

基于 PWF 融合的高分辨极化雷达目标检测算法

徐振海,王雪松,周 颖,汪连栋,肖顺平,庄钊文

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘 要: 本文研究了高分辨全极化体制下目标的检测问题.提出了串联检测的思想:首先利用极化信息进行融合增强,改善一维成像质量,然后利用高分辨特性,将目标的检测转化为目标强散射中心的检测.仿真实验验证了 PWF 改善了成像质量,检测性能也有明显的提高.

关键词: 高分辨;极化;一维距离像;极化白化滤波;目标检测

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1620-03

Study on High-Resolution Polarization Radar Target Detection Algorithm Based on PWF

XU Zhen-hai, WANG Xue-song, ZHOU Ying, WANG Lian-dong, XIAO Shun-ping, ZHUANG Zhao-wen

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

Abstract: Target detection of high-resolution polarization radar has been discussed in this paper. Signal to Clutter Ratio (SCR) is a determinate factor in radar detection. A cascaded detection scheme is presented. The enhancement of SCR at each stage results in the ultimate improvement of detection performance. At first, by exploiting the polarization information, the fused and enhanced one-dimension range profile is obtained. Then the problem of target detection is converted to that of scattering points detection. Finally, simulation results show that the ultimate performance of target detection is improved significantly.

Key words: high resolution; polarization; one-dimension range profile; polarization whitening filter; target detection

1 引言

在高分辨雷达体制下,由于发射信号带宽的增加,距离分辨单元减小,复杂目标的回波连续占据多个分辨单元,目标的强散射中心可以离析出来.所谓散射中心,即目标回波中散射强点,它们分别对应目标的强散射结构,诸如尖劈、平板、角反射器等,它反映了目标一定的几何结构信息.由于目标的强散射中心集中了目标回波的大量能量,因此复杂目标的高分辨回波可等效为雷达视线上一系列散射中心之和^[3].因此高分辨目标的检测可等效为散射中心的检测.进一步,对于全极化雷达,可以获得四个极化通道的回波,它包含了目标完整的极化信息,对于单静态雷达,满足互易性条件(即 $HV = VH$),因此极化数据可减少为三个通道,高分辨全极化雷达回波可表示为三通道时间序列,有关目标的信息蕴含在其中.

本文提出了串联检测的思想,首先利用不同极化通道的相关性信息,经极化白化滤波(PWF),抑制相关杂波,提高信杂比,融合得到一幅改善了的距离像,然后进一步检测目标的散射中心,得到最后统计检验量.下面给出了高分辨全极化目标检测算法的原理框图.

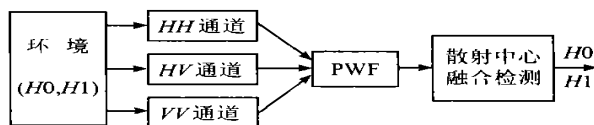


图 1 目标检测原理框图

2 检测算法

2.1 观测数据模型及目标检测模型

在高分辨全极化体制下,雷达接收回波可以用多通道复时间序列表示^[4],即:

$$X(n) = \begin{bmatrix} HH(n) \\ HV(n) \\ VV(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: n 表示高分辨波形的时间采样点,采样间隔为 T . 目标检测可表示为以下二元假设检验:

$$\begin{cases} H0: X(n) = C(n) \\ H1: X(n) = S(n) + C(n) \end{cases}, n=0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

其中:假设复杂目标的波形宽度为 T ,则 $T = N \cdot T$. 波形宽度 T 与目标径向长度 L 有关,即: $T = \frac{2L}{c}$.

在光学区,目标可看成由子散射体在空间分布的集合.根据雷达分辨率和目标尺寸,可分别对它们成像,因此高分辨目标回波可看作为确定性信号.

假设杂波为平稳、零均值随机矢量过程.仅考虑不同极化通道的相关性,用极化协方差矩阵来作为极化特征信号来表征极化散射特性.进一步假设^[5]:

$$E\{X(n)X^H(m)\} = \begin{matrix} & & \sqrt{} \\ \begin{matrix} HH \\ HV \\ VV \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & \\ 0 & 0 & \\ \sqrt{} & 0 & \end{bmatrix} & (n, m) \end{matrix} \quad (3)$$

其中: $\begin{matrix} HH \\ HV \\ VV \end{matrix} = \frac{E\{|HH|^2\}}{E\{|HH|^2\}}, = \frac{E\{|HV|^2\}}{E\{|HH|^2\}}, = \frac{E\{|VV|^2\}}{E\{|HH|^2\}},$

$$= \frac{E\{HH \cdot VV^*\}}{E\{|HH|^2\} E\{|VV|^2\}}, \quad (n, m) = \begin{cases} 1, & n = m \\ 0, & n \neq m \end{cases}$$

即假设已知杂波的二阶矩信息.对于每通道之间的时间相关,可以通过去相关处理,这里不再考虑.

2.2 PWF 融合增强算法

极化白化滤波(PWF)的物理意义是:首先对 HH、HV、VV 通道数据进行滤波,产生一组具有等功率且互不相关的一维像,然后将它们非相参地相加,抑制了杂波功率;同时对目标也带来了非相参积累损失.现在考虑将三个极化通道的一维距离像经 PWF 融合增强,抑制杂波干扰,得到“最佳”的距离像 Y(n).令:

$$Y(n) = X^H = X^H(n)AX(n), \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

其中: A 为 3×3 且 A 非负定 Hermite 矩阵.其实 A 并不是任意的,选择“最佳”的 A 使得融合后的距离像信杂比达到最大,即 A 可以看作以下最优问题的解:

$$\begin{matrix} \min_A & \frac{\text{Var}\{Y\}}{E\{Y\}} \\ \text{s. t.} & \begin{cases} A = A^H \\ \text{eign}(A) \geq 0 \end{cases} \end{matrix} \quad (5)$$

为了简便起见,这里不再推导,直接给出结论:

$$A = \begin{matrix} & & -1 \\ & & \\ & & \end{matrix} \quad (6)$$

这里: 表示杂波的极化协方差矩阵.

所以融合增强后的距离像为:

$$Y(n) = X^H(n) \begin{matrix} & & -1 \\ & & \\ & & \end{matrix} X(n), \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

虽然极化白化滤波对目标也带来了非相参积累损失,但是总的来讲,经滤波后的一维距离像的信杂比提高了,成像质量得以改善,有利于下一步的目标检测.

2.3 散射中心检测算法

由于复杂目标的高分辨特性,目标散射回波在径向距离上呈现尖峰特性,即表面散回波能量仅集中在一小段时间间隔内,也就是说,散射中心沿目标径向稀疏地分布在目标所占的距离单元内.而杂波能量则均匀分布在目标所占径向距离单元内.复杂目标的散射中心是高强度的,通常要大于自然杂波,因此散射中心是复杂目标区别于杂波的一重要特征.提取目标与杂波强度上的差异使得目标检测成为可能,所以复杂目标的检测即可转化为目标散射中心的检测^[1,2].如果对整个一维距离像进行处理,则平均了目标的强散射特性,将会带来一定的性能损失.目标的检测转化为强散射中心的检测相

当于对目标进行了“加权”处理,即散射中心的位置“权”为“1”,其它位置“权”为“0”,这样就进一步提高了信杂比,有利于目标的检测.

2.3.1 单个散射中心的检测 对于单个散射中心的检测采用双参恒虚警 CFAR 算法,它能控制背景杂波变化情况下的虚警率,即:

$$Z = \frac{Y - E\{Y\}}{\text{Var}\{Y\}} \stackrel{H_0}{\geq} K_{CFAR} \quad (8)$$

这里直接给出以下结论:

$$E\{Y\} = 3 \quad (9)$$

$$\text{Var}\{Y\} = 3^2 \quad (10)$$

在工程应用中,杂波的一、二阶统计特性可以通过估计获得. K_{CFAR} 由虚警概率唯一确定,实际中也可以通过估计得到.

对于融合增强后的距离像 Y(n), n=0, 1, ..., N-1. 若连续几个采样值超过门限,则可以推断检测到一个散射中心.

2.3.2 散射中心融合检测 假设复杂目标具有 M 个强散射中心.由于杂波的影响,设从增强的距离像 Y(n) 中检测到的散射中心数目为 L, L 未必等于 M. 因此须要一个融合检测规则.这里采用经典的“K 秩”判决方法 (1 ≤ K ≤ M), 即:

$$L \stackrel{H_0}{\geq} K \quad (11)$$

设各个散射中心的检测概率和虚警概率分别为 P_{di}, P_{fi} , i=1, ..., M. 则目标的检测概率和虚警概率分别为:

$$P_D = \prod_{i=1}^M (1 - P_{di})^{n-i} P_{di}^i \quad (12)$$

$$P_F = \prod_{i=1}^M (1 - P_{fi})^{n-i} P_{fi}^i \quad (13)$$

由上式可以看出,目标的检测性能取决于各个散射中心的检测性能,经过融合处理后,检测性能将得到进一步改善.假设各个散射中心的能量近似相等,这意味各个散射中心检测性能相同,即: $P_{di} = P_d, P_{fi} = P_f, i=1, \dots, M$, 则由目标的虚警概率由上式可以确定散射中心的虚警概率,进一步确定恒虚警门限值.

3 仿真实验及检测性能

3.1 PWF 融合增强

本文复杂目标全极化高分辨数据在微波暗室中测得,目标长度大约为 3m,其距离分辨率大约为 15cm. 杂波由计算机模拟产生,实验中选择典型的丛林杂波,其特征参数为: $(\begin{matrix} HH \\ HV \\ VV \end{matrix})^T = (0.086, 0.16, 1.03, 0.53)^H$. 图 2 和图 3 分别为目标在无杂波和有杂波情况下 HH、HV 和 VV 通道的一维距离像.(注:仅指高分辨波形的幅度信息).图 4 为经 PWF 融合后得到增强的目标一维距离像,明显可以看出,经 PWF 处理后,抑制了杂波干扰,改善了成像的质量.其中:图中横坐标为采样点数.

3.2 散射中心检测及检测性能

在该仿真实验中,比较了用 HH 通道、VV 通道及融合增强后 Y(n), n=0, 1, ..., N-1, 一维距离像的检测性能.得到目标检测虚警概率为 $P = 10^{-3}$ 、 $P = 10^{-4}$ 时的检测概率曲

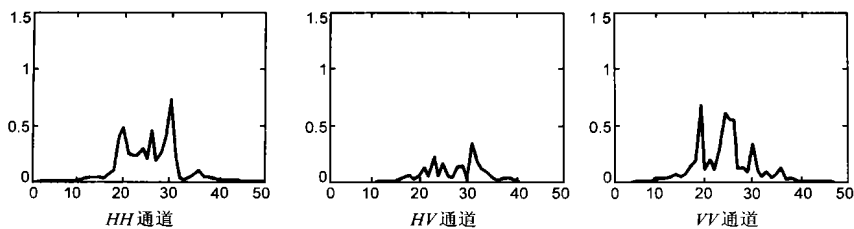


图2 目标 HH, HV 和 VV 通道的一维距离像

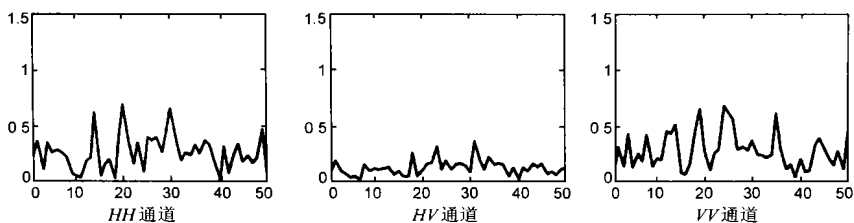


图3 目标在杂波环境下 HH, HV 和 VV 通道的一维距离像

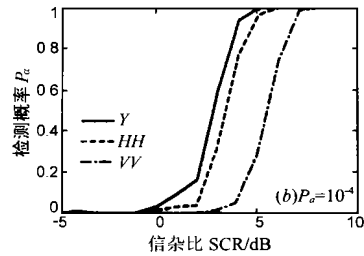
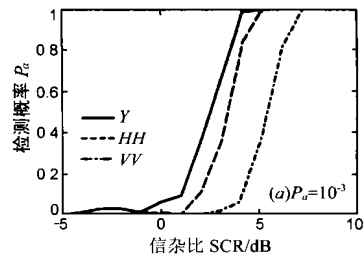


图5 不同虚警概率时的检测性能曲线

线. 为了表示方便, 定义信杂比 SCR 为:

$$SCR = \frac{S_{HH}}{HH} \quad (14)$$

该信杂比的定义只具有相对意义.

由图 5 可以看出, $Y(n)$ 的检测性能明显优于单极化通道 HH、VV 的检测性能. 在相同的检测概率下 $Y(n)$ 所需的信杂比 SCR 比 HH 通道大约少 1.5 dB, 比 VV 通道少 3.5 dB, 这也同时验证了经极化白化滤波融合后信杂比 SCR 提高了.

4 结束语

在全极化高分辨雷达体制下, 可分别获得目标不同极化通道下目标的一维距离像, 可以利用不同极化通道的相关性信息, 对雷达的高分辨成像进行极化优化处理, 抑制杂波干扰, 进一步提高成像质量, 这里体现了复杂目标检测与成像一体化的思想. 利用目标的高分辨特性, 将目标的检测转化为散射中心的检测, 进一步提高了信杂比, 进而改善目标的检测性能. 另外该检测方法原理简单, 易于工程实现.

参考文献:

- [1] Karl Gerlach. Spatially distributed target detection in non-Gaussian clutter [J]. IEEE Trans. on AES, 1999, 35(3): 926 - 934.

- [2] Ronald L D. Fully-polarization GLRLs for detecting scattering centers with unknown amplitude, phase, and tilt angle in terrain clutter [A]. SPIE [C]. 2234, 14 - 25.
- [3] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999, 1.
- [4] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究 [D]. 博士学位论文. 长沙: 国防科技大学研究生院, 1999, 6.
- [5] 王被德. 近三年来雷达极化研究的进展 [J]. 现代雷达, 1996, 18(1): 1 - 11.

作者简介:



徐振海 男, 博士生, 1977 年 9 月生于河南卫辉. 1998 年毕业于国防科学技术大学电子工程学院, 同年保送攻读博士学位, 已发表学术论文 8 篇, 主要研究方向为: 雷达极化信息处理, 目标检测与识别.



王雪松 男, 副教授, 1972 年 10 月出生于内蒙包头. 1994 年毕业于国防科学技术大学电子技术系, 1999 年于国防科学技术大学获博士学位, 已发表学术论文 50 余篇, 获部级科技进步二等奖 2 项, 主要研究方向为: 雷达极化信息处理, 战场感知与综合电子战.