

基于非线性积累的高分辨极化目标检测*

李永贞 王雪松 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)

TN 957.523

摘要 研究了毫米波高分辨雷达体制下的目标极化检测问题, 提出了极化域非线性加权积累的思路, 以提高雷达接收信号的信杂比, 在此基础上提出了基于高分辨雷达目标一维距离像“位置”相关的目标检测方法。在毫米波段的实验结果表明, 该方法是一种非常有用的扩展目标检测方法。

关键词 高分辨, 极化, 目标检测, 毫米波。

非线性积累 雷达

HIGH-RESOLUTION POLARIZATION TARGET DETECTION BASED ON NONLINEAR INTEGRATION*

LI Yong-Zhen WANG Xue-Song XIAO Shun-Ping ZHUANG Zhao-Wen
(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The problem of detecting targets in the cluttered circumstance with millimeter-wave high-resolution radar was studied. A new idea of improving SCR (Signal-to-Clutter-Ratio) was presented by nonlinearly weighted integration in polarization domain. A polarization target detection method was then presented based on the range position correlation of one-dimensional range profile of high-resolution radar target. Experimental results show that this kind of detection strategy is quite effective for extended targets.

Key words high-resolution, polarization, target detection, millimeter waves.

引言

众所周知, 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], 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^[1]。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。在窄带低分辨率的情况下, 可以利用矩阵优化理论解决这个问题^[2], 但在宽带高分辨率的情况下关于目标的最佳极化问题的研究迄今仍很少见到报道。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。根据 Huynen^[1,3]的目标分解理论, 起伏目标可以

分解为“确定性”目标和“似噪声”目标的线性组合, 前者对入射极化敏感, 而后者对于入射极化是不敏感的。一般而言, 杂波环境相对于雷达感兴趣探测目标(如飞机、坦克等)来说, 具有更强的“似噪声”特性, 这就意味着杂波对于入射极化更不敏感一些。利用上述特性, 本文提出了在高分辨雷达体制下对目标回波进行极化域加权积累的思路, 即以不同极化的电磁波激励目标, 利用目标与杂波高分辨回波的极化敏感性之间的差异确定加权系数, 对回波进行自适应加权, 从而逼近最佳极化探测, 提高观测信杂比, 进而改善雷达检测性能。

1 目标的极化域非线性加权积累

考虑到雷达目标在宽带的条件下存在最佳极化这一特性, 即总是存在某一特定的极化方式, 以此极化方式发射宽带信号去激励目标得到的散射回波信杂比最大, 或者讲信号杂波功率差(PDSI)达到极大^[1]。因此,

* 国家自然科学基金(编号: 69902010)资助项目
稿件收到日期 1999-10-08, 修改稿收到日期 2000-03-12

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China. (No. 69902010)
Received 1999-10-08, revised 2000-03-12

让人射信号采用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,以改善雷达检测性能。

用一固定极化的宽带电磁波去激励目标,得到的回波可表示为^[1]:

$$\vec{e}_0(t) = \begin{bmatrix} e_{0x}(t) \\ e_{0y}(t) \end{bmatrix} = s(t) * \vec{e}_i(t), \quad (1)$$

其中

$$\vec{e}_i(t) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \cdot e^{j\varphi} \end{bmatrix} f(t),$$

$$s(t) = \begin{bmatrix} s_{hh}(t) & s_{hv}(t) \\ s_{vh}(t) & s_{vv}(t) \end{bmatrix},$$

式中“*”表示卷积, $f(t)$ 为宽带信号; $(\alpha, \varphi) \in [0, \pi] \times [0, 2\pi]$ 为极化相位描述子。

故:

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

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

其中 $\tilde{s}_M \equiv s_M(t) * f(t)$, $k, l = h, v$, 对目标回波进行非线性加权积累,具体公式为:

$$e_x = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q w_{ij}^x e_{0x}(i, j), \quad (4)$$

$$e_y = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q w_{ij}^y e_{0y}(i, j), \quad (5)$$

其中 (i, j) 为极化相位描述子 (α, φ) 的离散网络, $i = 1, 2, \dots, P$, $j = 1, 2, \dots, Q$, P, Q 分别为离散网格的格数。 w_{ij}^x, w_{ij}^y 为非线性权系数,它们的物理意义在于:如果目标被最佳极化的电磁波所激励,其散射回波的信杂比在统计上将达到或接近于极大值,这时,目标散射强度与杂波散射强度的差别将达到一个较高水平,换言之,此时回波中目标强散射分量将明显高出相邻分辨单元内杂波的平均水平;相反的,如果目标被非最佳极化的电磁波所激励,其散射回波中目标强散射分量电平与相邻分辨单元内杂波电平将无很大差别。根据上述分析,定义权系数为:

$$w_{ij}^x = \frac{\delta_{\pi} - \delta_x}{\delta_x}, \quad (6)$$

$$w_{ij}^y = \frac{\delta_y - \delta_x}{\delta_x}, \quad (7)$$

其中 δ_{π}, δ_x 分别为雷达散射回波 e_{0x} 分量的目标平均电平和杂波平均电平, δ_y, δ_x 分别为雷达散射 e_{0y} 回波

分量的目标平均电平和杂波平均电平,定义为:

$$\delta_{\pi} = \frac{1}{M} \sum_{n \in \theta} |e_{0k}(n)|, \quad k = x, y \quad (8)$$

$$\delta_k = \frac{1}{N - M} \sum_{n \in \theta} |e_{0k}(n)|, \quad k = x, y, \quad (9)$$

其中 M 为目标所占据的径向距离单元的长度(M 的获取可以根据目标的先验知识得到,也可按文献[2,3]所述的方法进行估计得到), N 为散射回波的总采用点数,即总的径向分辨单元的个数, θ 为在雷达观测区间的滑动观察窗口,记为:

$$\theta = [n_0 - \frac{M}{2}, n_0 + \frac{M}{2} - 1], \quad (10)$$

其中 n_0 为滑动坐标。

从式(4)和(5)可见,当以某一极化方式的电磁波激励目标时,如果其散射回波信杂比相对较大时,这时目标的平均电平 δ_{π}, δ_y 远大于杂波的平均电平 δ_x, δ_x ,则权系数 $w_{ij}^x, w_{ij}^y \rightarrow 1$;反之,当散射回波的信杂比相对较小时,则权系数 $w_{ij}^x, w_{ij}^y \rightarrow 0$ 。这样定义权系数 w_{ij}^x, w_{ij}^y 的另外一个好处在于,由于采用对目标所占区域进行径向平均,从而避免了在高分辨条件下雷达杂波一般具有比高斯分布更长的“拖尾”特性而引致数目较多的尖脉冲假目标的影响。

在极化域积累过程中,如果让人射极化遍历整个Poincare球,那么由于Poincare球的对称性,必将导致积累分量的互相抵消,为了取得良好的积累效果,只要让人射极化遍历半个Poincare球,即 α 的取值范围为 $[0, \pi]$,而 φ 的取值范围也为 $[0, \pi]$,这一点可从计算机仿真实验中得到验证,遍历半个Poincare球,积累效果最佳。

本文选取某隐身飞机在俯仰 0° ,横滚 0° ,方位 0° 的姿态下在毫米波段进行了宽带全极化测量实验,实验条件如第4部分所述。图1给出了信杂比为 -10dB 时的高分辨雷达回波。图2则为采用极化域非线性加权积累后的目标输出响应(其中 g_0 的定义见下节)。

从图1和图2可以看出,通过极化域非线性加权积累,可以明显提高信杂比。

2 基于极化域积累的宽带高分辨极化目标检测

在宽带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

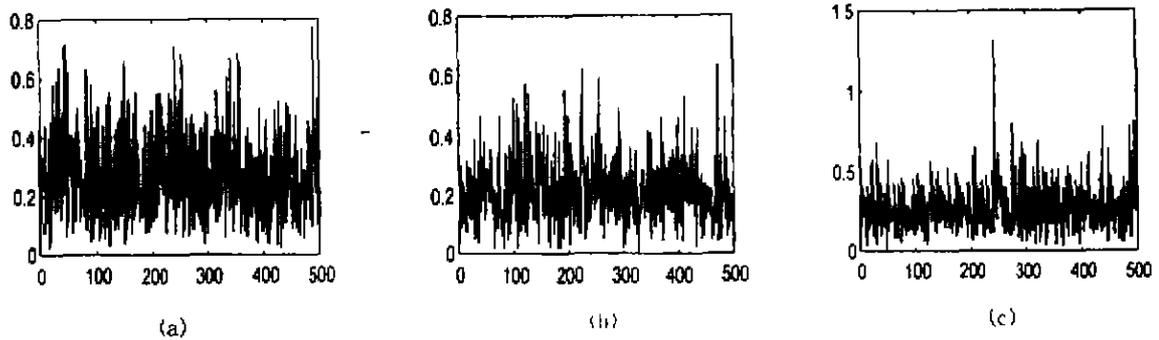


图 1 某军用飞机的 HH, HV, VV 分量的一维距离像(图中横坐标为径向距离分辨单元)
 (a) HH 分量的一维距离像 (b) HV 分量的一维距离像 (c) VV 分量的一维距离像
 Fig. 1 One-dimensional range profile of a military airplane of HH, HV, VV components
 (The x-coordinate represents the range resolution unit)
 (a) one-dimensional range profile of HH component
 (b) one-dimensional range profile of HV component
 (c) one-dimensional range profile of VV component

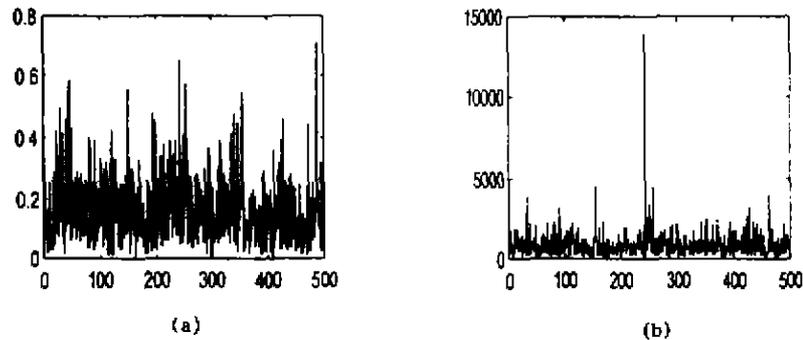


图 2 水平极化回波 Stokes 矢量 g_0 及经极化域积累后 g_0 的时域序列(图中横坐标为径向距离分辨单元)
 (a) 水平极化回波 Stokes 矢量 g_0 分量的时域序列 (b) 经极化域非线性加权积累后 g_0 的时域序列
 Fig. 2 Sequence in time-domain of Stokes vector g_0 with horizontal polarization echo-wave
 and after nonlinearly weighed integration in polarization domain
 (a) sequence of Stokes vector g_0 with horizontal polarization echo-wave in time-domain
 (b) sequence in time-domain of Stokes vector g_0 after nonlinearly weighted
 integration in polarization domain

大的空间尺度;而目标的一维距离像中那些强散射中心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.也就是说,由杂波产生的那些“虚假的”强散射中心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;换言之,在与真实目标径向长度相当的空间距离单元中,真实目标的强散射中心的数目以较高的概率大于假目标的强散射中心数目,并且真实目标径向长度越大、目标的结构越复杂,那么这个概率也会越高.

根据目标和杂波的强散射中心分布的不同,本文利用了基于强散射中心位置相关的非参量检测方法^[5],全极化雷达测量数据经过极化域的积累以后,其

强散射中心对应的位置不变,逼近于以最佳极化的电磁波激励目标时产生的回波,故在观测检验统计量的一维距离像中那些强散射中心的分布变化时,当有目标时,会出现一连串的强散射中心,当没有目标时,强散射中心分布比较稀疏.因此可以根据目标的先验长度信息,设计结构参考滑窗,让它在检验统计量的一维距离像上滑动来进行检测目标.对于积累回波的 Stokes 矢量各分量的一维距离像均表征了雷达目标的高分辨特性,故可以先对每一分量进行目标检测,将检测结果再进行融合处理,检测原理框图如图 3 所示:

2.1 局部检测器的设计

经极化域积累以后的 Stokes 矢量可表示为:

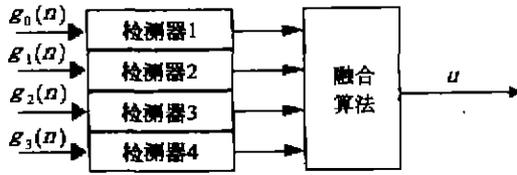


图3 检测原理框图

Fig. 3 Flow chart of detection principle

$$\begin{aligned}
 g_0(t) &= |e_x(t)|^2 + |e_y(t)|^2, \\
 g_1(t) &= |e_x(t)|^2 - |e_y(t)|^2, \\
 g_2(t) &= 2\text{Re}[e_x(t) \cdot e_y^*(t)], \\
 g_3(t) &= -2\text{Im}[e_x(t) \cdot e_y^*(t)],
 \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中 $t \in T$ 为雷达回波的观测时间, Stokes 矢量离散化后可表示为:

$$\begin{aligned}
 g_0(n) &= |e_x(n)|^2 + |e_y(n)|^2, \\
 g_1(n) &= |e_x(n)|^2 - |e_y(n)|^2, \\
 g_2(n) &= 2\text{Re}[e_x(n) \cdot e_y^*(n)], \\
 g_3(n) &= -2\text{Im}[e_x(n) \cdot e_y^*(n)],
 \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中 $n=0, 1, 2, \dots, N-1$.

针对 Stokes 矢量的某单一分量的检测方法具体讨论如下:

首先将雷达回波数字化, 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:

$$\tilde{g}_k(n) = \begin{cases} 1, & \text{if } g_k(n) \geq g_{k\max}, \\ 0, & \text{if } g_k(n) < g_{k\max}, \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, 3 \quad (13)$$

$$g_{k\max} = \max_{n=1}^N \{g_k(n)\} \quad k = 0, 1, 2, 3 \quad (14)$$

$$T_k = \eta_k \cdot g_{k\max}, \quad k = 0, 1, 2, 3 \quad (15)$$

这里 η_k 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 0.2~0.5 之间, η 若偏小, 则虚警概率会增加, η 若偏大, 则漏警概率会增加. 由于置信系数主要影响强散射中心分布的确定, 是检测算法的第一门限, 可以适当选取得低一些.

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, 这样就容易造成虚警. 为此, 必须尽可能地去掉杂波所对应的那些强散射点. 若 $\tilde{g}_k(n)$ 符号下面两个条件, 则判为是属于目标的强散射点, 仍记为“1”, 否则记为“0”.

条件 1: 设在雷达观测区间上第 m 个点被认为是强散射点, 即, $\tilde{g}_k(m)=1$, 设置一窗口 $\tilde{\theta}$, 即为:

$$\tilde{\theta} = [m - \frac{M}{2}, m + \frac{M}{2} - 1], \quad (16)$$

从统计上讲, 在目标所对应的窗口内回波强度不应低于杂波所对应窗口内的回波强度, 即应有:

$$\frac{\frac{1}{M} \sum_{n \in \tilde{\theta}} |g_k(n)|}{\frac{1}{N-M} \sum_{n \notin \tilde{\theta}} |g_k(n)|} > 1, \quad k = 0, 1, 2, 3 \quad (17)$$

条件 2: 由大量的实验表明, 若该强散射点为目标所对应的强散射点, 则其幅值一般要远大于杂波序列的平均幅值, 即有:

$$\frac{g_k(m)}{\frac{1}{N-M} \sum_{n \in \tilde{\theta}} |g_k(n)|} \geq D \gg 1, \quad k = 0, 1, 2, 3 \quad (18)$$

在实际判决中, 可取判决门限为 $D=5$.

若满足上述两个条件则认为该强散射点是目标所对应的强散射点, $\tilde{g}_k(n)$ 仍记为“1”. 这样得到最终的“0, 1”随机序列.

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. 考虑到强散射中心之间的相关信息时, 在这里主要考虑强散射中心之间位置的相关性, 如果两个强散射中心之间的位置相距越近, 则它们的可信度就越高, 定义位置相关系数如下:

$$r_k(i, j) = \begin{cases} \frac{g_k(i) \cdot g_k(j)}{|i-j|} & i \neq j, \\ g_k(i) \cdot g_k(j) & i = j \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, 3 \quad (19)$$

定义检验统计量:

$$R_k(n) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L r_k(i+n, j+n), \quad k = 0, 1, 2, 3; \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (20)$$

式(20)中 $R_k(n)$ 在目标所处的位置上会出现比较高的尖峰, 只要其大于门限 λ 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.

由上面的检测判决过程可知, 这里不仅利用了目标的强散射中心数目信息, 而且还利用了目标强散射中心的空间分布特性, 因而有利于目标的检测.

2.2 融合处理

第 k 个检测器的局部检验统计量记为 x_k ($k=0, 1, 2, 3$), 其局部判决结果记为 T_k , $T_k=1$ 表示局部判决为目标存在, $T_k=0$ 表示局部判决为目标不存在. u 为全局判决结果, $u=1$ 表示目标存在, $u=0$ 表示目标不存在. 此问题的关键是如何融合这些不同的判决行

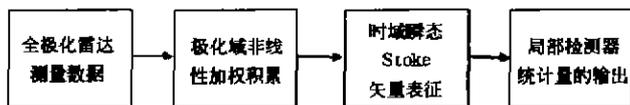


图 4 实验流程图

Fig. 4 Experimental flow diagram

为的,比较典型的几种融合算法^[4]有“与”(AND)融合算法、“或”(OR)融合算法、 L/N 融合算法、线性加权检测算法和非线性加权目标检测融合算法等。本文着重研究基于 Stokes 矢量逻辑与运算的目标检测算法,即基于这样的事实:当目标存在时,目标所对应的强散射点在各 Stokes 矢量中位置基本是一一对应的,经过逻辑与运算,其幅值是增加的;杂波所对应的强散射点在各 Stokes 矢量中位置是随机的,经过逻辑与运算,其幅值是趋于零的。定义检验统计量为:

$$R(n) = \prod_{k=0}^{N-1} R_k(n) \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (21)$$

$R(n)$ 在目标所处的位置上会出现尖峰,只要其大于第二检测门限 λ ,就判为有目标存在,否则判为没有

目标。

具体算法流程如下:

- (1) 对目标散射回波进行极化域的非线性加权积累;
- (2) 计算积累回波的 Stokes 矢量;
- (3) 针对单一分量进行局部检测,计算 $R_k(n)$;
- (4) 对局部检测结果进行融合处理,计算检验统计量 $R(n)$ 的值;
- (5) 比较 $R(n)$ 与检测门限 λ 的大小,进行判断有无目标。

3 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° , 模滚角 0° , 横滚角 0° , 方位角 3° 。信号径向分辨力为 15cm,目标长度约为 2.3m,因而服从高分辨测量统计。采取流程图如图 4 所示。

在杂波服从零均值的高斯分布,信杂比为 -10dB

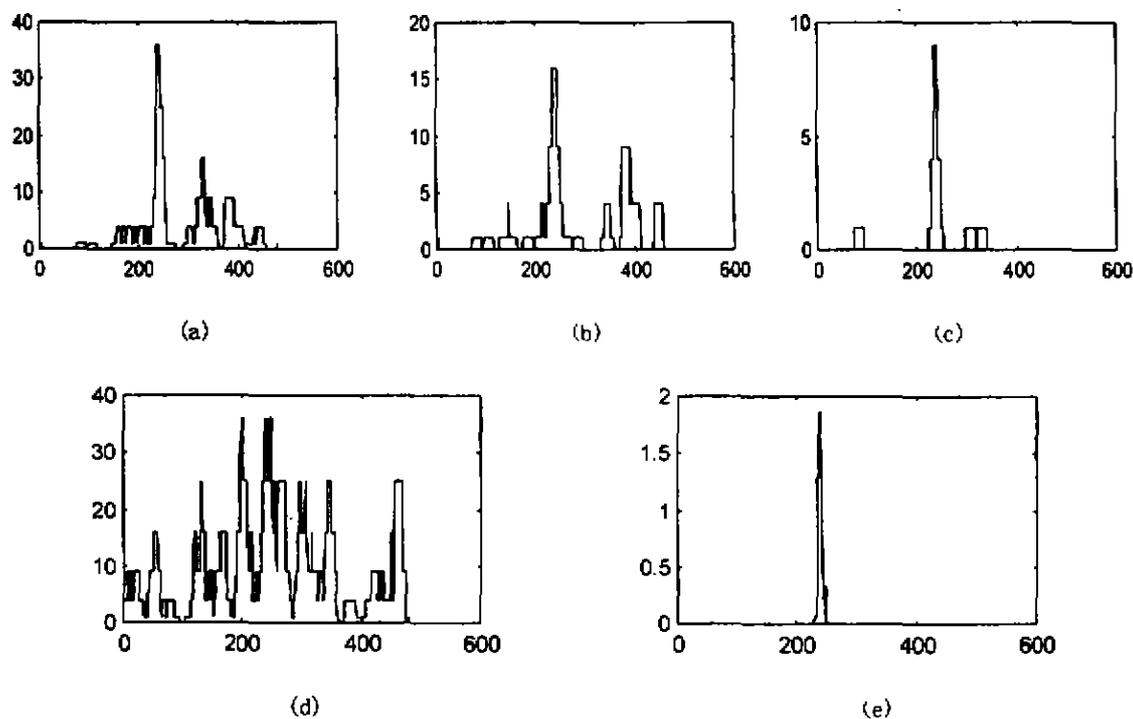


图 5 某隐身飞机目标的 Stokes 矢量各分量的检测输出及 Stokes 矢量逻辑与运算的输出结果图 (图中横坐标为径向距离分辨单元) (a) 局部检测器 g_0 的输出 (b) 局部检测器 g_1 的输出 (c) 局部检测器 g_2 的输出 (d) 局部检测器 g_3 的输出 (e) 基于 Stokes 矢量逻辑与运算的输出

Fig. 5 Output of local detectors of Stokes vector and detector based on Stokes vector logically 'And' of a stealth airplane

- (a) output of local detector g_0 , (b) output of local detector g_1 ,
- (c) output of local detector g_2 , (d) output of local detector g_3 ,
- (e) output of detector based on Stokes vector logically 'And'

的情况下,检测结果如图5所示.

从图5可见,基于Stokes矢量逻辑与运算的目标检测算法比基于Stokes矢量单分量的宽带极化目标的非参量检测算法在同等检测概率的条件下能够更好地抑制虚警.从理论上讲,极化相位描述子 (α, φ) 的离散网络数越大,即 P, Q 取值越大,则越有可能逼近最佳极化探测.经实验仿真发现, P, Q 取5~8,即可取得相当好的效果,对信号的实时性影响甚小.

图6给出了检测概率与信杂比在虚警率水平为 10^{-5} 时的性能关系曲线,曲线1表示基于极化域非线性加权积累的宽带极化目标检测的检测性能曲线,曲线2表示直接进行宽带极化目标检测的检测性能曲线.由图5可见,基于极化域非线性加权积累的宽带极化目标检测的检测性能比直接进行宽带极化目标检测的检测性能改善了2~4dB.

本文针对毫米波段高分辨雷达体制,研究了目标极化检测问题,提出了基于极化域非线性加权积累的极化目标检测方法.文中对利用了极化域非线性加权

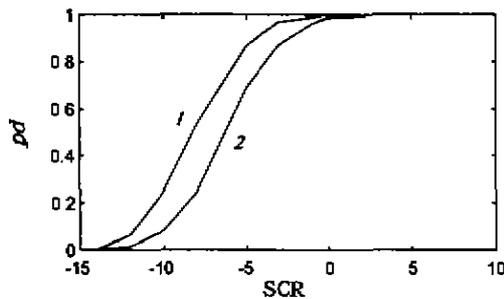


图6 检测概率与信杂比的性能曲线

$(\eta_s=0.2, k=0, 1, 2, 3, \lambda=625)$

Fig. 6 Performance curve between detection probability and SCR (Signal-to-Clutter-Ratio)

$(\eta_s=0.2, k=0, 1, 2, 3, \lambda=625)$

积累来改善高分辨极化目标检测性能的思路在物理意义上给予了说明,但未进行严格的数学证明,通过寻求雷达探测目标的最佳极化配置,以充分利用目标和杂波极化散射特性之间的差异,从而进一步改善检测性能,将是我们下一步需要研究的课题.

REFERENCES

- [1] WANG Xue-Song. Study on wide-band polarization information processing. Ph. D. Thesis, National University of Defense Technology (王雪松. 宽带极化信息处理的研究, 国防科技大学博士学位论文), 1999
- [2] ZHUANG Zhao-Wen, XIAO Shun-Ping, WANG Xue-Song. *Radar Polarization Information Processing and Application*, Beijing: National Defense Industry Press, (庄利文, 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, 1
- [3] SONG Wen-Feng. The theory of precision guidance information processing with wide-band millimeter wave radar. Ph. D. Thesis, National University of Defense Technology, (孙文峰. 宽带毫米波雷达精确制导信息处理方法研究, 国防科技大学博士学位论文), 1998
- [4] RUAN Ying-Zheng. *Radar Section and Stealth Technique*. Beijing: National Defense Industry Press (阮颖铮. 雷达截面与隐身技术, 北京: 国防工业出版社), 1998
- [5] HUANG De-Shuang, HAN Yue-Qu. A detection method of high resolution radar targets based on position correlation, *Journal of Electronics*, (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, (5): 584-590
- [6] YAN Wei-Yan, PENG Ying-Ning, LU Da-Jin, et al. Analysis of data fusion algorithms for detection problem, *Journal of Electronics*, (阎渭焰, 彭应宁, 陆大金等. 检测数据融合算法分析. 电子科学学刊), 1997, (3): 393-401
- [7] XIAO Shun-Ping, WANG Xue-Song, ZUANG Zhao-Wen. The target of aircraft recognition based on polarization invariant, *J. Infrared Millim. Waves* (肖顺平, 王雪松, 庄利文. 基于极化不变量的飞机目标识别. 红外与毫米波学报), 1996, 15(6): 439-441