

一种改进的高分辨极化目标检测算法¹

曹学军 李永祯* 姜文利* 庄钊文*

(张家口通信学院 宣化 075100)

*(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要 针对宽带高分辨雷达体制,研究了杂波环境中的目标检测问题。引用了极化域线性积累滤波的思路以提高雷达接收信号的信杂比,在此基础上利用波形固有的径向高分辨力对目标进行一维距离成像,结合目标所占据的分辨单元区间内的幅值及其极化状态相对于杂波所对应的分辨单元内的幅值及其极化状态有着较大的差异这一客观事实,提出了基于 Stokes 矢量 Frobenius 范数非参数检测方法,实验仿真结果表明该方法能够有效改善雷达的检测性能。

关键词 高分辨,极化,目标检测

中图分类号 TN97, TN951

1 引言

无论是在现代电子战还是在未来的信息战中,雷达都占有极其重要的地位。自 80 年代以来,为了适应当今复杂、多变的战场电磁环境的要求,宽带全极化已成为新一代雷达扩大信息来源、提高探测性能的主要发展趋势。雷达对目标信号的检测,通常只利用了它的幅度信息,只要目标回波幅度在起伏的过程中能超过由背景噪声或杂波所决定的门限,目标就有可能被检测到;雷达目标的极化检测,主要是利用目标与其周围环境的极化散射特性之间的差异来达到改善检测性能的目的。极化信息的充分利用,可以有效地改善雷达的探测性能,而且极化检测技术特别有助于雷达对微弱目标(如隐身飞行器等)的探测。在 80 年代末至 90 年代初,极化检测技术受到了广泛的关注和研究^[1]。但是,这些研究成果基本上都是在窄带雷达体制下基于平稳高斯模型得到的,因而无法充分利用目标和杂波的宽带极化散射特性之间的差异性信息^[1,2]。

在毫米波高分辨目标检测领域,如何将高分辨信息与极化信息有机结合是亟待解决的一个重要问题,针对这一问题,本文提出了一种新的检测思路。根据目标和杂波散射回波特点,杂波的一维距离像是随机起伏的,其分布具有“拖尾”特性,在时域波形上表现为尖峰脉冲数目较多,从统计的角度讲很难保持一个相对稳定的较大的空间尺度;而目标的一维距离像中那些强散射点的分布态势是相对固定的,在固定姿态下它可以稳定地保持在一个相对较大的空间尺度上。同时,杂波和目标的极化状态也有着较大的差别。也就是讲,在目标所占据的分辨单元区间内的 Stokes 矢量相对于杂波所对应的分辨单元内的 Stokes 矢量有着较大的差异,基于上述客观事实,本文提出了基于 Stokes 矢量 Frobenius 范数的非参数检测方法。

2 极化域线性积累滤波^[3]

这里借鉴文献^[3]所给出的线性积累滤波的思想,提出了一种改进的线性积累滤波算法。众所周知,一个电磁波可以由幅度、频率、相位以及极化等参量完整描述,这些参量分别描述了电磁波的能量特性、振荡特性、相位特性及矢量特性。要完整刻画目标的电磁散射行为,极化是不可缺少的参量^[2]。考虑到杂波和目标散射回波实际上是部分极化波,即其极化状态在同一单元内的采样时间序列是慢起伏的,以 Stokes 矢量表征是非常适合的,它可以完整地表征波的能量信息和极化信息。

考虑单站的情形,设发射和接收的极化基是相同的,记为 \hat{x} 和 \hat{y} ,即表示水平和垂直极化

¹ 2000-10-30 收到, 2001-07-11 定稿
国家部级预研基金资助项目

基, 在这个坐标系和极化基下, 雷达入射波 $e_i(t)$ 和目标的散射波 $e_0(t)$ 可以记为^[2]

$$\begin{aligned} e_i(t) &= e_{ix}(t)\hat{x} + e_{iy}(t)\hat{y} = \begin{bmatrix} e_{ix}(t) \\ e_{iy}(t) \end{bmatrix}, \quad t \in T \\ e_0(t) &= e_{0x}(t)\hat{x} + e_{0y}(t)\hat{y} = \begin{bmatrix} e_{0x}(t) \\ e_{0y}(t) \end{bmatrix}, \quad t \in T \end{aligned}$$

其中 T 为雷达回波的观察时间. 则目标散射波 $e_0(t)$ 与入射电磁波 $e_i(t)$ 具有如下的关系:

$$e_0(t) = s(t) * e_i(t) \quad (1)$$

式中 “*” 表示卷积, $s(t)$ 为毫米波全极化雷达的实测雷达目标散射矩阵, 即

$$s(t) = \begin{bmatrix} s_{xx}(t) & s_{xy}(t) \\ s_{yx}(t) & s_{yy}(t) \end{bmatrix}$$

对于宽带高分辨雷达来说, 入射波 $e_i(t)$ 可表示为^[2] $e_i(t) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha)e^{j\varphi} \end{bmatrix} f(t)$. 其中 $f(t)$ 为宽带信号, $(\alpha, \varphi) \in [0, \pi] \times [0, 2\pi]$ 为极化相位描述子^[1], 表征入射波的极化方式. 可得

$$e_{0x}(\alpha, \varphi) = \cos(\alpha)\tilde{s}_{xx} + \sin(\alpha)\exp(j\varphi)\tilde{s}_{xy} \quad (2)$$

$$e_{0y}(\alpha, \varphi) = \cos(\alpha)\tilde{s}_{yx} + \sin(\alpha)\exp(j\varphi)\tilde{s}_{yy} \quad (3)$$

(2) 和 (3) 式中 $\tilde{s}_{kl} \equiv s_{kl}(t) * f(t)$, $k, l = x, y$.

根据瞬态极化理论^[2], 其时域瞬态 Stokes 矢量定义为

$$\mathbf{J}(t) = \mathbf{R}[e_0(t) \otimes e_0^*(t)] \quad (4)$$

式中 “ \otimes ” 表示 Kronecher 积, $\mathbf{J}(t) = [g_0(t), g_1(t), g_2(t), g_3(t)]^T$, \mathbf{R} 为准酉矩阵, 即

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & j & -j & 0 \end{bmatrix}$$

将时域瞬态 Stokes 矢量离散化后可表示为

$$\left. \begin{aligned} g_0(n) &= |e_{0x}(n)|^2 + |e_{0y}(n)|^2 \\ g_1(n) &= |e_{0x}(n)|^2 - |e_{0y}(n)|^2 \\ g_2(n) &= 2\text{Re}[e_{0x}(n)e_{0y}^*(n)] \\ g_3(n) &= -2\text{Im}[e_{0x}(n)e_{0y}^*(n)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $n = 1, 2, \dots, N-1$.

由 (2), (3) 和 (4) 式可见, 雷达特定目标回波 Stokes 矢量与雷达入射波选用何种极化方式有着直接的关系, 进而在存在噪声、杂波和干扰的情况下, 雷达入射波的极化方式对特定目标测量得到的雷达接收功率、信杂比、信号干噪比等特征指标有很大影响^[1,2], 对于任意一个有确定极化散射矩阵的目标, 都存在着一个特定的最优入射电磁波极化状态^[1,2], 使得目标散射能量达到最大; 给定入射极化以后, 还存在着一个最优接收极化, 使得雷达对目标散射信号的接收功率达到最大^[2]. 在存在噪声、杂波和干扰背景的情况下, 雷达选用何种极化的发射天线与接收天线使对特定目标测量得到的雷达接收功率最大, 从而利于目标的探测, 这就是雷达探

测目标的最佳极化问题。通常情况下, 目标和杂波环境的极化散射特性是不可能事先充分预知的, 因而无法直接确定雷达系统的最佳极化配置。这里引用文献 [4] 提出的目标的极化域线性加权积累以达到准最佳极化, 即让雷达入射信号遍历所有可能的极化方式去激励目标, 对每一散射回波赋一权值, 而后进行积累, 从而逼近于以最佳极化的电磁波激励目标时产生的效果, 提高最终观测的信杂比。

定义权系数

$$w_k = (P_{kt} - P_{kc})/P_{kt}, \quad k = x, y \quad (6)$$

式中 P_{xt}, P_{xc} 分别称为雷达散射回波 x 极化分量的目标平均功率和杂波平均功率; P_{yt}, P_{yc} 分别称为雷达散射 y 极化分量的目标平均功率和杂波平均功率, 定义为

$$P_{kt} = \frac{1}{M} \sum_{n \in \vartheta} |e_{0k}(n)|^2, \quad P_{kc} = \frac{1}{N - M} \sum_{n \notin \vartheta} |e_{0k}(n)|^2, \quad k = x, y \quad (7)$$

式中 M 为目标所占据的径向距离单元的长度, N 为散射回波的总采样点数, ϑ 为在雷达观测区间上的滑动观察窗口。这里选用平均功率而不采用文献 [3] 中所采用的电平来定义权系数是为了进一步突出目标分量、抑制杂波的目的, 事实上通过仿真也验证了这一点。

对散射回波进行极化域线性积累滤波就是根据权系数 w_k 的大小来选择那些最有可能是最佳极化的散射回波进行积累, 具体公式为 [3]

$$e_x = \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{m=1}^{M_2} u_x(\alpha_i, \varphi_m) e_{0x}(\alpha_i, \varphi_m), \quad e_y = \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{m=1}^{M_2} u_y(\alpha_i, \varphi_m) e_{0y}(\alpha_i, \varphi_m), \quad (8)$$

其中 (α_i, φ_m) 为极化相位描述子 (α, φ) 的离散网格, $i = 1, 2, \dots, M_1; m = 1, 2, \dots, M_2; M_1, M_2$ 为离散网格的总格数; $u_k(\alpha_i, \varphi_m)$ 为权系数, 且

$$u_k(\alpha_i, \varphi_m) = \begin{cases} 1, & w_k(\alpha_i, \varphi_m) \geq \eta \max_{i,m} [w_k(\alpha_i, \varphi_m)], \\ 0, & w_k(\alpha_i, \varphi_m) < \eta \max_{i,m} [w_k(\alpha_i, \varphi_m)], \end{cases} \quad k = x, y \quad (9)$$

式中 η 为置信水平, 一般在 0.7~1.0 之间取值。

由 (1), (4) 和 (9) 式可得经积累滤波后的输出信号为

$$c_x = \tilde{s}_{hh} \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{m=1}^{M_2} [u_x(\alpha_i, \varphi_m) \cos(\alpha_i)] + \tilde{s}_{hv} \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{m=1}^{M_2} [u_x(\alpha_i, \varphi_m) \sin(\alpha_i) \exp(j\varphi_m)] \quad (10)$$

$$c_y = \tilde{s}_{vh} \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{m=1}^{M_2} [u_y(\alpha_i, \varphi_m) \cos(\alpha_i)] + \tilde{s}_{vv} \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{m=1}^{M_2} [u_y(\alpha_i, \varphi_m) \sin(\alpha_i) \exp(j\varphi_m)] \quad (11)$$

(10) 和 (11) 式中 $\tilde{s}_{kl} \equiv s_{kl}(t) * f(t)$, $k, l = h, v$ 。

3 基于 Stokes 矢量的高分辨极化目标检测

在高分辨的雷达体制下, 杂波的一维距离像是随机起伏的, 其分布具有“拖尾”特性, 在时域波形上表现为尖峰脉冲数目较多, 从统计的角度讲这些尖峰脉冲的分布态势和空间尺度 (即由其“一维距离像”所对应的径向长度) 是起伏的, 很难保持一个相对稳定的较大的空间尺度; 而目标的一维距离像中那些强散射点的分布态势是相对固定的, 在固定姿态下它可以稳定地保持在一个相对较大的空间尺度上。即由杂波产生的那些“虚假的”强散射点所张成的径向尺度在统计上通常小于真实目标的径向长度 [4]。同时, 杂波和目标的极化状态也有着较大的差别。

亦即, 在目标所占据的分辨单元区间内其在极化 Poincaré 球上的分布相对于杂波的所对应的分辨单元内的极化分布有着较大的差异。

基于上述客观事实, 下面给出了基于 Stokes 矢量 Frobenius 范数的非参数检测方法。

为了达到抑制杂波对检测性能的影响, 利用目标所在的分辨单元区间内的极化状态相对于杂波所对应的分辨单元内的极化状态整体上有较大的差异这一特性, 定义变量:

$$G(k) = \sum_{n \in \theta} \|J(n+k) - J(k)\|_F, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (12)$$

式中 θ 为在雷达观测区间上的观察窗口, 记为 $\theta = [-\frac{M}{2}, \frac{M}{2} - 1]$ 。其中, M 为目标所占据的最大径向距离单元区间的长度, F 指 Frobenius 范数。经过上式处理以后, 极大地抑制了杂波对判决的影响, 进一步降低了虚警率。

为了便于处理, 对由 (12) 式所得数据进行数字化处理, 即有强散射点的位置记为 “1”, 其它位置记为 “0”, 具体判决准则为:

$$P(n) = \begin{cases} 1, & G(n) \geq T_h \\ 0, & G(n) < T_h \end{cases} \quad (13)$$

这里, T_h 为第一判决门限, 由 (14) 式确定:

$$T_h = \frac{\xi M}{N} \sum_{n=0, 1, \dots, N-1} \|J(n)\|_F \quad (14)$$

其中 ξ 为置信系数, 可以根据信杂比的大小或虚警概率的大小来确定, 一般可选在 3~7 之间。 ξ 若偏小, 则虚警概率会增加, ξ 若偏大, 则漏警概率会增加。由于置信系数主要影响检测算法的第一门限, 进而影响强散射点分布的确定, 故是可以适当选取得低一些。

这样得到一连串 “0”、“1” 离散数字序列, 如图 1(f) 所示。

由上述方法得到的强散射点中既有目标产生的也有杂波产生的, 对于纯杂波的情况, 也会得到一个强散射点序列, 这样就易造成虚警。为此, 根据目标所占据的最大径向距离单元的长度, 设计一个参考滑动窗, 长度为 M , 让参考滑动窗在数字化后的雷达回波序列滑动, 观测滑动窗内的强散射点的数目变化, 只要滑动窗内强散射点的数目大于某一门限就判为有目标。考虑到强散射点之间的相关信息时, 在这里主要考虑强散射点之间位置的相关性, 两个强散射点之间的位置相距越近, 则它们的可信度就越高, 故这里采用位置相关系数^[4]来表征, 即

$$r(i, j) = \begin{cases} \frac{P(i)P(j)}{|i-j|^2}, & i \neq j, \quad i, j \in \theta \\ P(i)P(j), & i = j \end{cases} \quad (15)$$

定义检验统计量

$$R(n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M r(i+n, j+n), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (16)$$

式中 $R(n)$ 在目标所处的位置上会出现比较高的尖峰, 只要其大于第二门限 T_{h2} 就判为有目标, 并且记 n 为目标所在位置; 否则判为没有目标。一般待检测目标在参考窗内至少有 5 个强散射点, 故 T_{h2} 一般取 10~18 左右。即如果 $R(n) \geq T_{h2}$ 目标存在, 且 n 即为目标所在的位置; 否则目标不存在。

由上面的检测判决过程可知, 利用目标和杂波散射回波特性的差异, 对散射回波数据进行预处理, 将大大削弱杂波对检测性能的影响, 实现了高分辨信息和极化信息的有机结合, 因而是一种有效的检测方法。

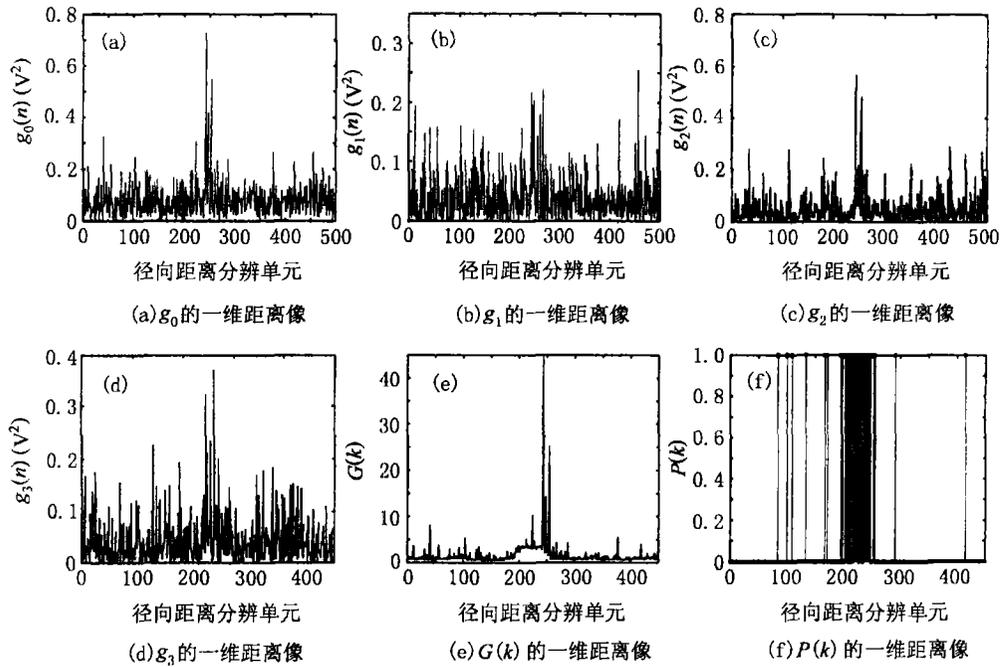


图 1 某军用飞机的 Stokes 矢量各分量、 $G(k)$ 和 $P(k)$ 的一维距离像
(图中信杂比 (SCR) 为 -5dB , 置信系数 $\xi = 5$)

4 仿真实验及结论

本文选用某隐身飞机缩比模型作为目标, 在毫米波段对其进行了宽带全极化测量, 测量系统采用频率步进制, 中心频率为 35GHz , 带宽为 1GHz . 目标的测量姿态为: 俯仰角 0° , 横滚角 0° , 方位角 0° . 信号径向分辨力为 15cm , 目标长度约为 2.3m , 该隐身飞机缩比模型的一维距离像如图 2 所示.

图 3 给出了检测概率与信杂比在虚警率水平为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 时的性能关系曲线, 曲线 1 表示入射波为水平极化情况下的检测性能曲线, 曲线 2 为基于 Stokes 矢量 Frobenius 范数非参数检测算法的检测性能曲线.

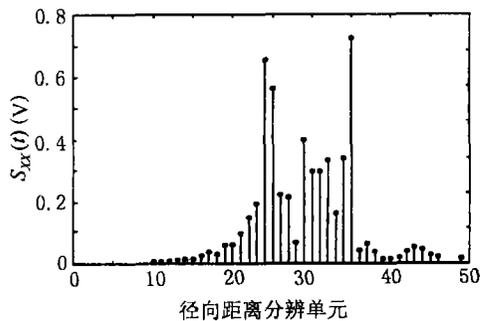


图 2 某军用飞机目标的一维距离像

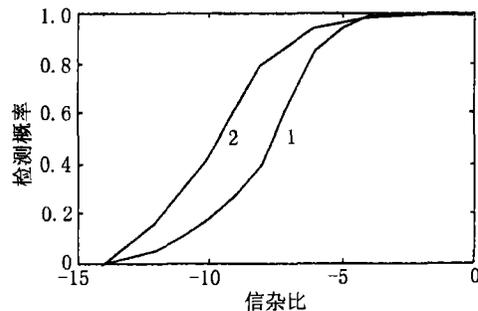


图 3 检测概率与信杂比的性能曲线

由上图可见, 基于 Stokes 矢量 Frobenius 范数非参数检测算法对于微弱目标有较好的检测效果, 同时进一步说明, 极化信息的有效利用, 可以明显改善雷达的检测性能。

本文针对宽带高分辨雷达体制, 提出了一种新的检测思路, 将宽带全极化雷达体制下的高分辨信息和极化信息进行有机地结合。经实测数据证实, 该检测方法是可行的。至于如何更有效地利用高分辨信息和极化信息, 以及在高分辨的条件下, 如何更加充分利用各分辨单元之间的相关信息, 并给出数学上的论证以及更趋向于实用化, 将是我们下一步研究的问题。

参 考 文 献

- [1] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松, 雷达极化信息处理及应用, 北京, 国防工业出版社, 1999, 10-13, 291-359.
- [2] 王雪松, 宽带极化信息处理的研究, [博士学位论文], 长沙, 国防科技大学, 1999.
- [3] 李永祯, 王雪松, 肖顺平, 等, 一种新的高分辨极化目标检测方法, 国防科技大学学报, 2000, 22(6), 65-69.
- [4] 李永祯, 王雪松, 肖顺平, 庄钊文, 基于非线性积累的高分辨极化目标检测, 红外与毫米波学报, 2000, 19(4), 307-312.
- [5] 李永祯, 王雪松, 肖顺平, 等, 基于强散射点径向积累的高分辨极化目标检测方法, 电子学报, 2000, 29(3), 307-310.
- [6] N. C. Currie, R. D. Hayes, R. N. Trebits, Millimeter-wave Radar Clutter, Boston, London, Artech House, 1992, Chap2-3.
- [7] R. Barakat, Statistics of the stokes parameter, J. of the Optical Society of America, 1987, A-4(7), 1-28, 121-156.
- [8] 黄德双, 韩月秋, 基于位置相关的高分辨雷达目标检测方法, 电子科学学刊, 1997, 19(5), 584-590.

AN IMPROVED METHOD FOR HIGH-RESOLUTION POLARIZATION TARGET DETECTION

Cao Xuejun Li Yongzhen* Jiang Wenli* Zhuang Zhaowen*

(Zhangjiakou Communication Academy, Xuanhua 075100, China)

*(College of Electron. Sci. and Eng., Nat. Univ. of Defence Technique, Changsha 410073, China)

Abstract The problem of detecting targets in the cluttered circumstance with wide-band high-resolution radar is studied. A way of improving SCR(Signal-to-Clutter-Ratio) is cited by linear integration filtering in polarization domain. With the intrinsic high resolution of wide-band waveform, one-dimension range profile of radar target can be obtained. In connection with the fact that the values of Stokes vector and polarization attitude of target greatly differ from which of cluttered circumstance, a new target detection method is presented. Simulation experimental results show that radar's detection performance can be improved significantly by using the algorithm presented in this paper.

Key words High-resolution, Polarization, Target detection

曹学军: 男, 1968年生, 讲师, 硕士, 专业方向为信息处理与通信, 目前主要从事通信工程、雷达目标识别、综合电子信息处理等领域的研究。

李永祯: 男, 1977年生, 博士生, 主要从事雷达极化、信息处理、系统仿真、电子对抗等方面的研究工作。

姜文利: 男, 1967年生, 副教授, 博士, 国防科学技术大学电子科学与工程学院综合电子战教研室主任, 目前主要从事综合电子信息处理等领域的研究。

庄钊文: 男, 1958年生, 教授, 博士生导师, 国防科学技术大学电子科学与工程学院院长, 中国模糊分析与设计学会理事, 中国电子学会高级会员, 目前主要从事信号处理、雷达目标识别及模糊信号处理等领域的研究。