

一种距离扩展目标的检测方法

夏宇垠, 冯大政, 李 涛

(西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071, xia.yuyin@gmail.com)

摘 要: 针对宽带雷达中距离扩展目标的回波特性, 提出了一种对高分辨距离像数据进行目标检测的新算法. 先用窗函数估计目标的位置和噪声强度, 并采用模糊门限映射对目标数据进行转换, 再假设目标匀速平动对各次回波进行包络对齐, 最后在对目标的导向矢量进行估计的基础上得到基于模糊门限映射的广义似然比 (FTMD-GLRT) 检测算子, 并简要分析了该方法的恒虚警率性. 实验结果表明, 与基于散射点密度的广义似然比检测算法相比, FTMD-GLRT 算法检测性能有明显的提高, 可有效地解决宽带雷达的目标检测问题.

关键词: 检测算子; 距离扩展目标; 高分辨距离像; 模糊门限映射; 恒虚警率

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)07-1149-04

A novel detection scheme for range-spread targets

XIA Yu-yin, FENG Da-zheng, LI Tao

(National Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China, xia.yuyin@gmail.com)

Abstract: A new detection scheme for range-spread broadband radar target using high-resolution range profiles (HRRP) is proposed. The location of the target and the noise power were estimated in a window function, and a fuzzy threshold map was used to refine the target data, then envelope alignment was carried out through the target moving with a constant velocity. Finally, the detector of fuzzy threshold map dependent generalized likelihood rate test (FTMD-GLRT) was derived based on the estimation of signal steering vector. Remarkably, the detection scheme ensures the constant false alarm rate (CFAR) property with respect to the unknown noise power. Experimental results of the measured data of three kinds of planes show that the proposed scheme achieves a visible performance improvement compared with the scatter density dependent generalized likelihood rate test (SDD-GLRT).

Key words: detectors; range-spread target; high-resolution range profiles; fuzzy threshold map; constant false alarm rate

在宽带雷达体制下(以 ISAR 为例), 目标存在距离扩展, 其回波为高分辨距离像(HRRP). 国内外对距离扩展目标的检测已有较多研究^[1-5], 文献[1-3]为相参检测算法, 但文献中的目标模型只把窄带目标情况作简单地推广, 并未考虑宽带雷达中脉冲重复周期期间的越距离单元走动(MTRC)^[6]、初相起伏等实际问题. 文献[4-5]研究了非相参检测算法, 计算量虽小, 但检测性能并不理想. 因此研究针对宽带雷达的新检测算法具有重要的现实意义.

本文根据实测数据的特性对 ISAR 回波模型做简化, 使其适用于检测问题, 在此基础上建立了

检测流程, 并通过实验验证算法的检测性能.

1 ISAR 信号检测模型

1.1 ISAR 回波模型

对于实际非合作 ISAR 目标, 若不发生散射点 MTRC, 在第 d 个距离单元里有 L_d 个散射点, 则该距离单元的第 m 次复回波 $x_d(m)$ 可表示为^[7]

$$x_d(m) = \exp[j\psi(m)] \sum_{i=1}^{L_d} \sigma_{di} \exp[j\phi_{di}(m)] + w_d(m). \quad (1)$$

其中: $\psi(m) = -4\pi R(m)\lambda^{-1}$ 为第 m 次回波的初相, $R(m)$ 为第 m 次回波时目标转动中心与雷达的径向距离; σ_{di} 为该单元中第 i 个散射点子回波的复振幅; $\phi_{di}(m)$ 表示第 m 次回波时该距离单元内第 i 个散射点的子回波相位; $w_d(m)$ 为噪声和杂波.

若有 M 次回波参与检测处理, 目标占有 D 个

收稿日期: 2009-1-3.

基金项目: 国防预研基金资助课题(9140A07020508DZ01).

作者简介: 夏宇垠(1983—), 男, 博士研究生;

冯大政(1959—), 男, 教授, 博士生导师.

距离单元,记第 d 个距离单元的观测向量 $\mathbf{x}_d = [x_d(1), x_d(2), \dots, x_d(M)]^T$, 噪声和杂波向量 $\mathbf{w}_d = [w_d(1), w_d(2), \dots, w_d(M)]^T$. 式(1)可写成如下向量的形式:

$$\mathbf{x}_d = \mathbf{p} \odot \boldsymbol{\alpha}_d + \mathbf{w}_d = \mathbf{s}_d + \mathbf{w}_d, \quad d = 1, 2, \dots, D. \quad (2)$$

其中: $\mathbf{p} = [\exp[j\psi(1)], \exp[j\psi(2)], \dots, \exp[j\psi(M)]]^T / \sqrt{M}$ 为目标平动引起的多普勒变化,是参考的导向矢量; $\boldsymbol{\alpha}_d = \sqrt{M} [\sum_{i=1}^{L_d} \sigma_{di} \exp[j\phi_{di}(1)], \dots,$

$$\sum_{i=1}^{L_d} \sigma_{di} \exp[j\phi_{di}(M)]]^T; \odot$$
 表示两个向量的Hardamard积; \mathbf{s}_d 代表第 d 个距离单元的目标响应.

1.2 ISAR 回波模型的简化和基于 GLRT 的检测算子

式(2)中的模型未知参数较多,在检测中将每个参数都做估计是不现实的,有必要将模型做合理简化.在忽略目标转动的情况下作如下简化:

$$\mathbf{s}_d = \boldsymbol{\beta}_d \mathbf{p}.$$

其中: $\boldsymbol{\beta}_d$ 代表第 d 个距离单元除去多普勒变化的目标响应.

定义失配角^[8] $\psi \in [0, 90^\circ]$ 来度量目标回波样本与简化模型间的匹配程度, ψ 满足 $\cos^2 \psi =$

$$\sum_{d=1}^D |\mathbf{p}^H \mathbf{x}_d|^2 / \|\mathbf{x}_d\|^2,$$
 其中 $\|\cdot\|$ 为取范数运算.

取“雅克-42”,“奖状”和“安-26”飞机某角域的800个和1600个相邻HRRP样本, $M = 8, 16$ 时分别分成100组,图1为三类飞机回波的失配角,可见“雅克-42”和“奖状”能较好地匹配简化模型,而“安-26”匹配程度较差.

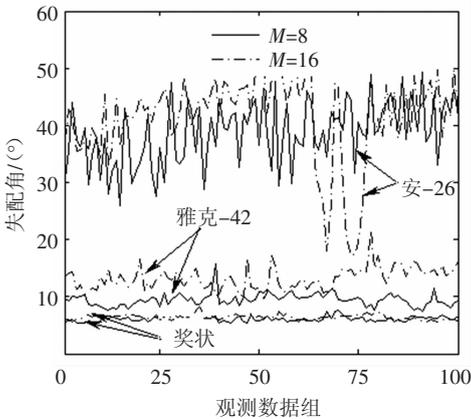


图1 三类飞机回波失配角度

根据简化模型, ISAR 目标检测的问题可以表示为下面的二元假设检验:

$$\begin{cases} H_1: \mathbf{x}_d = \boldsymbol{\beta}_d \mathbf{p} + \mathbf{w}_d, \\ H_0: \mathbf{x}_d = \mathbf{w}_d. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $d = 1, 2, \dots, D; H_0, H_1$ 分别代表目标不存在

和存在的两种假设, \mathbf{w}_d 为零均值复高斯随机矢量,他们之间相互独立,其协方差矩阵为 $E\{\mathbf{w}_d \mathbf{w}_d^H\} = \sigma^2 \mathbf{I}_M$, \mathbf{I}_M 为 $M \times M$ 维的单位矩阵,符号 $(\cdot)^H$ 表示共轭转置, σ^2 是噪声杂波的强度,可由辅助单元估计出^[2]. 假设各个距离单元的回波相互独立,根据 Neyman-Pearson 准则,式(3)所表示的假设检验问题的最优解是似然比检验. 因为 $\boldsymbol{\beta}_d$ 和 \mathbf{p} 未知,极大似然准则下的 GLRT 算子 λ 为

$$\lambda = \ln \frac{\max_{\beta_1, \dots, \beta_D, p} \prod_{d=1}^D b \cdot \exp[-\|\mathbf{x}_d - \boldsymbol{\beta}_d \mathbf{p}\|^2 / \sigma^2]}{\prod_{d=1}^D b \cdot \exp[-\|\mathbf{x}_d\|^2 / \sigma^2]} = \sum_{d=1}^D [\|\mathbf{x}_d\|^2 - \min_{\beta_d, p} \|\mathbf{x}_d - \boldsymbol{\beta}_d \mathbf{p}\|^2] / \sigma^2, \quad \text{s. t. } |p_m|^2 = M^{-1}. \quad (4)$$

其中: $d = 1, 2, \dots, D; m = 1, 2, \dots, M; b$ 为使概率密度函数(PDF)归一的常数; p_m 为导向矢量 \mathbf{p} 的第 m 个元素,考虑到导向矢量的形式,约束每个元素的模值平方为 $1/M$; $\ln(\cdot)$ 为取自然对数运算,是递增函数,不影响判决结果.

2 FTMD-GLRT 检测算法

2.1 检测前预处理

式(4)中提出的模型并不能直接应用到实际检测中,需要做一些预处理.图2是实测“雅克-42”飞机回波包络的灰度图,目标径向速率150 m/s.记该观测数据为 $\mathbf{Z} = [z_n(m)] \in C^{M \times N}$, $z_n(m)$ 表示第 m 次回波第 n 个距离单元内的回波信号.预处理分为目标位置和噪声强度估计,模糊门限映射后包络对齐,下面做详细说明.

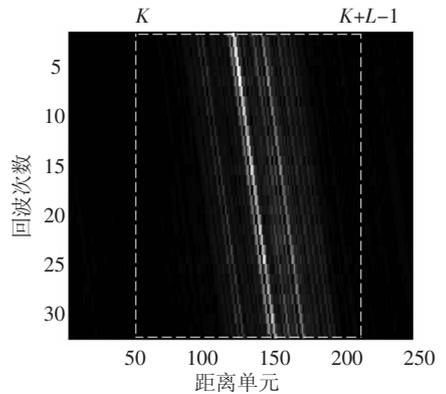


图2 不含噪声的32个HRRP包络样本

1) 估计目标的位置和噪声强度. 借鉴文献[6]中最大信噪比准则方法,采用一个矩形窗来划分目标区域和噪声区域.若信号的带宽为 B ,脉冲重复周期为 T_r ,光速为 c ,则雷达距离分辨率为 $\Delta R = c/(2B)$.假设目标所占的距离单元数 D ,目标最大的平移速率为 v_{\max} ,考虑到目标的 MTRC,

窗口长度 L 应大于 $D + v_{\max} T_r \cdot (M - 1) / \Delta R$, 以避免目标能量泄漏, 假设窗口在每次回波的起始位置为 K , 如图 2 所示, 定义如下的函数 f :

$$f(K) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=K}^{K+L-1} |z_n(m)|^2 / (ML)}{\left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{K-1} |z_n(m)|^2 + \sum_{m=1}^M \sum_{n=K+L}^N |z_n(m)|^2 \right] / [M(N-L)]},$$

s. t. $K \in [1, N + L - 1]$. (5)

最大化目标函数 f 可得窗口起始位置的估计 \hat{K} , 如(6)式所示.

$$\hat{K} = \arg \max_{K \in [1, N+L-1]} f(K). \quad (6)$$

窗口之外的数据为辅助数据, 用于估计噪声强度 $\hat{\sigma}^2$.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{K-1} |z_n(m)|^2 + \sum_{m=1}^M \sum_{n=K+L}^N |z_n(m)|^2 \right]}{[M(N-L)]}. \quad (7)$$

2) 包络对齐. 在宽带雷达中, 相邻回波间非常容易发生 MTRC, 要将各次回波信号作积累必须将各个距离单元对齐. 在 ISAR 成像中有多种方法对 HRRP 作对齐, 如互相关法, 模 - 2 和模 - 1 距离法, 最小熵法等^[9], 在信噪比 R_{SN} 较低的情况下, 这些方法效果并不佳, 本文采用一种新方法对目标回波作包络对齐.

首先采用模糊门限映射^[10] (FTM) μ 来对 1) 中的目标数据加权, 设处理后的目标数据为 $\mathbf{Y} = [y_l(m)] \in \mathbb{C}^{M \times L}$, 映射后的数据为

$$\bar{y}_l(m) = \mu(|y_l(m)|^2 / \hat{\sigma}^2) y_l(m), \quad l = 1, 2, \dots, L; m = 1, 2, \dots, M. \quad (8)$$

其中: $\mu(\eta) = 1 - \exp(-\eta/2)$ 是自由度为 2 的 χ^2 分布的一维分布函数 (CDF), $\mu(\eta)$ 函数值在 0 到 1 之间, 单调递增. 图 3 给出几种信噪比下 μ 的 PDF 情况, 从图中可知观测数据 R_{SN} 越大, 得到大权值的概率也越大, 该步骤可抑制低 R_{SN} 单元, 保留高 R_{SN} 单元, 相当于提高了整体数据的 R_{SN} .

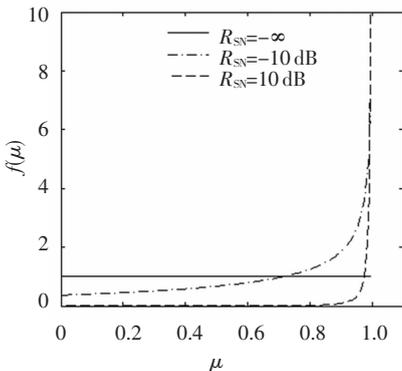


图 3 几种信噪比下 FTM 函数的 PDF

然后对映射后的目标数据作约束平移量的包络对齐. 假设目标作最大平移速率为 v_{\max} 的匀速运动. 将 2) 中所得数据记作 $\bar{\mathbf{Y}} \in [\bar{y}(1), \dots, \bar{y}(m), \dots, \bar{y}(M)] \in \mathbb{C}^{M \times L}$, $\bar{y}(m)$ 代表第 m 次回波. 采用相邻回波相关平移匹配法估计 $\bar{\mathbf{Y}}$ 的包络平移量, 如(9)式所示, 并用 $\hat{\tau}$ 对 $\bar{\mathbf{Y}}$ 作包络平移.

$$\hat{\tau} = \arg \max_{\tau \in [-v_{\max} T_r / \Delta R, v_{\max} T_r / \Delta R]} \left(\sum_{m=2}^M |\bar{y}^{(m-2) \cdot \tau}(m-1)|^T |\bar{y}^{(m-1) \cdot \tau}(m)| \right). \quad (9)$$

其中: $|\bar{y}(m)|$ 为 $\bar{y}(m)$ 的包络, $|\bar{y}^{\tau}(m)|$ 表示将 $|\bar{y}(m)|$ 循环位移 τ 个距离单元. 在实际处理中, 为了降低运算量, 一般用快速傅里叶变换直接计算相关函数.

2.2 估计导向矢量 \mathbf{p}

在相参 ISAR 雷达中, 包络对齐处理后, 可估计出平动多普勒值, 从而获得导向矢量 \mathbf{p} , 但这只是理想化的情况. 首先, 根据式(1), 初相的变化是相对波长而言的, 复数 HRRP 样本对距离变化非常敏感, 不能简单地用线性相位代替; 其次是系统工作以及电波传播等因素也有可能出现不平稳, 从而使初相出现起伏^[9], 所以实测运动目标复数 HRRP 样本的导向矢量 \mathbf{p} 是无法精确可知的. 因此本文用经预处理的数据来估计 \mathbf{p} .

考虑式(4)中的未知参数 β_l 和 \mathbf{p} 的估计问题, 根据最小二乘法, 先求得 $\beta_l = \mathbf{x}_l^H \mathbf{p}$, 再将 β_l 代入, 经整理可将(4)的参数估计问题转化为

$$\max_{\theta_1, \dots, \theta_m, \dots, \theta_M} \frac{1}{M} \sum_{l=1}^L |\exp(-j\theta_1), \dots, \exp(-j\theta_m), \dots, \exp(-j\theta_M)] x_l|^2,$$

s. t. $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M \in (0, 2\pi]$. (10)

式(10)代价函数实质上是求一约束的导向矢量 \mathbf{p} (\mathbf{p} 的第 m 个元素 $p_m = \exp(j\theta_m) / \sqrt{M}$), 使得 \mathbf{x}_l 在 \mathbf{p} 上的投影总值最大. 该优化问题可由 Lagrange 法求解. 将导向矢量估计值 $\hat{\mathbf{p}}$ 及式(7)中噪声强度的估计 $\hat{\sigma}^2$ 代入式(4), 化简后得最终的检测算子为

$$\lambda = \sum_{l=1}^L |\hat{\mathbf{p}}^H \mathbf{x}_l|^2 / \hat{\sigma}^2. \quad (11)$$

从(11)式可知 FTMD-GLRT 检测算子 λ 用噪声强度 σ^2 作归一, 易知在 H_0 假设下, λ 与 σ^2 无关, 而且检测前的预处理过程也和噪声强度无关. 因此, 本文方法具有 CFAR 性, 有实用价值.

3 仿真实验

采用 ISAR 实测数据, 该数据取自国内某研究所逆合成孔径 C 波段雷达, 雷达采用线性调频发射

信号,用解线性调频相参检波.为使数据符合实际检测情况,先将数据做包络对齐,这相当于目标的实际径向速率为 0 m/s.实测数据中有 26 000 个 HRRP 样本,每个样本包含 256 个距离单元.

实验 1 FTM 的作用.用(9)式估计包络平移量 $\hat{\tau}$,假设目标最大径向速率为 750 m/s,则相应搜索范围为 $-5 \sim 5$,将搜索间隔定为 $1/4$.因为目标的实际径向速度为 0 m/s,所以 τ 真实值为 0,定义均方误差函数 $E\{\hat{\tau}^2\}$ 衡量包络对齐的效果,从图 5 可看出 FTM 可有效提高包络对齐的准确度.

实验 2 NFTMD-GLRT(未采用 FTM),FTMD-GLRT 和 SDD-GLRT 检测性能比较.窗长 L 为 180, τ 估值方法与实验 1 相同,积累回波次数 $M = 8, 16$,虚警概率 P_{fa} 为 10^{-3} ,估计检测概率的 Monte Carlo 次数为 2 万次.在实验中考察 SDD-

GLRT 最佳性能,即假设目标所占的距离单元数已知,“雅克-42”,“奖状”和“安-26”飞机的密度参数 β 分别为 2, 0.389 和 0.876^[4].图 5 可以看出三类飞机的 FTMD-GLRT 检测性能与最优的 SDD-GLRT 相比有较大提高.

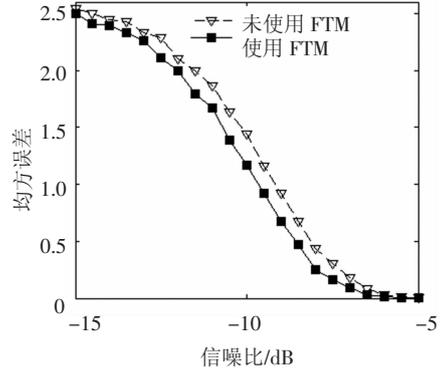


图 4 使用 FTM 前后包络对齐的均方误差比较

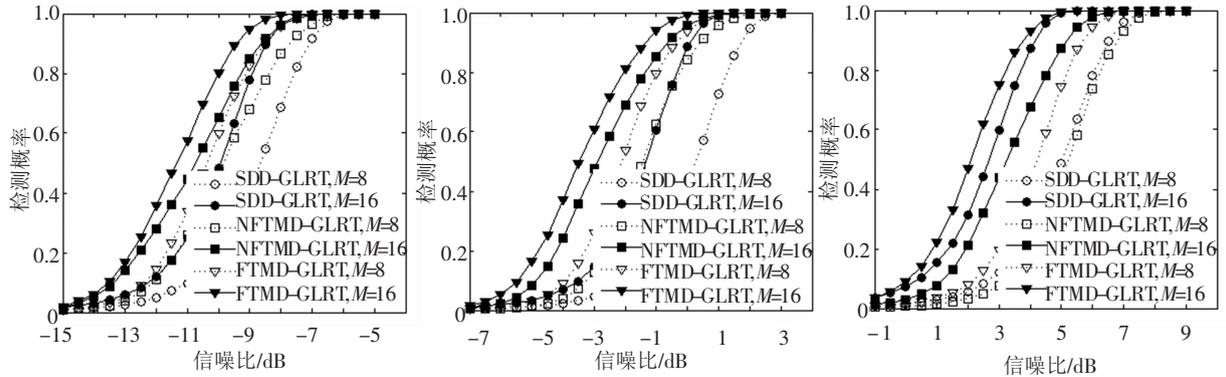


图 5 三类飞机检测概率-信噪比曲线

4 总结

1) 实验表明 FTMD-GLRT 与最优的 SDD-GLRT 相比,检测性能有较大提高,能较好地解决宽带雷达目标的检测问题.

2) 飞机回波与检测模型的匹配程度对 FTMD-GLRT 检测性能有一定影响.当匹配度较好(“奖状”飞机,积累回波 8 次),检测概率为 80% 时,FTMD-GLRT 有 2.3 dB 的改善;而当匹配度较差时(“安-26”飞机,积累回波 16 次)也有 0.5 dB 的提高,说明了 FTMD-GLRT 算法的稳健性.

3) FTMD-GLRT 比 NFTMD-GLRT 至少有 0.7 dB 的改善,可见采用 FTM 可以有效地提高包络对齐精度,从而提高检测性能.

参考文献:

[1] CONTE E, FARINA A, GERLACH K. Adaptive detection algorithm of range spread targets with orthogonal rejection [J]. IEEE Trans on AES, 2007, 43(2):738-752.
 [2] BANDIERA F, MAIO A D. Adaptive radar detection of distributed targets in homogeneous and partially homogeneous noise plus subspace interference [J]. IEEE Trans

on Signal Processing, 2007, 55(4):1223-1237.
 [3] GERLACH K. Spatially distributed target detection in non-Gaussian clutter [J]. IEEE Trans on AES, 1999, 35(3):926-934.
 [4] GERLACH K, STEINER M. Detection of a spatially distributed target in white noise [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1997, 4(7):198-200.
 [5] 胡文明,关键,何友.基于二维积累的雷达分布式目标检测新方法[J].系统工程与电子技术,2006,28(9):1335-1337.
 [6] 侯庆禹,刘宏伟,保铮.一种新的宽带目标识别雷达杂波抑制方法[J].西安电子科技大学学报,2008,35(5):769-773.
 [7] 杜兰.雷达高分辨距离像目标识别方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2007.
 [8] MAIO A D. Robust adaptive radar detection in the presence of steering vector mismatches [J]. IEEE Trans on AES, 2005, 41(4):1322-1337.
 [9] 保铮,邢孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005.
 [10] LEUNG S W, MINETT J W, SIU Y M, et al. A fuzzy approach to signal integration [J]. IEEE Trans on AES, 2002, 38(1):346-350.

(编辑 张宏)