

DOI: 10.7652/xjtuxb201310004

距离扩展目标回波序列的慢时间谱积累检测器

问翔¹, 刘宏伟¹, 包敏²
(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安;
2. 西安电子科技大学电子工程学院, 710071, 西安)

摘要: 针对目标高速运动引起宽带雷达回波间包络平移使得距离扩展目标的检测率降低的问题, 提出了一种距离扩展目标回波序列的慢时间谱积累(STSI)检测器。采用频率-慢时间模型描述距离扩展目标信号, 将宽带雷达回波脉压后变换到距离频率域, 然后对回波序列各频率单元沿着慢时间作傅里叶变换, 最后将各频率向量的最大值累加与检测门限比较进行检测判决。STSI 检测器不需要目标运动的先验信息, 具有恒虚警检测性能, 对目标运动引起的散射点跨距离单元走动不敏感。仿真试验表明, 与不依赖散射点分布信息的广义似然比检测器相比, STSI 检测器在检测率 90% 处有 5 dB 的性能改善。

关键词: 宽带雷达; 距离扩展目标; 雷达目标检测; 频率-慢时间

中图分类号: TP958.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)10-0018-07

A Slow Time Spectrum Integrate Detector for Range Spread Target Echo Sequence

WEN Xiang¹, LIU Hongwei¹, BAO Min²
(1. Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Electrical Engineering School, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A detector of slow time spectrum integrate (STSI) is proposed to solve the detect rate reducing problem of range spread target that is caused by the envelope migration among wideband radar echo sequences when targets are moving at high speed. A frequency-slow time dimension model is used to describe the range spread target signal, and the wideband radar echo is transformed to a range-frequency domain after pulse compression. Then the Fourier transformation is performed for each range-frequency cell, and the sum of each spectrum vector's maximum value is compared with detect threshold for detect judgment. The STSI detector does not require any pre-information of target motion, possesses constant false alarm rate performance, and is not sensitive to the migration through resolution cell caused by target motion. Simulation results and comparison with the non-scatterer density dependent generalized likelihood ratio test detector show that the STSI detector achieves 5 dB performance improvement at 90% detect rate.

Keywords: wideband radar; range spread target; radar target detection; frequency-slow time

现有的距离扩展目标多次回波情况下的广义似然比检测器及其改进算法, 大多忽略了目标在多次回波间因为运动引起的距离走动问题^[1-6], 或假设目标运动的导向矢量已知或是可以准确估计^[7-10]。然

收稿日期: 2013-03-21。 作者简介: 问翔(1977—),男,博士生;刘宏伟(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60901067,61001212,61201284);新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-09-0630);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0954)。

而,在实际应用中,高距离分辨雷达在许多情形下不同回波间目标的距离走动是不可忽略的,导向矢量也无法以高精度估计得到。当估计的导向矢量与实际导向矢量失配时,会造成检测器性能的恶化^[11]。原因是目标高速运动使得宽带雷达信号回波间包络产生平移,多次回波的积累效果不佳,造成了检测率降低。

在回波间存在距离走动的情况下,经过脉冲压缩后,频率-慢时间模型描述的信号可以看作以回波次数为变量的单频复谐波信号。沿着慢时间对各个距离频率单元信号进行傅里叶变换,谱峰可实现对目标信号的聚集。因此,本文提出了慢时间谱积累(STSI)检测器,讨论了在高斯噪声背景下检测门限的设置,理论分析表明检测器具有恒虚警性能,不需要目标的运动速度和散射点分布的先验信息。仿真试验表明,STSI 检测器在检测率为 90% 时,相比不依赖散射点分布的广义似然比检测器(NSDD-GLRT)有约 5 dB 的性能改善。

1 距离扩展目标的 STSI 检测器

设雷达发射大时宽带宽积的线性调频信号脉冲串,在相参处理时间内发射了 M 个脉冲。假设目标上有 L 个散射强度较强的散射点,在第一个脉冲发射时刻,目标上第 l 个散射强度为 σ_l 的散射点与雷达间的距离为 R_l ,设在脉冲串处理时间内,目标相对雷达的径向速度为 v ,雷达脉冲重复周期为 T_r ,则第 m 次目标回波信号为

$$s(t_k, mT_r) = \sum_{l=1}^L \sigma_l p\left(t_k - 2 \frac{R_l + vmT_r}{c}\right) \cdot \exp\left(-j4\pi f_c \frac{R_l + vmT_r}{c}\right) \quad (1)$$

式中: t_k 为脉冲发射时刻起计算的快时间; f_c 为雷达工作频率; c 为电磁波传播速度; $p(t_k)$ 为发射信号的复包络。

回波包络中的时间延迟项 $2vmT_r/c$ 会引起散射点的走动,由于该项难于在距离时间域直接处理,因此将式(1)对快时间进行傅里叶变换,变换到距离频率域,并进行匹配滤波,其结果为

$$S(f, mT_r) = P^*(f)P(f) \sum_{l=1}^L \sigma_l \cdot \exp\left[-j4\pi(f_c + f) \frac{R_l + vmT_r}{c}\right] \quad (2)$$

式中: $P(f)$ 为发射复包络信号的频谱,有 $P^*(f)P(f) = |P(f)|^2$ 。

高分辨率雷达一般采用大时宽带宽积的线性调

频信号,其能量谱近似为宽度为带宽的矩形,脉压后每个散射点回波包络信号为一个 Sinc 函数。如果离散采样的采样率等于信号带宽,则采样后只需要考虑每个散射点回波信号的主瓣。假设检测窗采样点数为 N ,且记第 l 个散射点的幅度与初始相位组合为 $\bar{a}_l = \sigma_l \exp(-j4\pi f_c R_l/c)$,则有脉冲压缩后回波信号的离散频谱为

$$S(k, m) = \exp\left[-j4\pi\left(\frac{Bk}{N} + f_c\right) \frac{vT_r}{c} m\right] \cdot \sum_{l=1}^L \bar{a}_l \exp\left(-j4\pi \frac{R_l B}{Nc} k\right) \quad (3)$$

式中: B 为发射信号带宽。

若记 $\tilde{A}_k = \sum_{l=1}^L \bar{a}_l \exp\left(-j4\pi \frac{R_l B}{Nc} k\right)$, 记 $\omega_k = -j4\pi(Bk/N + f_c)vT_r/c$, 则式(3)可整理为

$$S_k(m) = \tilde{A}_k \exp(\omega_k m) \quad (4)$$

式中: k 为距离频率单元序号, $k=0, 1, \dots, N-1$; m 为回波次数对应的序号,即慢时间序号, $m=0, 1, \dots, M-1$ 。

式(4)可看作为一个单频复谐波信号形式,幅度和相位由目标上各散射点的散射强度和在各脉冲时刻位置的矢量和确定,频率则由多普勒频率和距离频率单元序号确定。若对式(4)沿着回波序号,即慢时间进行傅里叶变换并取模值,则有

$$|S_k(r)| = |\tilde{A}_k| M \text{sinc}[\pi(r - \omega_k)] \quad (5)$$

其最大值,即谱峰值为

$$|S_k(\omega_k)| = |\tilde{A}_k| M \quad (6)$$

傅里叶变换可实现目标信号在多普勒域的能量聚集。将 N 个距离频率单元序列进行傅里叶变换,并将幅度的最大值相加,可实现对目标能量的积累。当没有目标回波信号时,就没有幅值特别高的谱峰,利用这一差异,可对目标进行检测。

利用傅里叶变换实现目标信号在多普勒域的能量聚集,进而进行距离扩展目标检测的前提是目标上的散射点在相关处理时间内具有相同的多普勒频率。然而,实际上由于目标相对雷达的运动有转动存在,因此目标上的不同散射点具有不同的多普勒频率,此时式(3)为

$$S(k, m) = \exp\left[-j4\pi\left(\frac{Bk}{N} + f_c\right) \frac{vT_r}{c} m\right] \cdot \sum_{l=1}^L \bar{a}_l \exp\left(-j4\pi \frac{R_l B}{Nc} k\right) \cdot \exp\left[-j4\pi\left(f_c + \frac{Bk}{N}\right) \frac{v_l T_r}{c} m\right] \quad (7)$$

式中: v_l 为目标上第 l 个散射点相对于雷达的运动

速度。

由式(7)可见,当目标上散射点具有不同的微多普勒频率时,回波信号不再是单频率复谐波的形式,而是具有以目标径向速度的多普勒频率为中心的多个复谐波和的形式。谐波的数量即是散射点的数量。此时傅里叶变换的最大值不能有效地聚集目标散射点的能量,造成检测性能下降,下降的程度与散射点数量、微多普勒频率和散射强度有关。当雷达脉冲重复频率较高时,在较短的相参处理时间内,目标转动引起的微多普勒频率较小,可以保证检测器的有效性。

目标散射点在回波间的跨距离单元走动、跨多普勒分辨单元走动和越分辨单元徙动等“三跨”问题是距离扩展目标检测的难点问题。由上述分析可知,当目标上各散射点相对雷达具有相同的运动速度时,STSI 检测器对“三跨”问题是不敏感的。但是,在实际中,目标相对雷达的运动较为复杂,不同散射点具有不同的多普勒频率,此时 STSI 检测器对“三跨”问题是敏感的,其回波信号的表达式应该为式(7)的形式,检测性能将下降。由于在大部分宽带雷达检测的应用中,脉冲串处理时间较短,目标上散射点之间的多普勒频率差异可以忽略,因此 STSI 检测器可以忽略“三跨”问题。

2 检测门限设置与恒虚警

对于以飞机、导弹和卫星等作为探测目标的雷达,在检测端,与目标信号竞争的主要是接收机热噪声,在没有目标的情况下,第 m 次采样为样本数 N 的复高斯噪声。设噪声的方差为 σ^2 ,每次回波沿着距离单元进行傅里叶变换后的噪声仍是复高斯分布,方差为 $N\sigma^2$,则每个距离频率单元序列的信号沿着回波时间序号进行 M 点的傅里叶变换后,为方差 $MN\sigma^2$ 的复高斯噪声,每一个距离频率单元傅里叶变化后的 M 个样本的模值为瑞利分布,其最大值的概率分布函数为

$$F(x) = \left[1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2MN\sigma^2}\right) \right]^M \quad (8)$$

概率密度函数为

$$f(x) = \frac{x}{N\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2MN\sigma^2}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2MN\sigma^2}\right) \right]^{M-1} \quad (9)$$

当距离单元数较大时,服从中心极限定律, N 个最大值相加得到的统计量可认为服从高斯分布。高斯分布的均值和方差可以从式(9)计算得到,均值和方

差分别为

$$\mu_n = \sigma \sum_{k=0}^{M-1} C_k^{M-1} \left[\frac{\pi M^3 N}{2(k+1)^3} \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\sigma_n^2 = \sigma^2 \sum_{k=0}^{M-1} 2C_k^{M-1} \frac{M^2 N}{(k+1)^2} - \left\{ \sigma \sum_{k=0}^{M-1} C_k^{M-1} \left[\frac{\pi M^3 N}{2(k+1)^3} \right]^{1/2} \right\}^2 \quad (11)$$

则可得在没有目标信号时回波的概率密度函数为

$$f_n(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_n} \exp\left[-\frac{(x-\mu_n)^2}{2\sigma_n^2}\right] \quad (12)$$

设虚警概率为 P_{fa} ,有虚警概率与检测门限 T_d 的关系为

$$P_{fa} = \int_{T_d}^{+\infty} \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_n} \exp\left[-\frac{(x-\mu_n)^2}{2\sigma_n^2}\right] dx = \Phi\left(\frac{T_d - \mu_n}{\sigma_n}\right) \quad (13)$$

式中: $\Phi(x)$ 为标准正态分布的积分。由式(13)可见,虚警概率只与检测门限和噪声均值方差有关,可以通过估计噪声方差来设置合适的门限,使得虚警率恒定,STSI 检测器具有恒虚警性能。

上述 STSI 检测器的检测门限设置是在高斯白噪声情况下得到的。在背景为不服从高斯分布的杂波情况下,检测器将失配。在式(8)~式(13)的推导过程中,如果回波的距离单元数较大,在回波没有目标信号,而是非高斯分布的杂波时,经过变换处理后得到的统计量满足大数定律,服从高斯分布,此时的高斯分布均值与方差需要由具体的杂波概率分布函数来求解。如果还按照高斯分布噪声估计的均值方差来设置检测门限,则所估计的误差会造成检测性能有一定程度的下降。可见,STSI 检测器在背景噪声或杂波是非高斯分布时,具有一定的适应性。

3 运算量分析比较

由慢时间谱积累检测统计量计算过程可见,对 N 个距离频率单元信号进行 M 点的快速傅里叶变换运算,一共需要进行 $(MN/2)\ln M$ 次复数乘法和 $MN\ln M + M + N - 2$ 次复数加法运算。NSDD-GLRT 检测器^[1,4]对 M 次回波的 N 点长度距离扩展目标计算检测统计量需要进行 $3MN + 3N + 1$ 次复数乘法、 $2MN - 1$ 次复数加法运算和 N 次对数运算。对于实际使用中的宽带雷达,受接收机前端处理带宽的限制,大多采用 Dechirp 处理方式,在接收机混频后需要进行傅里叶变换才能得到距离扩展目标的距离像信号。若使用快速傅里叶变换算法计算目标的距离像信号,要得到 M 次回波的距离像信号

需要进行 $(MN/2)\text{lb}N$ 次复数乘法运算和 $MN\text{lb}N$ 次复数加法运算。对于 NSDD-GLRT 算法而言,若使用 Dechirp 方式来得到距离扩展目标的距离像信号后再进行检测,一共需要进行 $(\text{lb}N/2+3)MN+3N+1$ 次复数乘法运算、 $(\text{lb}N+2)MN-1$ 次复数加法运算与 N 次对数运算。当目标的运动没有超过检测处理波门的情况下,Dechirp 相参处理后的信号,就是频率-慢时间模型描述的距离扩展目标信号在频率域的表达式,无需进行傅里叶变换就可采用 STSI 检测器。可见,相比 STSI 检测器,在每次回波的距离扩展目标信号采样点数较大的情况下,NSDD-GLRT 检测器的运算量较大。在处理速度要求较高的场合,STSI 检测器具有更大的优势。

4 仿真试验

本节使用仿真数据对 STSI 检测器的检测性能和有关的推导结果进行验证。第 1 组试验是对快、慢时间作傅里叶变换后取最大值的 N 个随机变量和,减去按照式(10)计算得到的均值,并除以按照式(11)计算得到方差后得到的随机变量的统计特性。

随机变量是否服从标准正态分布,可以通过均值、标准差、偏度和峰度等统计特征来判断。偏度是统计数据分布偏斜方向和程度的度量,是统计数据分布非对称程度的数字特征。峰度又称峰态系数,是表征概率密度分布曲线在平均值处峰值高低的特征数。 N 个随机变量的偏度和峰度分别为

$$S_k = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - m)^3}{(N-1)(N-2)s^3}$$

(14)

$$K_u = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - m)^4}{(N-1)s^4}$$

(15)

式中: m 为随机变量的均值; s 为随机变化的标准差。

服从标准正态分布的随机变量均值为 0,标准差为 1,偏度为 0,峰度为 3。如果第 2 节分析的理论正确,按照上面计算得到的随机变量的各统计量应该接近标准正态分布随机变量的理论值。设检测窗距离单元数为 50,当积累脉冲回波数为 4、8、16 和 32 时,分别产生 50 行 4 例、50 行 8 列、50 行 16 列和 50 行 32 列的高斯复随机变量,经过快、慢时间傅里叶变换后,取 50 行的最大值求和。进行 10^6 次试验后,对结果求均值、方差、偏度和峰度,结果如表 1 所示。

从表 1 的结果可见,随着脉冲积累数的增加,均

值逐渐趋近于 0,方差逐渐趋近于 1,但有所起伏,偏态和峰态的情况相同。可见在检测窗距离单元数为 50 时,经过对快、慢时间的傅里叶变换后,样本趋近于标准正态分布。

表 1 噪声经过快、慢时间傅里叶变换后的统计特性

积累脉冲数	N 个随机变量和的统计特征			
	均值	标准差	偏度	峰度
4	0.082 8	0.891 2	0.032 8	2.992 8
8	0.061 8	0.963 2	0.082 6	3.001 6
16	0.043 2	0.963 0	0.098 5	3.012 6
32	0.025 1	0.910 1	0.113 1	3.016 2

第 2 组试验是在不同散射点数和不同脉冲积累数的情况,对 STSI 检测器的检测性能进行验证。试验使用了 4 种散射点模型,散射点数量分别为 3、4、5 和 10。每个散射点占据 1 个距离分辨单元,幅度服从瑞利分布,相位随机产生。检测窗距离单元数为 50,当回波脉冲积累数分别为 4、8、16 和 32 时,进行 10^4 次试验,取平均作为最后的检测结果,虚警概率设为 10^{-4} 。目标在 2 个脉冲之间回波有 2 个距离单元的平移。试验结果如图 1 所示。

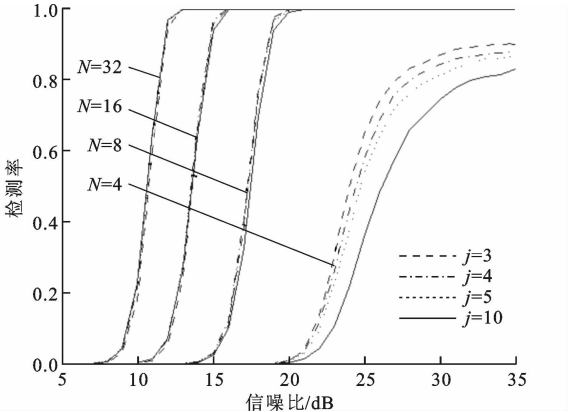


图 1 不同散射点、不同回波脉冲积累数时 STSI 检测器的检测结果

由图 1 的结果可见,随着脉冲积累数的增加,STSI 检测器的性能得到提高。STSI 检测器对于不同的散射点数量的回波信号的检测能力基本相同。在脉冲积累数为 4 时,STSI 检测器的检测率没有达到 100%。从表 1 的噪声接近高斯分布的仿真结果可见,当脉冲积累数为 4 时,其均值是偏离 0 最大的,按照标准正态分布设置的检测门限会带来一定的检测性能损失。按照第 2 节的理论分析,当慢时间傅里叶变换后的离散频率采样正好位于单频信号的频率时,目标能量积累达到最大,检测性能也最好。慢时间变量的单频信号的频率与脉冲重复周

期、目标运动速度等因素有关。因此,当回波脉冲数较少时,慢时间频率上的采样间隔较为稀疏,能采到谱峰最大值的概率降低,而当脉冲回波积累数较多时,相对频率采样点较多,得到的谱峰最大值也相对较大,其检测能力也相应的要好。这也是在脉冲积累数是 4 时,随着信噪比的增加,检测率没有能够达到 100% 的原因。

第 3 组实验验证 STSI 检测器对不同运动速度目标的检测能力。设 v 为 2 次相邻回波之间目标的单位运动速度,定义为距离分辨单元(单位:m)除以脉冲重复周期(单位:s),即 $v=R_d/T_r$,其中 T_r 为脉冲重复周期; R_d 为距离分辨单元, $R_d=c/2B$, c 为电磁波传播速度, B 为信号带宽。设目标的运动速度分别为 v 、 $1.1v$ 、 $1.2v$ 、 $1.3v$ 、 $1.4v$ 和 $1.5v$ 等 6 种情况。脉冲积累数分别为 8、16 和 32。检测窗距离单元数为 50,目标上散射点数为 10,每个散射点占据 1 个距离分辨单元,进行 10^4 次试验,取平均值作为最后的检测结果,虚警率设为 10^{-4} 。试验结果如图 2 所示。

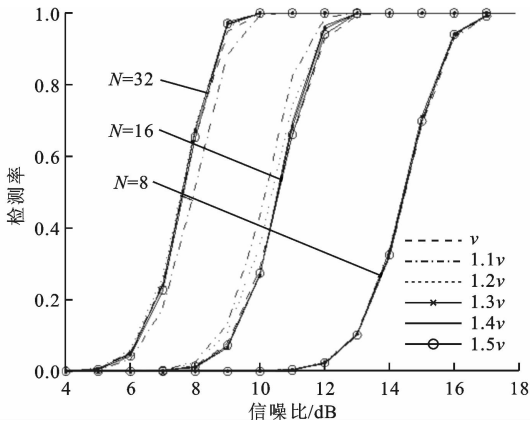


图 2 STSI 检测器对不同运动速度下目标的检测性能比较

由图 2 的仿真试验结果可见,在积累单元数为 8 时,目标移动速度对检测能力没有影响,当积累脉冲数为 16 和 32 时,不同速度的检测性能稍有差异,但差别不大。可见 STSI 检测器对于目标的运动速度不敏感。

第 4 组试验是在目标上各散射点存在不同微多普勒频率的情况下对 STSI 检测器的检测性能进行验证。回波距离单元数为 50,目标散射点数分别为 3、5 和 10,脉冲积累数为 32。引起目标散射点的微多普勒频率的速度为一定区间上的均匀分布的随机数,区间范围分类 $0\sim v$ 、 $0\sim 0.1v$ 和 $0\sim 0.01v$,其中 v 为第 3 组试验中定义的 2 次相邻回波之间目标的单位运动速度。每个信噪比情况下进行 10^4 次试

验,取平均值作为结果,并与散射点具有相同多普勒频率的检测情况进行比较,结果如图 3 所示。

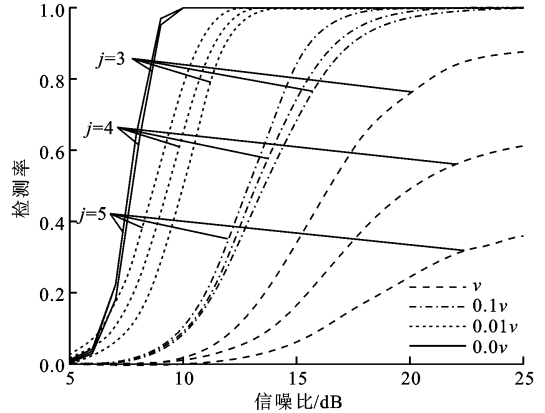


图 3 散射点具有不同多普勒频率时的检测结果

由图 3 可见,在目标散射点的微多普勒频率不同且相差较大时,检测结果较差,而且散射点数量较多的比较少的结果差,这与理论分析一致。

第 5 组试验是对 STSI 检测器在非高斯杂波下的适应性进行试验。检测窗距离分辨单元数为 50,假设目标上的散射点数为 5,目标运动速度为 2 次回波间有 2 个距离单元的走动。杂波服从 Gamma 分布,拖尾参数 $L=1$,脉冲积累数为 16 和 32,分别在杂波和高斯噪声中进行检测性能对比,结果如图 4 所示。

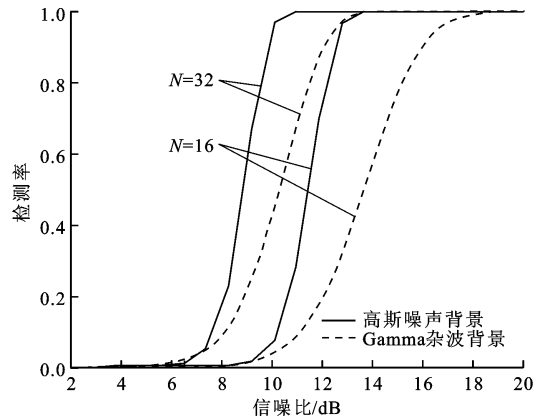


图 4 STSI 检测器在高斯噪声和 Gamma 杂波中的比较

由图 4 的仿真结果可见,STSI 检测器在非高斯背景下具有一定的适应性,但因为环境背景与假定的高斯分布不匹配,在 Gamma 分布杂波情况下,检测性能下降,在检测率为 90% 处约有 2 dB 的性能下降。

第 6 组试验对 STSI 检测器与 NSDD-GLRT 检测器的检测能力进行比较。试验采用的是在高斯噪声背景中的 NSDD-GLRT 检测器。假设检测窗距离单元数为 50,设目标上散射点数为 5,每个散射点占据一个距离分辨单元。因为 NSDD-GLRT 检测

器都是在回波之间目标没有走动或多普勒导向矢量已知的情况下推导的,因此在试验中假设目标无运动。NSDD-GLRT 检测器的噪声协方差矩阵可以从不含有目标回波信号的辅助数据估计。设脉冲积累数为 16 和 32,虚警概率为 10^{-4} ,试验次数为 10^4 ,试验结果如图 5 所示。

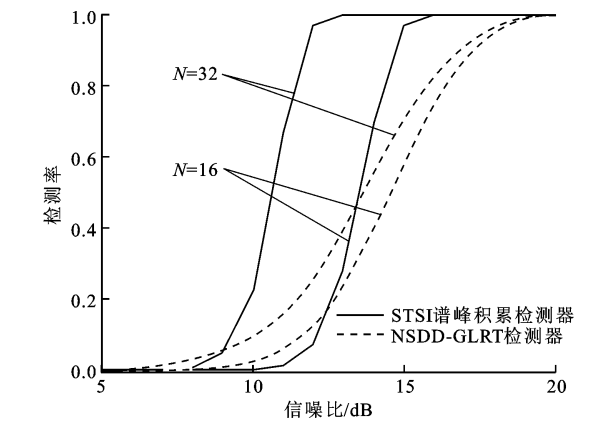


图 5 STSI 检测器和 NSDD-GLRT 检测器的性能比较

从图 5 的试验结果可见,STSI 检测器相比 NSDD-GLRT 检测器的检测性能有一定程度的提高。这是由于 NSDD-GLRT 检测器仅使用了检测窗内所有距离单元的数据相加,对于目标运动的情况,假设目标运动的导向矢量已知或可以通过高精度的估计得到。由于 STSI 检测器考虑了目标在检测窗内运动的多普勒情况,在距离频率域进行傅里叶变换,利用了目标的多普勒频率进行目标检测,因此检测性能相对有所提高。对于第 6 组试验,因为假定目标没有运动,多普勒频率为 0,傅里叶变换后第一个点的值最大,所以相应的 STSI 检测器的检测率要比 NSDD-GLRT 高。

在进行第 6 组仿真试验时,对 STSI 检测器和 NSDD-GLRT 检测器的运算量进行了统计。计算完成一个信噪比的 10^4 次仿真试验所需要的时间取平均作为算法的运算时间。仿真试验在 PC 机上进行,计算机处理器为 Intel(R)E7400,主频 2.8 GHz,仿真软件为 MALAB7.10,对比结果如表 2 所示。

表 2 2 种检测器的计算时间比较

脉冲积 累数	计算时间/ms	
	STSI 检测器	NSDD-GLRT 检测器
4	1.8	4.8
8	2.0	4.9
16	2.1	5.0
32	2.2	5.2

由表 2 的结果比较可见,STSI 检测器相比

NSDD-GLRT 检测器在不同积累脉冲数情况下大约要少 3 ms 的运算时间,STSI 检测器具有比 NSDD-GLRT 检测器更快的运算速度。

5 结 论

理论分析了频率-慢时间模型描述的距离扩展目标回波信号,在经过脉冲压缩后的快时间频率慢时间域,沿着各距离频域单元信号可以表示为一个单频复谐波信号,对慢时间进行傅里叶变换可以达到聚集目标信号的作用。提出了距离扩展目标的 STSI 检测器,并给出了检测门限。理论和仿真试验表明,STSI 检测器对散射点分布情况有较好的稳健性,不需要知道目标运动参数,对回波包络的运动不敏感,具有恒虚警能力。

参考文献:

[1] CONTE E, ANTONIO D M, RICCI G. GLRT-based adaptive detection algorithms for range-spread targets [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(7): 1336-1348.

[2] FRANCESCO B, MAIO D, STEFANO A, et al. Adaptive radar detection of distributed targets in homogeneous and partially homogeneous noise plus subspace interference [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55 (4): 1223-1237.

[3] CONTE E, MAIO D, RICCI G. CFAR detection of distributed targets in non-Gaussian disturbance [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2002, 38(2): 612-621.

[4] KARL G, STEINER M, LIN F C. Detection of a spatially distributed target in white noise [J]. IEEE Letters on Signal Processing, 1997, 4(7): 198-200.

[5] KARL G, STEINER M. Adaptive detection of range distributed targets [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(7): 1844-1851.

[6] KARL G, STEINER M. Spatially distributed target detection in non-Gaussian clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1999, 35 (3): 926-934.

[7] 戴奉周,刘宏伟,吴顺君. 高分辨雷达距离-多普勒扩展目标广义自适应子空间检测器 [J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(10): 1384-1393.

DAI Fengzhou, LIU Hongwei, WU Shunjun. Generalized adaptive subspace detector for range-Doppler spread target with high resolution radar [J]. Science China: Information Sciences, 2010, 40 (10): 1384-1393.

- [8] 简涛, 何友, 苏峰, 等. SIRV 杂波下距离扩展目标 CFAR 检测器 [J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2740-2744.
JIAN Tao, HE You, SU Feng, et al. Range-spread target CFAR detection under SIRV clutter [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12): 2740-2744.
- [9] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 非高斯杂波下距离扩展目标检测器的失配性能分析 [J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1478-1482.
JIAN Tao, HE You, SU Feng, et al. Performance assessment of range-spread target detector for unwanted signal in non-Gaussian clutter [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1478-1482.
- [10] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 非高斯背景下基于动态阈值的距离扩展目标检测器 [J]. 电子学报, 2011, 39(1): 59-63.
JIAN Tao, HE You, SU Feng, et al. Range-spread target detector with dynamic threshold for non-Gaussian clutter [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 59-63.
- [11] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 非高斯杂波下修正的 SDD 距离扩展目标检测器 [J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2662-2667.
JIAN Tao, HE You, SU Feng, et al. Modified SDD-GLRT detector for range-spread targets in non-Gaussian clutter [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2662-2667.
- [12] DAI Fengzhou, WANG Penghui, LIU Hongwei, et al. Detection performance comparison for wideband and narrowband radar in noise [C] // Proceedings of IEEE International Radar Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 794-799.
- [13] RANGASWAMY M, WEINER D, OZTURK A. Non-Gaussian random vector identification using spherically invariant random process [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1993, 29(1): 111-124.

(编辑 刘杨)

(上接第 12 页)

用本文的方法隔离的驱动,可有效隔离驱动故障,从而提高宿主机的可靠性。

参考文献:

- [1] SWIFT M M, BERSHAD B N, LEVY H M. Improving the reliability of commodity operating systems [J]. ACM Transactions on Computer Systems, 2005, 23(1): 77-110.
- [2] LEVASSEUR J, UHLIG V, STOESS J, et al. Unmodified device driver reuse and improved system dependability via virtual machines [C] // Proceedings of the 6th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation. Berkeley, CA, USA: USENIX, 2004: 17-30.
- [3] TAN L, CHAN E M, FARIVAR R, et al. iKernel: isolating buggy and malicious device drivers using hardware virtualization support [C] // Proceedings of the Third IEEE International Symposium on Dependable, Autonomic and Secure Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 134-144.
- [4] GANAPATHY V, RENZELMANN M J, BALAKRISHNAN A, et al. The design and implementation of microdrivers [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2008, 42(2): 168-178.
- [5] WILLIAMS D, REYNOLDS P, WALSH K, et al. Device driver safety through a reference validation mechanism [C] // Proceedings of the 8th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation. Berkeley, CA, USA: USENIX, 2008: 241-254.
- [6] 华保健, 陈意云, 李兆鹏, 等. 安全语言 PointerC 的设计及形式证明 [J]. 计算机学报, 2008, 31(4): 556-564.
HUA Baojian, CHEN Yiyun, LI Zhaopeng, et al. Design and proof of a safe programming language PointerC [J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(4): 556-564.
- [7] ZHOU F, CONDIT J, ANDERSON Z, et al. SafeDrive: safe and recoverable extensions using language-based techniques [C] // Proceedings of the 7th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation. Berkeley, CA, USA: USENIX, 2006: 45-60.
- [8] CASTRO M, COSTA M, MARTIN J, et al. Fast byte-granularity software fault isolation [C] // Proceedings of the ACM SIGOPS 22nd Symposium on Operating Systems Principles. New York, USA: ACM, 2009: 45-58.
- [9] ZHENG Hao, ZHANG Xinjun, WANG Endong, et al. Achieving High Reliability on Linux for K2 System [C] // Proceedings of the 2012 IEEE/ACIS 11th International Conference on Computer and Information Science. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 107-112.

(编辑 刘杨)