

文章编号: 1001-2486(2000)05-0065-05

一种新的高分辨极化目标检测方法*

李永祯, 王雪松, 徐振海, 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: 针对宽带毫米波高分辨雷达体制,研究了杂波环境中的目标检测问题。提出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,在此基础上利用宽带波形固有的径向高分辨力对目标进行一维距离成像,估计出回波中强散射点的数量和分布,通过对不同径向分辨单元内的强散射点进行整体检测,可进一步有效地提高信杂比,改善雷达的检测性能。最后在毫米波段的实验仿真结果表明该方法是一种非常有效的扩展目标检测方法。

关键词: 高分辨;极化;目标检测

中图分类号: TN959.1 **文献标识码:** A

A New Method of High-resolution Polarization Target Detection

LI Yong-zhen, WANG Xue-song, XU Zhen-hai, XIAO SHun-ping, ZHUANG ZHao-wen

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, 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 presented by linear integration filtering in polarization domain. With the intrinsic high-resolution characteristic of wide-band waveform, one-dimension range profile of radar target can be obtained. The number and distribution of intense scatterers in radar returns can be estimated. A polarization target detection method is presented based on the correlation of these intense scatterers in various resolution cells. SCR can be improved efficiently and so can the detection performance of radar. The experiment results show that this method is a very effective detection strategy for extended targets.

Key words: high-resolution; polarization; target detection

在宽带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需要解决的一个重要问题。在存在噪声、杂波和干扰的情况下,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、信杂比、信号干扰噪声比等特征指标达到最优,从而有利于目标的探测,这就是雷达探测目标的最佳极化问题^[1]。通常情况下,目标和杂波环境的极化散射特性是不可能充分预知的,因而无法直接确定雷达系统的最佳极化配置。根据 Huynen 的目标分解理论^[3],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,杂波环境较雷达感兴趣的探测目标(如飞机、坦克等)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。本文利用上述特性的差异,提出了在高分辨雷达体制下对目标回波进行极化域线性积累滤波的思路,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极化敏感性之间的差异,对那些最有可能接近最佳极化探测的散射回波进行线性叠加积累,以达到滤除杂波的目的,从而逼近最佳极化探测。另一方面,在宽带高分辨雷达体制下,雷达距离分辨单元远小于目标径向尺寸,目标连续地占据了多个分辨单元,为了利用目标的空间结构信息,必须以目标所占据的数个分辨单元为参考窗,对目标进行“整体”检测。本文在对目标进行了极化域线性积累滤波后,根据雷达回波的强度估计出强散射点的数量和空间分布,然后再进行径向积累,即可有效提高信杂比,进一步改善雷达的检测性能。

* 收稿日期: 2000-04-30
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69902010)
作者简介: 李永祯(1977-),男,博士。

1 目标的极化域线性积累滤波

对于线性雷达目标而言,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^[1]。让入射信号遍历所有可能的极化方式,并有选择地对散射回波进行线性叠加,就可以达到滤除杂波,或等效提高雷达接收信杂比的目的,即等效地实现了最佳极化探测。但在实际观测中,由于目标与杂波环境的极化散射特性难以充分预知,因而对散射波的选择加权方式也就难以事先确定,而是需要根据观测值即时地估算得到。下面就来讨论如何根据雷达观测回波来选择加权方式。

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]:

$$e_k(t) = \begin{bmatrix} e_{0x}(t) \\ e_{0y}(t) \end{bmatrix} = s(t) * e_i(t) = \begin{bmatrix} s_{hh}(t) & s_{hv}(t) \\ s_{vh}(t) & s_{vv}(t) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \cdot e^{j\varphi} \end{bmatrix} f(t) \quad (1)$$

'*'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^[2]。

定义置信系数为:

$$w_k = \frac{\delta_{kt} - \delta_{kc}}{\delta_{kt}}, k = x, y \quad (2)$$

式(2)中 δ_{xt} 、 δ_{xc} 分别称为雷达散射回波 x 极化分量的目标平均电平和杂波平均电平, δ_{yt} 、 δ_{yc} 则称为雷达散射 y 极化分量的目标平均电平和杂波平均电平,定义为:

$$\delta_{kt} = \frac{1}{M} \sum_{n \in \theta} |e_{0k}(n)|, \delta_{kc} = \frac{1}{N - M} \sum_{n \notin \theta} |e_{0k}(n)|, k = x, y \quad (3)$$

式(3)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[5]所述的方法进行估计得到); 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。

从式(2)和(3)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,即目标的平均电平 δ_{kt} 远大于杂波的平均电平 δ_{kc} ,则置信系数 $w_k \rightarrow 1$;反之,当散射回波的信杂比相对较小时,置信系数 $w_k \rightarrow 0$ 。这样定义置信系数 w_k 的一个好处在于,由于采用对目标所占据的全部距离单元进行径向平均,从而避免了在高分辨条件下雷达杂波“拖尾”特性而招致数目较多的尖脉冲假目标的影响。

对散射回波进行极化域线性积累滤波,就是根据置信系数 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

$$e_x = \sum_{i=1}^P \sum_{m=1}^Q u_x(\alpha_i, \varphi_m) e_{0x}(\alpha_i, \varphi_m), e_y = \sum_{i=1}^P \sum_{m=1}^Q u_y(\alpha_i, \varphi_m) e_{0y}(\alpha_i, \varphi_m) \quad (4)$$

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

$$u_k(\alpha_i, \varphi_m) = \begin{cases} 1 & w_k(\alpha_i, \varphi_m) \geq \eta \cdot \max_{i,m} [w_k(\alpha_i, \varphi_m)] \\ 0 & w_k(\alpha_i, \varphi_m) < \eta \cdot \max_{i,m} [w_k(\alpha_i, \varphi_m)] \end{cases}, k = x, y \quad (5)$$

式(5)中 η 为置信水平,一般在0.7~1.0之间取值。由式(1)、(4)和式(5)可得经积累滤波后的输出信号为

$$e_x = \tilde{s}_{hh} \cdot \sum_{i=1}^P \sum_{m=1}^Q [u_x(\alpha_i, \varphi_m) \cdot \cos(\alpha_i)] + \tilde{s}_{hv} \cdot \sum_{i=1}^P \sum_{m=1}^Q [u_x(\alpha_i, \varphi_m) \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \exp(j \cdot \varphi_m)] \quad (6)$$

$$e_y = \tilde{s}_{vh} \cdot \sum_{i=1}^P \sum_{m=1}^Q [u_y(\alpha_i, \varphi_m) \cdot \cos(\alpha_i)] + \tilde{s}_{vv} \cdot \sum_{i=1}^P \sum_{m=1}^Q [u_y(\alpha_i, \varphi_m) \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \exp(j \cdot \varphi_m)] \quad (7)$$

式(6)及(7)中 $\tilde{s}_{kl} \equiv s_{kl}(t) * f(t)$, $k, l = h, v$ 。

定义变量:

$$g(n) = |e_x(n)|^2 + |e_y(n)|^2, n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (8)$$

它侧重表征了雷达散射回波的能量信息。

本作者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3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

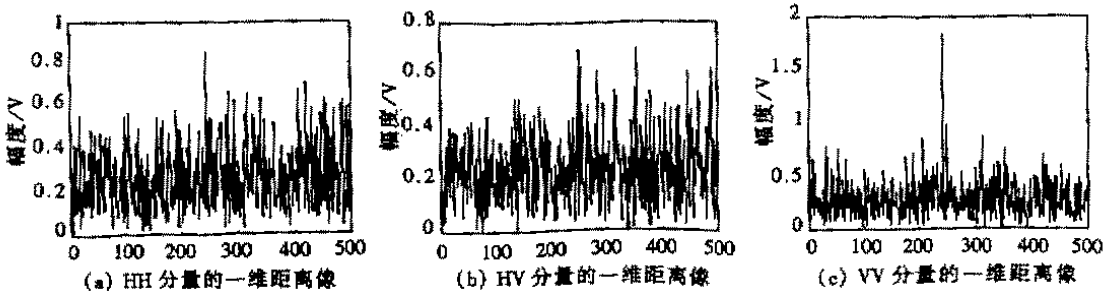


图1 某军用飞机的HH, HV, VV分量的一维距离像(图中横坐标为径向距离分辨单元)

Fig.1 One-dimension range profile of a military aircraft of HH, HV, VV components

(The x-coordinate represents the range resolution cell)

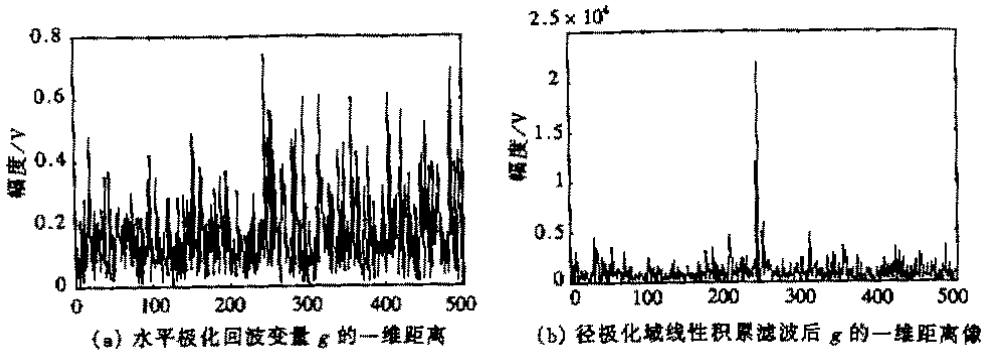


图2 水平极化回波 g 及经极化域线性积累滤波后 g 的一维距离像

Fig.2 (a) One-dimension range profile of g with horizontal polarization echo - wave

(b) One-dimension range profile of g after linear weighted integration in polarization domain

域线性积累滤波后的目标输出响应。从图1和图2可以看出，通过极化域线性积累滤波，可以明显提高信杂比。通过实验仿真可得，当 P, Q 取 $5\sim 8$ 之间的值，积累滤波即可以达到相当好的效果，这对信号处理的实时性造成的影响较小。

2 基于线性积累滤波的高分辨极化目标检测

现有的研究结果表明^[5]，在宽带高分辨的条件下，通过对目标所占据的分辨单元区间进行径向积累可以改善检测性能。但是注意到，在高频区目标的高分辨雷达回波通常具有很强的起伏特性，在均匀杂波环境中目标所占据的不同距离单元内的信杂比往往相差甚大；若直接对目标占据的分辨单元进行径向积累，虽可在一定程度上改善检测性能，但由于目标的弱强散射结构对应分辨单元的加入，必然使整体信杂比有所损失，从而使检测性能有所下降。基于这样的考虑，本文先估计出回波中强散射点的数量和分布，然后再进行径向积累，则可更加有效提高信杂比，从而进一步改善检测性能。

在光学区，由于目标的散射点可能随目标姿态角的微小变化而发生显著变化^[14]，就有可能导致雷达回波幅度的剧烈变化，在缺乏对目标和杂波散射强度分布特性的先验知识的情况下，可以直接根据样本序列的相对幅值的大小来确定其强散射点，即

$$g'(n) = \begin{cases} g(n) & |g(n)| \geq \xi \cdot \max_{n=0, \dots, N-1} \{|g(n)|\} \\ 0 & |g(n)| < \xi \cdot \max_{n=0, \dots, N-1} \{|g(n)|\} \end{cases}, \quad (9)$$

其中 ξ 为可信度, 可根据信杂比 (SCR) 值的大小 (或虚警率的大小) 来确定, 一般可选取 0.2 ~ 0.7 左右。不过, 初步检测应当尽量减少强散射点的遗漏, 故选取较小的 ξ 值为好。由此就得到了雷达目标回波的强散射点的径向分布情况。

在估计出目标一维距离像所占据的分辨单元区间长度内, 强散射点的个数 M 及其径向分布之后, 选取以下变量作为检验统计量:

$$G = \sum_{n \in \theta} g'(n) \quad (10)$$

假定 $e_k(n)$ 的概率密度为 $f_{e_k}(e_k)$, $t_k = |e_k|^2$ 的概率密度为 $f_{t_k}(t_k)$, $g(n)$ 的概率密度为 $f_{g(n)}[g(n)]$, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。注意到, 一般情况下杂波与信号相互独立, 并且各分辨单元之间的采样值亦彼此独立, 那么由 $f_{g(n)}[g(n)]$ 可以推知检验统计量 G 的条件概率密度, 分别记为 $f(G/H_0)$ 和 $f(G/H_1)$ 。对于 $N-P$ 准则, 要求检测虚警率维持在一定水平内, 即要求 $P_{fa} = \int_{T_a}^{\infty} f(G/H_0) dG \leq a$ 。相应地, $P_d = \int_{T_a}^{\infty} f(G/H_1) dG$ 。其中 a 为虚警概率水平。由此可推出, $T \geq T_a$, 这里 T_a 即为恒虚警率 (CFAR) 的检测门限, 则相应地可得到其检测概率。下面以 Gauss 模型为例, 讨论检测性能的改善问题。

2.1 H_0 假设情形

根据假设知, 杂波服从零均值高斯分布, 在 H_0 假设下, e_x 和 e_y 均为若干个独立高斯变量之和, 故服从高斯分布, 设 $e_x \sim N(0, \sigma_x^2)$, $e_y \sim N(0, \sigma_y^2)$ 。由于各分辨单元之间彼此独立, 所以 G 的特征函数为:

$$C_G(u) = \frac{1}{(1 - 2j\sigma_x^2 u)^M} \frac{1}{(1 - 2j\sigma_y^2 u)^M} \quad (11)$$

若 $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$, 可以求得:

$$f(G/H_0) = \int C_G(u) \exp(-juG) du = \frac{1}{(2\sigma^2)^M \Gamma(2M)} G^{2M-1} \exp\left(-\frac{G}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

此式表明 G 服从自由度为 $4M$ 的 χ^2 分布。

若 $\sigma_x^2 \neq \sigma_y^2$, 则可由 $f(G/H_0) = \int C_G(u) \exp(-juG) du$ 求得, 因其过程繁琐, 这里不再赘述。

2.2 H_1 假设的情形

当有目标时, 如果目标信号为零均值的平稳随机过程, 由于信号与杂波各采样之间是不相关的, 故其散射回波仍服从零均值的 Gauss 分布。其协方差为目标与杂波的协方差之和, 则可类似地得到 G 的特征函数为:

$$C_G(u) = \frac{1}{(1 - 2j\sigma_x^2 u)^M} \frac{1}{(1 - 2j\sigma_y^2 u)^M} \quad (13)$$

若 $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$,

$$f(G/H_1) = \int C_G(u) \exp(-juG) du = \frac{1}{(2\sigma^2)^M \Gamma(2M)} G^{2M-1} \exp\left(-\frac{G}{2\sigma^2}\right) \quad (14)$$

如果目标信号为确定性时, 且杂波的统计特性不变, 故有散射回波服从非零均值的 Gauss 分布。设 $e_x \sim N(\bar{e}_x, \sigma_x^2)$, $e_y \sim N(\bar{e}_y, \sigma_y^2)$, 其中 \bar{e}_x 和 \bar{e}_y 分别为 e_x 、 e_y 的均值, 而 σ_x^2 、 σ_y^2 不变, 若 $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$, 可以推得:

$$f(G/H_1) = \frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{G}{\lambda}\right)^{\frac{2M-1}{2}} \exp\left(-\frac{G+\lambda}{2\sigma^2}\right) I_{2M-1}\left(\frac{\sqrt{G \cdot \lambda}}{\sigma^2}\right) \quad (15)$$

其中 $\lambda = \sum_{n \in \theta} [p_x^2(n) + q_x^2(n) + p_y^2(n) + q_y^2(n)]$ 为其非中心参量, $I_{2M-1}(\cdot)$ 为 $2M-1$ 阶修正贝塞尔函数。若 $\sigma_x^2 \neq \sigma_y^2$, 则由 $f(G/H_1) = \int C_G(u) \exp(-juG) du$ 可用类似的方法求得。这里不再赘述。

由分析可得，随着积累单元个数 M 的增大， $f(G/H_0)$ 与 $f(G/H_1)$ 的差别在快速增大，因此雷达的检测性能随着分辨单元的积累个数的增加而提高。这一点也可从第三部分的仿真中得以验证。

3 实验仿真及结论

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，测量系统采用步进频率体制，中心频率为 35 GHz，带宽为 1 GHz，信号径向分辨力为 15 cm，目标长度约为 2.3 m。图 3 给出了检测概率与信杂比的性能关系曲线，曲线 1 表示在虚警率水平为 10^{-6} ($\alpha = 10^{-6}$) 时没有进行极化域线性积累滤波的宽带极化目标检测性能曲线，曲线 2 表示在同样虚警率水平下基于极化域线性积累滤波的宽带极化目标检测性能曲线。由图可见，基于极化域线性积累滤波的宽带极化目标检测算法的检测性能，比没有进行极化域线性积累滤波的宽带极化目标检测算法的检测性能改善了 2~4 dB。

本文针对宽带高分辨雷达体制，研究了目标极化检测问题，提出了基于极化域线性积累滤波的高分辨极化目标检测方法。文中对利用了极化域线性积累滤波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阐明，但没从数学上给出严格的论证。关于通过寻求雷达探测目标的最佳极化配置，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着重研究的问题。此外，文中检测方法是在目标、杂波各极化通道之间不相关的统计假设下得到的，对于各极化通道之间具有部分相关性的情况尚有待进一步研究。

参考文献：

- [1] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究 [D]. 长沙：国防科技大学，1999.
- [2] 杜耀惟，张强，何卫国. 雷达目标极化特性及其在反隐身中的应用课题研究专辑 [J]. 南京：电子工业部 14 所，1996.
- [3] J. R. Huynen. Phenomenological theory of radar targets [Ph. D. Dissertation]. Technical University Delft, Nether lands, 1970.
- [4] 庄钊文，肖顺平，王雪松. 雷达极化信息处理及应用 [M]. 北京：国防工业出版社，1999. 1
- [5] 孙文峰. 宽带毫米波雷达精确制导信息处理方法研究 [D]. 长沙：国防科技大学，1998. 7
- [6] 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 [J]. 红外与毫米波学报，2000，4.

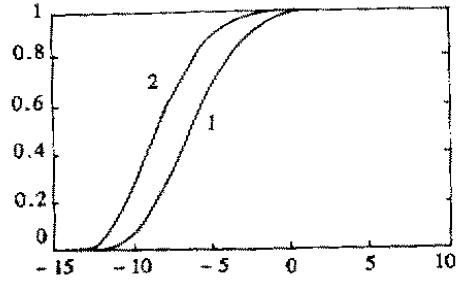


图 3 检测概率与信杂比的性能曲线
Fig.3 Performance curve between detection probability and SCR

