分辨雷达, HRR 雷达的目标回波特性发生了变化, 传统点目标检测方法对距离扩展目标不能很好地适应, 必须研究新的检测方法。文献[3]在高斯白噪声背景下, 研究了利用单次回波检

测 Swerling II 型距离扩展目标的问题, 根据似然比检验提出了  $(N, K)$  模型的距离扩展目标的最优检测器。文献[4]通过仿真对  $(N, N)$  距离扩展目标模型的两类检测器——二进制积累检测器和线性能量积累检测器进行了性能分析。文献[5]利用目标强散射点分布的先验信息, 设计了一种基于散射点密度 (Scatterer Density) 的广义似然比检测器 (SSD-GLRT), 该检测器比二进制积累检测器和线性能量积累检测器具有更好的适应性, 而检测性能几乎没有损失。从工程实现的角度, 文献[6]通过先对目标回波占据距离单元的位置和宽度进行估计,

2012-10-12 收到, 2013-06-28 改回

\*通信作者: 刘博 liubo19830120@163.com

然后对窗内的强散射点进行提取,设计了一个基于视频积累的能量检测器,仿真结果表明这种检测器的检测性能优于 SSD-GLRT 检测器。根据宽带雷达回波能量往往集中于若干距离单元这一现象,文献[7]提出了一种基于顺序统计量的距离扩展目标检测器,对于回波集中在少数距离单元中的距离扩展目标,这种方法的检测性能要优于基于能量积累的检测算法,但是这种方法的抗干扰性能较弱。文献[8]在分析不同散射中心展布与扩展目标二进制检测器检测性能之间关系的基础上,研究了扩展目标最优二进制检测的设计问题,得出了有用的结论。为了提高检测算法的通用性,文献[9]提出了一种基于局部模糊阈值的距离扩展目标检测算法,检测性能超过了传统的二进制积累检测器和常用的 SSD-GLRT,但这种算法需要对每一个距离单元进行“局部模糊映射”,计算量很大,不便于工程实现。

上述距离扩展目标检测方法是在已获得目标高分辨距离像的基础上进行的,与瞬时宽带雷达不同,步进调频宽带雷达在合成距离高分辨的过程中,需先对中分辨域的目标回波进行脉冲压缩处理,然后进行合成高分辨后方能获得目标的 1 维距离像。文献[10]研究了一种步进调频宽带雷达距离扩展目标检测方法,该方法先进行目标抽取形成 1 维距离像,然后进行目标检测,由于目标抽取过程中舍弃了一些目标强散射点<sup>[11]</sup>,降低了回波信号的信噪比,从而降低雷达的目标检测能力。针对上述问题,研究了步进调频宽带雷达在目标抽取前的距离扩展目标检测算法。首先根据步进调频宽带雷达的目标回波模型和目标高分辨 1 维距离像的特点,建立了距离扩展目标检测模型;为了充分利用检测模型中目标多个距离像之间的相关性,实现目标回波能量的有效积累,提出了一种基于目标回波功率谱的频域检测算法,推导了检验统计量,给出了虚警概率;最后通过 Monte-Carlo 仿真验证了算法的性能,结果表明本文算法的检测性能比目标抽取后的检测算法有明显提高,其检测性能也优于同等条件下基于视频积累<sup>[6]</sup>的距离扩展目标检测算法。

## 2 目标检测模型

### 2.1 目标回波模型

步进调频雷达的发射信号为

$$s(t) = \sum_{i=0}^{M-1} u_i(t) e^{j2\pi(f_0 + i\Delta f)t} \quad (1)$$

其中  $u_i(t) = \text{rect}[(t - iT_r)/T_p] e^{j\pi\mu(t - iT_r)^2}$  为第  $i$  个脉冲的复包络,  $t$  是时间变量,  $T_r$  是脉冲重复周期,  $T_p$  是子脉冲宽度,  $\mu = B_c/T_p$  是线性调频脉冲的调频率,

$B_c$  为子脉冲带宽,  $f_0$  是基准载频,  $\Delta f$  为步进频率,  $M$  为子脉冲个数。

雷达目标回波是发射信号与目标散射特性函数的卷积。对于距离扩展目标,根据多主散射点模型<sup>[3]</sup>,其距离向散射特性函数可表示为

$$CF(t) = \sum_v a_v \cdot e^{j2\pi\varphi_v} \cdot \delta(t - \tau_v) \quad (2)$$

其中  $a_v$ ,  $\varphi_v$ ,  $\tau_v$  分别是目标的第  $v$  个强散射点的幅度、初相和回波延迟,散射特性函数与目标的形状及雷达观测角度有关。假设在步进调频信号一个收发周期内目标的距离向散射特性函数不变,距离扩展目标回波经混频、采样和脉冲压缩后,第  $i$  个子脉冲的压缩结果可表示为

$$y_i(k) = \sum_v a_v \sqrt{\mu T_p^2} \text{rect}[(kT_s - iT_r - \tau_v)/T_G] \cdot \text{Sinc}[\pi B_c(kT_s - iT_r - \tau_v)] \cdot e^{-j2\pi\varphi_v} \cdot e^{-j2\pi i\Delta f\tau_v}, \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

其中  $T_G$  是子脉冲的采样宽度,  $T_p < T_G < T_r$ ,  $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ ,  $N$  为一个脉冲重复周期内对子脉冲的采样点数,  $N = f_s \cdot T_G$ ,  $f_s$  为子脉冲采样频率,  $T_s = 1/f_s$ 。对  $M$  个子脉冲压缩结果进行 IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) 后得到目标的高分辨距离像:

$$z(k, i) = |y_i(k)| \sum_v \frac{\sin\left[\pi M\Delta f\left(\frac{i}{M\Delta f} - \tau_v\right)\right]}{M \sin\left[\pi\Delta f\left(\frac{i}{M\Delta f} - \tau_v\right)\right]} \cdot e^{-j2\pi\left(\varphi_v - \frac{M-1}{2}\Delta f\tau_v\right)} \cdot e^{-j2\pi\left(\frac{M-1}{2}\Delta f\right)\frac{i}{M\Delta f}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

高分辨像的最大不模糊时间为  $1/\Delta f$ , 时间分辨率为  $1/M\Delta f$ <sup>[12]</sup>。

### 2.2 检测模型

由于过采样,合成高分辨距离像存在冗余,需进行目标抽取后才能获得真实的距离像,文献[11]对此进行了研究。图 1 给出了目标回波子脉冲压缩结果主瓣内的高分辨距离像。图 1(a)是目标回波子脉冲脉压结果主瓣内的采样点,采样点的数目与信号的采样率  $f_s$ 、子脉冲带宽  $B_c$  及窗函数有关,合成高分辨处理后每个采样点对应一个高分辨距离像;如果把图 1(a)中每个采样点所对应的高分辨 1 维距离像顺序排列,如图 1(b)所示,那么目标抽取提取形成 1 维距离像的过程就是对图 1(b)中的距离信息进行去冗余处理。

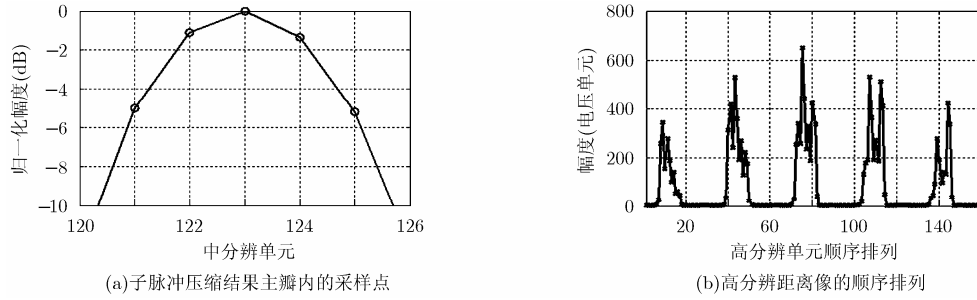


图 1 子脉冲压缩结果主瓣内的高分辨距离像

然而，这些含有冗余距离信息的强散射点对于目标检测是有用的，因为它们也是目标回波的能量，如果能对其进行有效的积累，将会提高信杂比。假设雷达杂波服从高斯分布，相对于杂波功率，接收机噪声可忽略不计，而且一帧回波数据中只有一个距离扩展目标。设脉冲压缩结果主瓣时间宽度为  $\theta/B_c$ ， $\theta$  为脉冲压缩过程中窗函数对主瓣的展宽因子，目标回波在中分辨域所占据的采样点数  $C$  可以表示为

$$C = \text{Int}\left[f_s \cdot \theta/B_c + 1\right] + 1 \quad (5)$$

其中  $\text{Int}[\cdot]$  表示下取整。在中分辨域(快时间)设置一个宽度为  $C$  的滑动窗，对滑动窗内的高分辨距离像进行能量积累，取使得积累值最大的窗口为目标检测窗口，记为  $W$ ，本文以下的研究都是在已获得目标检测窗口  $W$  的前提下进行的。

对检测窗  $W$  内的回波数据建立如下假设检验模型：

$$\left. \begin{aligned} H_0 : \mathbf{Z}_c &= \mathbf{X}_c \\ H_1 : \mathbf{Z}_c &= \mathbf{S}_c + \mathbf{X}_c \end{aligned} \right\}, \quad c = 1, 2, \dots, C \quad (6)$$

其中  $\mathbf{Z}_c$  为  $M$  维观测向量， $\mathbf{X}_c$  为  $M$  维的杂波向量， $\mathbf{S}_c$  为目标的高分辨 1 维距离像， $c$  为中分辨距离像采样点的计数值，代表了快时间。为了简化模型和便于计算，将检测窗口内的回波数据按慢时间进行顺序排列，形成 1 维观测向量，如式(7)：

$$\left. \begin{aligned} H_0 : z_n &= x_n \\ H_1 : z_n &= s_n + x_n \end{aligned} \right\}, \quad n = 0, 1, \dots, M \cdot C - 1 \quad (7)$$

其中  $z_n$  为观测值， $x_n$  为高斯杂波， $s_n$  为目标的 1 维距离像的排列， $n$  代表了慢时间。

### 3 步进调频宽带雷达目标检测算法

步进调频雷达目标的合成高分辨距离像有其自身特点。首先，目标在中分辨域的每个采样点都有高分辨距离像，将它们顺序排列后，得到了一个含有  $C$  个距离像的单个回波序列；其次，目标相邻采样点的 1 维距离像是对同一目标在几乎相同的时刻

进行了冗余描述，所以式(7)中的  $C$  个距离像的强散射点分布具有很强的相似性，这一点从图 1 (b) 看出来；最后，由式(4)可以看出，相邻采样点高分辨距离像的相位是相同的，并且具有线性相位的特点。通过以上分析可以看出，对于式(7)中所描述的距离扩展目标检测模型，其关键是对距离像包络相似、载频相同的多个的距离像进行有效的能量积累。

由式(4)可以看出，目标高分辨 1 维距离像是其包络对频率为  $(M-1)/2\Delta f$  的载频信号的幅度调制，所以高分辨距离像的功率谱分布在  $(M-1)/2\Delta f$  附近。而式(7)中  $C$  个 1 维距离像包络相似、载频相同，可看作是单个高分辨距离像的周期延拓，其功率谱是单个高分辨距离像功率谱的离散化，所以功率谱仍然占据高频段，而杂波的功率谱将均匀分布于整个频段。图 2 给出了单个高分辨 1 维距离像的功率谱及相邻 5 个高分辨 1 维距离像顺序排列的功率谱， $M = 32$ ，步进频率  $\Delta f = 6 \text{ MHz}$ 。图 2 (a) 是目标高分辨距离像的复包络，图 2 (b) 是其功率谱；图 2 (c) 是目标相邻 5 个采样点高分辨距离像复包络的顺序排列，图 2 (d) 是其功率谱。可以看出顺序排列的高分辨距离像的功率谱集中在  $(M-1)/2\Delta f$  (本例中为 93 MHz) 附近，而杂波的功率谱均匀分布。

如果对式(7)中的  $C \cdot M$  点采样数据进行傅里叶变换，然后对  $(M-1)/2\Delta f$  附近的功率谱进行线性累加，就能实现对步进调频雷达目标回波能量的有效积累。需要指出的是，实际应用中  $C \cdot M$  一般不会超过  $2^{10}$  点，所以计算量不大，便于工程实现。对回波序列  $\{z(n) | n = 1, 2, \dots, C \cdot M\}$  进行 FFT 变换，令  $L = C \cdot M$ ，并对变换结果取模值，得到观测数据的功率谱序列为

$$|Z(k)|^2 = \left| \sum_{n=0}^{L-1} z(n) \exp\left(-j2\pi \cdot \frac{kn}{L}\right) \right|^2, \quad k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (8)$$

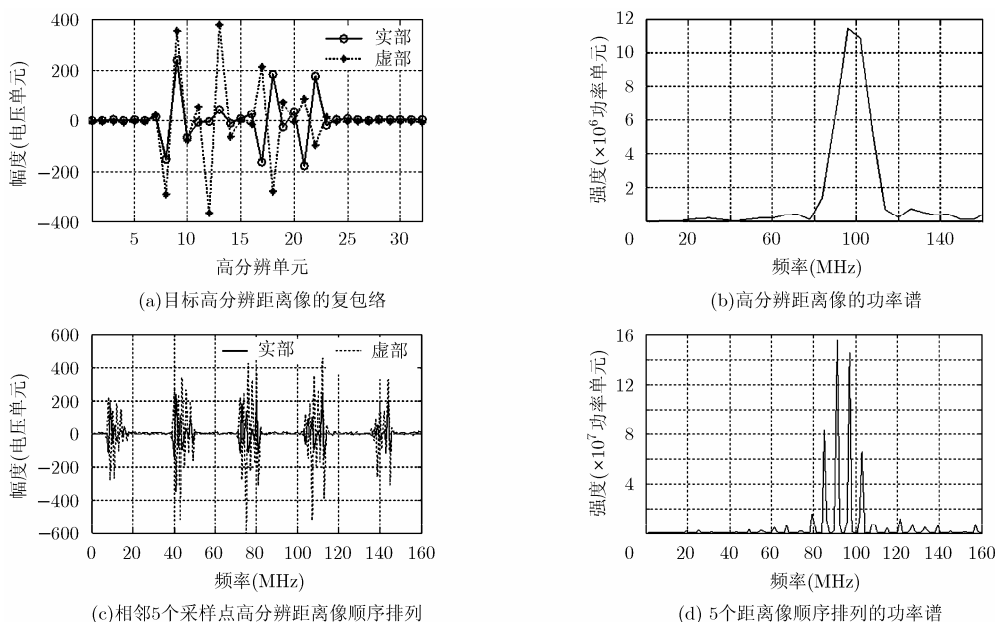


图 2 高分辨距离像的功率谱

利用回波序列功率谱中高频部分的能量构成检验统计量, 定义检测统计量为

$$R = \frac{1}{L \cdot \sigma^2} \sum_{k=\frac{L-D}{2}}^{\frac{L+D}{2}-1} |Z(k)|^2 \quad (9)$$

$D$  为目标功率谱宽度,  $D$  与雷达带宽和目标特性等因素有关, 可根据先验信息确定, 没有先验信息时可采用估计的方法得到, 另文详述。  $\sigma^2$  为背景杂波的功率, 可用检测窗口之外的数据得到其最大似然估计:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{M(N-C)} \sum_{m \notin W} |z(m)|^2 \quad (10)$$

当式(7)中的  $H_0$  成立时,  $z(n) = x(n)$ ,  $x(n) \sim N(0, \sigma^2)$ ,  $Z(k) = FFT(z(n), L)$ , 所以  $Z(k) \sim N(0, L\sigma^2)$ , 根据统计理论<sup>[13]</sup>, 检验统计量  $R = \frac{1}{L \cdot \sigma^2}$

$\sum_{k=0}^{D-1} |Z(k)|^2$  服从自由度为  $2D$  的  $\chi^2$  分布, 即  $R \sim \chi^2(2D)$ , 其概率密度函数为

$$f(R) = \frac{1}{2^D \Gamma(D)} R^{D-1} \exp\left(-\frac{R}{2}\right), \quad R > 0 \quad (11)$$

其中  $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数。

则虚警概率为

$$p_{fa} = \int_T^{+\infty} \frac{1}{2^D \Gamma(D)} R^{D-1} e^{-R/2} dR \quad (12)$$

其中  $T$  为检测门限。当虚警概率  $p_{fa}$  确定后, 便可以由式(12)求出检测门限  $T$ 。可以看出虚警概率与杂波的分布参数无关, 所以该检测器具有恒虚警 (CFAR) 特性。

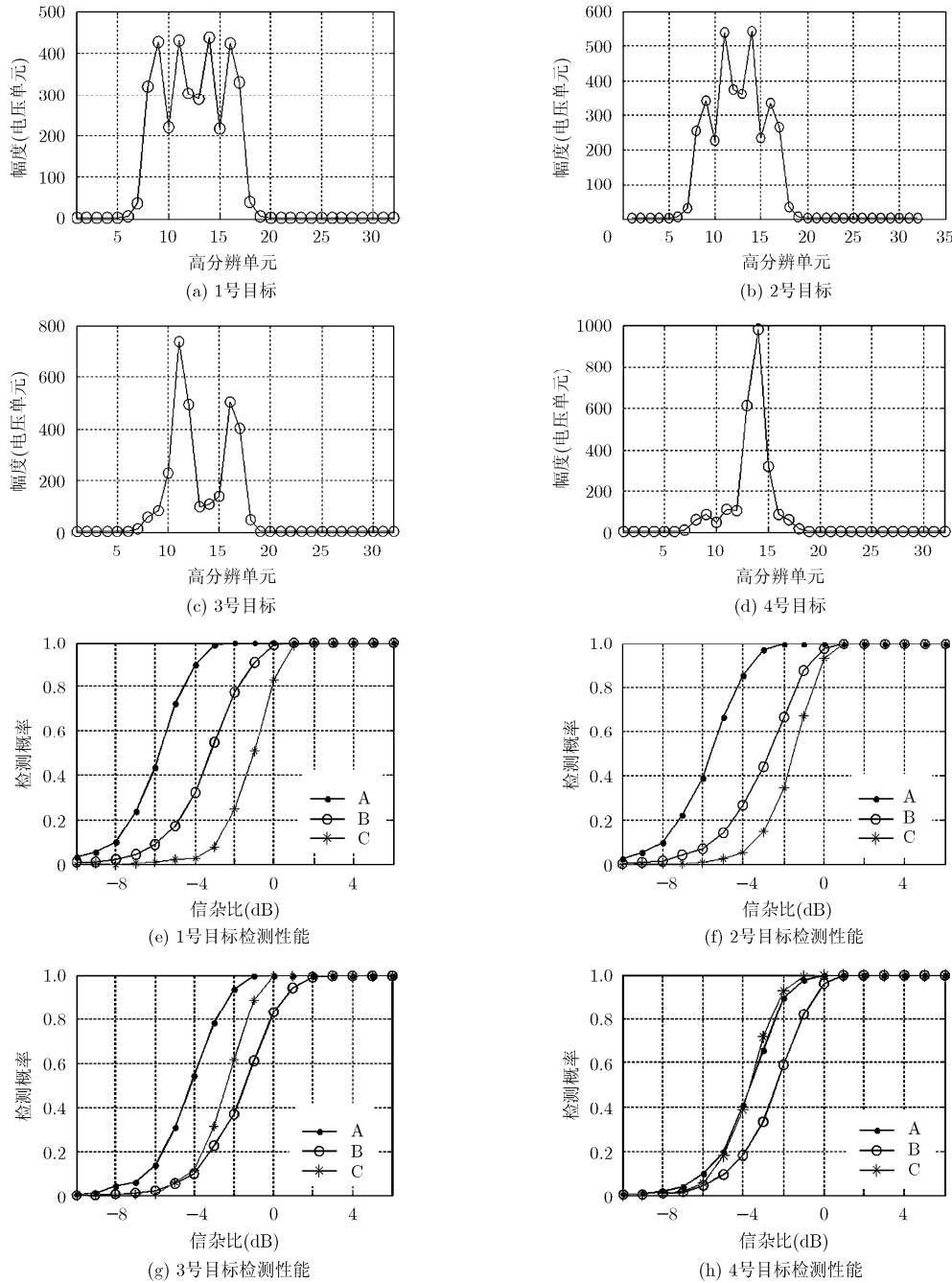
#### 4 检测性能仿真及结果分析

目标存在时检测概率的表达式比较复杂, 采用 Monte-Carlo 实验来验证算法的检测性能。仿真参数如下: 载频  $f_0 = 35$  GHz, 步进频率  $\Delta f = 6$  MHz, 子脉冲带宽  $B_c = 20$  MHz, 脉冲宽度  $T_p = 10$   $\mu$ s, 脉冲重复周期  $T_r = 200$   $\mu$ s, 采样频率  $f_s = 40$  MHz, 脉冲压缩过程采用汉明窗抑制旁瓣, 合成高分辨点数  $M = 32$ , 合成带宽 192 MHz。平均信杂比定义为

$$SCR = 10 \lg \left[ \frac{1}{n_c L \sigma^2} \sum_{k=0}^{D-1} |Z(k)|^2 \right] \quad (13)$$

其中  $n_c$  为式(7)中距离扩展目标强散射点的数目, 仿真试验中  $n_c = 50$ 。仿真过程中, 通过改变高斯杂波的方差  $\sigma^2$  来调整信杂比。虚警概率  $p_{fa}$  设为  $10^{-4}$ , 信杂比从 -10 dB 到 6 dB, 每次步进 1 dB, 对每一信杂比下的目标检测进行 1000 次 Monte-Carlo 模拟实验。

图 3 给出了 4 个距离扩展目标的检测性能曲线, 这 4 个目标模型的回波能量相等, 但分布不同。1 号目标的能量分布最均匀, 2 号目标有一半的能量集中在一个强散射点上, 另一半能量均匀分布, 3 号目标的能量主要集中在两个强散射点上, 4 号目标的能量集中在一个强散射点上, 近似点目标的情况。分别采用基于回波功率谱的距离扩展目标频域检测算法、目标抽取形成 1 维距离像后的目标检测算法<sup>[10]</sup>和基于视频积累的距离扩展目标检测算法<sup>[6]</sup>对每一个目标进行 Monte-Carlo 仿真, 仿真结果图 3 所示。根据仿真结果可以得出以下结论:



A: 基于回波功率谱的距离扩展目标频域检测算法, B: 目标抽取形成 1 维距离像后的目标检测算法, C: 基于视频积累的距离扩展目标检测算法

图 3 检测器对 4 种不同目标的检测性能曲线

(1)基于回波功率谱的距离扩展目标频域检测算法比目标抽取形成 1 维距离像以后的检测算法在检测性能上有约 3 dB 的改善。

(2)目标能量分布比较分散时,基于视频积累的距离扩展目标检测算法与本文的算法相比,检测损失达 5 dB,这是因为基于视频积累的算法是针对单个目标距离像而设计的,而式(7)中的目标模型为多个距离像模型,所以部分目标的能量被归入杂波,

提升了杂波的功率水平,从而影响了检测性能。

(3)目标能量分布趋于集中时,基于回波功率谱的距离扩展目标频域检测算法的性能有所下降,但检测性能的损失不超过 2 dB,说明这种检测算法对于目标的适应能力较强,具有良好的鲁棒性。

(4)目标能量集中于一个散射点时,距离扩展目标退化为点目标(如 4 号目标的情形),这时本文算法的性能与基于视频积累的距离扩展目标检测算法

的性能基本相同,因为这时式(7)中的多个距离像已经退化为多个点目标,目标模型与 $(N, K)$ 距离扩展目标模型类似。

## 5 结束语

本文研究了高斯杂波背景下步进调频宽带雷达距离扩展目标的一种频域检测算法。首先分析了步进调频宽带雷达距离扩展目标模型中距离像的特点;在此基础上,研究了一种基于回波功率谱的距离扩展目标频域检测算法,并对算法的检测性能进行了仿真,结果表明该算法的检测性能要比目标抽取后的检测算法提高约 3 dB。算法的计算量不大,便于工程实现,而且该算法同样适用于子脉冲采用其它调制方式的步进频率雷达的目标检测(如步进频率脉冲雷达、调频连续波雷达等)。步进调频雷达进行目标抽取形成高分辨距离像的过程,可以认为是对目标的多个距离像进行非相参积累,该过程只是利用了目标多个距离像的幅度信息。本文提出的基于回波功率谱的距离扩展目标频域检测算法则相当于对目标的多个高分辨距离像进行相参积累,不仅利用了距离像的幅度信息,而且利用了它们之间的相位信息,从而提高了信杂比,获得了检测性能的改善。本文的研究没有考虑雷达和目标之间的运动,背景杂波也假设为高斯分布,实际应用中,运动对步进调频宽带雷达信号处理的影响是需考虑的<sup>[14]</sup>,而且宽带雷达的杂波分布已具备明显的非高斯特性。所以,运动对步进调频宽带雷达目标检测的影响及非高斯杂波背景下的目标检测是下一步的研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] Wehner D R. High-Resolution Radar[M]. Boston: Artech House, 1995: Ch.p4-Ch.p5.
- [2] Liu Bo and Chang Wen-ge. Range alignment and motion compensation for missile-borne frequency stepped chirp radar[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, 136: 523-542.
- [3] Van Der Spek G A. Detection of a distributed target[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1971, AES-7(5): 922-931.
- [4] Hughes P K II. A high-resolution radar detection strategy[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1983, 19(5): 663-667.
- [5] Gerlach K, Steiner M, and F C Lin. Detection of a spatially distributed target in white noise[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1997, 4(7): 198-200.
- [6] 胡文明, 关键, 何友. 基于视频积累的距离扩展目标检测[J]. *火控雷达技术*, 2006, 35(12): 16-18.
- [7] Hu Wen-ming, Guan Jian, and He You. Range extension target detection based on video frequency accumulation[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2006, 35(12): 16-18.
- [7] 戴奉周, 刘宏伟, 吴顺君. 一种基于顺序统计量的距离扩展目标检测器[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(10): 2488-2492.
- [7] Dai Feng-zhou, Liu Hong-wei, and Wu Shun-jun. Order-statistic-based detector for range spread target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(10): 2488-2492.
- [8] 陈远征, 周剑雄, 付强. 扩展目标的最优二进制检测[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(1): 26-29.
- [8] Chen Yuan-zheng, Zhou Jian-xiong, and Fu Qiang. Optimal binary detection for distributed targets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 26-29.
- [9] 许述文, 水鹏朗. 一种提高距离扩展目标检测性能的新方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(6): 1053-1058.
- [9] Xu Shu-wen and Shui Peng-lang. New method for improving the performance of range-spread target detection[J]. *Journal of Xidian University*, 2010, 37(6): 1053-1058.
- [10] 王晓红, 金林, 高俊姣. 频率步进雷达距离扩展目标检测算法研究[J]. *现代雷达*, 2009, 31(5): 35-38.
- [10] Wang Xiao-hong, Jin Lin, and Gao Jun-jiao. A study on detection algorithm for range-distributed targets in stepped-frequency radar[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(5): 35-38.
- [11] 苏宏艳, 龙腾, 何佩琨, 等. 运动目标环境下的调频步进信号目标抽取算法[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(5): 915-918.
- [11] Su Hong-yan, Long Teng, He Pei-kun, et al. Target's redundancy removed algorithm for modulated frequency stepped pulse radar signal echoed by moving target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(5): 915-918.
- [12] Levanon N. Stepped-frequency pulse-train radar signal[J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, 2002, 149(6): 297-309.
- [13] 陈希儒, 郑忠国. 现代数学手册•随机数学卷[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000: 37-47.
- [14] 胡杰民, 付耀文, 魏玺章, 等. 调频步进雷达高速运动目标距离像合成方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(7): 1757-1760.
- [14] Hu Jie-min, Fu Yao-wen, Wei Xi-zhang, et al. Research on range profile synthesizing method for high speed moving target in stepped frequency modulated radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(7): 1757-1760.

刘 博: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为宽带雷达信号处理及工程实现技术。

常文革: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事超宽带雷达的系统设计和成像处理等方面的研究。