

# 高分辨雷达目标极化检测仿真实验与结果分析

王雪松,徐振海,李永祯,肖顺平,庄钊文

(国防科技大学电子科学与工程学院,长沙 410073)

**摘 要:** 在宽带高分辨雷达目标极化检测的理论及模型基础上,利用某隐身飞机与某战斗机实测宽带全极化散射数据以及杂波模型,进行了两种典型情况下的高分辨极化检测仿真实验,验出了实验结果,分析验证了文献[1]中的结论。

**关键词:** 高分辨;极化;目标检测;横向极化滤波

**中图分类号:** TN957.51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2000) 12-0060-04

## High-resolution Radar Target Detection Simulation Experiments and Results Analysis

WANG Xue-song, XU Zhen-hai, LI Yong-zhen, XIAO Shun-ping, ZHUANG Zhao-wen

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

**Abstract:** On the basis of theory and model on high-resolution radar target polarization detection Presented in reference, and via the wide-band polarimetric scattering data of a stealth plane and a fighter as well as clutter models, simulation experiments on high-resolution polarization detection in two characteristic cases are performed. Results are given to verify conclusions of reference[1].

**Key words:** high-resolution; polarization; target detection; transverse polarization filtering

### 1 引言

20 世纪 80 年代以来,宽带全极化成为现代雷达体制的重要发展趋势,宽带高分辨雷达目标检测问题一直倍受国内外学术界关注<sup>[1,4]</sup>,但迄今为止,现有的高分辨目标检测研究均未考虑对目标极化散射特性信息的利用问题,因而仅适用单极化雷达体制。在宽带高分辨条件下,利用极化检测技术有可能极大提高对电磁微弱目标(如隐身目标等)的探测性能,因而发展宽带高分辨极化雷达目标检测技术不但顺应现代雷达体制宽带全极化的发展趋势,而且具有特别的理论与现实意义<sup>[2]</sup>。

文献[1]中研究了宽带高分辨雷达目标极化检测的基础理论与模型问题,提出了利用横向极化滤波技术进行目标检测的思路,设计了相应的似然比检测器,并导出了检测性能极化域优化的理论模型。本文将在此理论基础上,利用某隐身飞机和某战斗机在 Ka 波段的宽带高分辨全极化散射数据,进行高分辨极化检测仿真实验。文献[1]将高分辨雷达目标极化检测问题被分为两种典型情况来处理:(1)目标为确定性的情况;(2)目标、杂波均为零均值平稳随机过程的情况,本文仿真实验也将针对这两种情况进行设计。对于目标、杂波为零均值非平稳过程的情况,因其似然比检验统计量服从复合的指数分布,而该指数分布概率密度的实际解算过程比较复杂,本文

对这种情况不予研究。

### 2 目标和杂波的统计模型

在开始检测实验之前,首先讨论目标和杂波 S-型行展开矢量协方差矩阵的表示问题<sup>[2]</sup>。设杂波在某个时刻的 S-型行展开矢量  $l_c$ ,在互易条件下  $l_c$  退化为 3 维矢量,记为  $l_c = [C_{xx}, \sqrt{2} C_{xy}, C_{yy}]^T$ ,其协方差矩阵为  $c = l_c l_c^H$ 。若记

$$\begin{aligned} c_{00} &= |C_{xx}|^2, \quad c_{01} = |C_{xy}|^2 / c_{00}, \quad c_{02} = |C_{xx}|^2 / c_{00}, \\ c_{11} &= C_{xx} C_{xy}^* / c_{00}, \quad c_{12} = C_{yy} C_{xy}^* / c_{00}, \quad c_{22} = C_{xx} C_{yy}^* / c_{00}, \end{aligned}$$

则  $c$  可表示为如下的 6 参数模型:

$$c = \frac{1}{c_{00}} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} c_{01} & c_{02} \\ \sqrt{2} c_{11} & 2 c_{12} & \sqrt{2} c_{22} \\ c_{02}^* & \sqrt{2} c_{12} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于起伏性目标,亦可类似地求出其时域 S-型行展开矢量的协方差矩阵以及时域合成 Kennanough 矩阵,它们的表达式分别与式(1)完全一致,只需将上面两式中的下标“c”换成“s”即可。

在文献[3]中,L. M. Novak 针对地物杂波(如树木、灌木丛、草地等)提出了一种杂波协方差模型,它认为杂波的交叉

极化分量与主极化分量是统计无关的,即  $c_x = c_y = 0$ , 这时  $c$  变为

$$c = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & c \\ 0 & 2 & c \\ c^* & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

此模型可看作是式(1)的一个子集. 由式(2)可见,  $c$  可用 4 个参数来表征. 对于不同的背景杂波, 这 4 个数是不同的.

L. M. Novak 等人给出了 3 组典型的地物杂波协方差矩阵参数值, 如表 1 所示:

表 1

	$\frac{1}{2} \langle \sigma^2 \rangle$	$c$	$c$	$c$
树木	0.256	0.08	0.89	0.61
灌木丛	0.098	0.095	1.08	0.60
草地	0.086	0.095	1.03	0.53

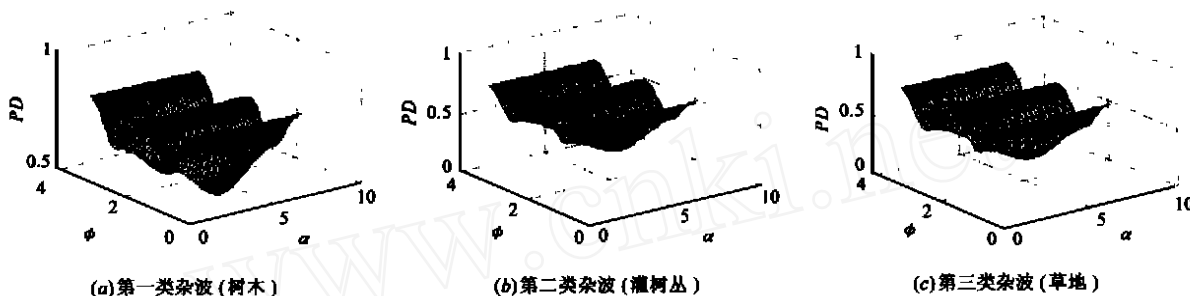


图 1 三类典型杂波散射场极化度与入射极化的关系

本文的检测实验以这三组数据作为典型杂波数据. 图 1 给出了这三类典型杂波的散射场极化度与入射极化状态的关系曲面, 其中入射极化状态用其极化相位描述子  $(\alpha, \phi)$  来表征<sup>[2]</sup>. 由图可见, 这三类杂波散射场极化度分布具有较大的相似性. 事实上, 通过仿真实验发现, 这三类杂波对于目标检测性能的影响也是十分接近的, 因此在下面的仿真结果中 will 只给出一类杂波环境中的目标检测情况.

### 3 高分辨雷达目标极化检测仿真实验及结果分析

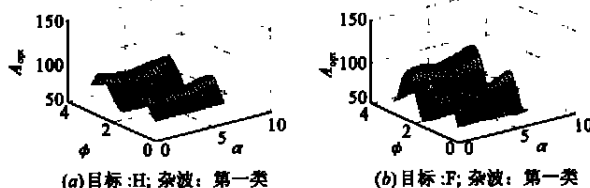
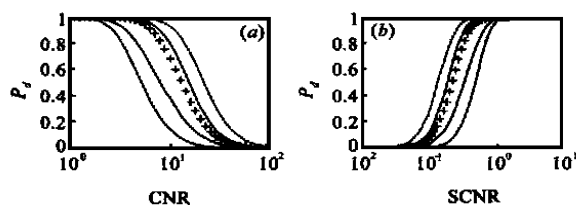
本文选用某战斗机(H)和某隐身飞机(F)作为检测目标, 在 Ka 波段对两类目标的缩比模型采用频率步进体制进行宽带测量, 频带为  $f = [34.7, 35.7] \text{ GHz}$ , 带宽 1 GHz, 频率步进间隔 2 MHz, 共计 500 个频率点. 根据雷达分辨理论可知<sup>[5]</sup>, 实验测量系统带宽为 1 GHz, 其等效空间径向分辨力为  $R = 0.15 \text{ m}$ . 目标模型径向长度约为 2.5 m, 以  $R$  为间隔对目标回波采样, 则横向极化滤波器组长度  $N = 16$ .

#### 3.1 目标为确定性情况下的高分辨极化检测实验结果

在这种情况下, 目标姿态为: 俯仰角  $0^\circ$ , 横滚角  $0^\circ$ , 方位角  $0^\circ$ . 图 2 给出了雷达采用最优横向极化滤波器组接收情况下, 输出 SCNR (图中对应为参数  $A_{\text{opt}}$ ) 与入射极化的关系曲面, 具体参数为: 输入  $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$ ,  $\text{CNR} = 4.7 \text{ dB}$ . 根据实验结果可以得到如下结论: 在同一类杂波环境中, 不同目标的  $A_{\text{opt}} \sim J_t$  关系是不同的, 这意味着对入射极化  $J_t$  进行优化所能获得的检测性能改善也不同; 对同一目标而言, 其处于不同杂波环境中的  $A_{\text{opt}} \sim J_t$  关系也有所不同, 由此可知检测性能的极化域改善与杂波特性有关.

图 3 和 4 给出了目标 F 和目标 H 在第一类杂波环境中的检测性能曲线, 其中给定输入  $\text{SNR} = 4.77 \text{ dB}$ , 虚警概率  $P_{fa} = 10^{-6}$ . 由实验结果知, 采用最优发射极化比采用“最差”发射极化 (这里的“最差”是在采用最优横向极化滤波器组进行接收的前提下定义的, 它与垂直极化几乎完全重合) 时检测性能改善量为:  $\text{CNR}$  改善  $5.6 \text{ dB}$ ,  $\text{SCNR}$  改善  $5.44 \text{ dB}$ ; 相对于水平极

化,  $\text{CNR}$  改善  $3.8 \text{ dB}$ ,  $\text{SCNR}$  改善  $3.98 \text{ dB}$ ; 相对于右旋圆极化,  $\text{CNR}$  改善  $1.55 \text{ dB}$ ,  $\text{SCNR}$  改善  $1.9 \text{ dB}$ ; 相对于左旋圆极化,  $\text{CNR}$  改善  $0.8 \text{ dB}$ ,  $\text{SCNR}$  改善  $1.14 \text{ dB}$ . 当杂波环境为第二、三类时, 上述的改善情况略有下降.

图 2 目标输出 SCNR ( $A_{\text{opt}}$ ) 与入射极化的关系曲面 (输入  $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$   $\text{CNR} = 4.77 \text{ dB}$  情形)图 3 目标 F 在第一类杂波环境中的检测性能曲线 (输入  $\text{SNR} = 4.77 \text{ dB}$   $P_{fa} = 10^{-6}$ ). (a) 中六条曲线由左至右依次对应的雷达发射极化为: “最差”(min), 垂直(V), 水平(H), 右旋圆(R), 左旋圆(L), 最优(max); 并且“min”与“V”乎重合; (b) 中曲线顺序与上述顺序相反.

由图 3 和图 4 的仿真结果可以看出, 杂波中目标检测性能对入射极化有较强的依赖关系, 譬如, 在 4 种典型入射极化中, 均是左旋圆极化的检测性能更好一些, 而垂直极化的性能差一些. 这种现象可以从广义极化优化的角度作出定性的解释<sup>[6]</sup>. 给定杂波与目标后, 目标最优检测的实质是尽可能地扩大目标与杂波之间的差别, 通过调整入射极化, 可以使目标与杂波的反射极化彼此尽可能远离, 或者尽可能地增强目标回波和抑制杂波, 在此基础上再使用横向极化滤波器进行最优

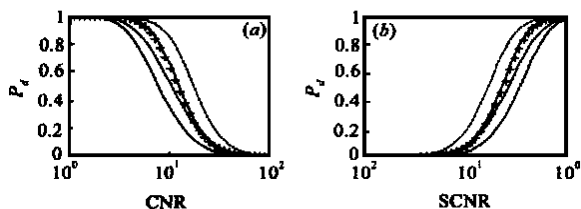


图4 目标 H 在第一类杂波环境中的检测性能曲线(输入 SNR = 4.77dB  $P_{fa} = 10^{-6}$ ). 各曲线顺序与图3 相同.

接收,即可最大限度地得到目标与杂波之间的统计差别信息,从而影响最终的检测性能.

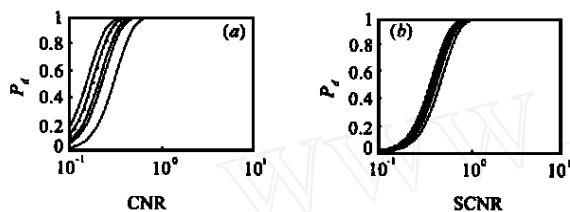


图5 目标 F 的  $P_d \sim$  SCNR 检测性能与输入 CNR 的关系(第一类杂波,  $P_{fa} = 10^{-6}$ ). 图中各曲线所对应的雷达发射极化由左至右依次为:最优(max),垂直(V),右旋圆(R),左旋圆(L),水平(H),最差(min).

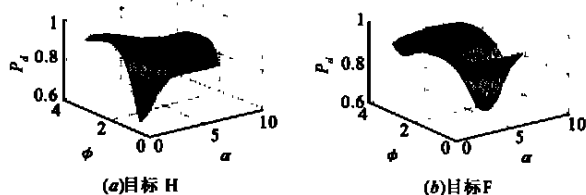


图6 检测概率入射极化关系曲面(第一类杂波, 输入 SCNR = -4.5dB, CNR = 10dB,  $P_{fa} = 10^{-6}$ )

将图3和4相比较可知,在相同的杂波环境条件下,采用极化域优化技术对于目标 F 检测性能的改善要明显高于对目标 H 检测性能的改善,但对两种目标均采用最优收、发极化进行探测时,二者的探测性能却相差不多.譬如,对目标 F,欲使检测概率  $P_d = 0.8$ ,则需 SCNR > -7dB;而对目标 H,要求 SCNR > -6.6dB,仅比前者高 0.4dB.在这个意义上可以说,目标 F 的检测性能对雷达探测极化方式比较敏感,而目标 H 不太敏感.

当输入 CNR 不同时,极化域优化技术对于目标检测性能的改善能力也不相同.一般而言,CNR 越高,利用极化域优化技术所获得的性能改善越大;反之,改善越小.图5给出了检测性能关系与输入 CNR 依赖关系.由图可见,当 CNR = 10dB 时的检测性能的改善要明显高于 CNR = 0dB 时的情况.造成这种现象的原因是:当 CNR 较高时,杂波散射场极化度较高,利用极化滤波或增强技术可以较高好地抑制杂波、增强目标,获得较大的输出 SCNR 改善,从而使检测性能得到较大的改善;反之,当 CNR 较低时,杂波散射场更加接近于未极化波,那么利用极化滤波或增强等技术获得的目标增强效果就比较有限,从而使最终检测性能对于入射极化的依赖关系降低.

最后,图6给出了目标检测概率与入射极化之间的关系曲面,可以清楚地看出,给定检测电磁环境以后,目标检测概率与入射极化有着敏感的依赖关系.

### 3.2 目标和杂波均为零均值平稳随机过程情况下的高分辨率极化检测实验结果

本次实验中目标的协方差矩阵按如下方式获得:首先选定  $0^\circ \sim 5^\circ$  方位角的目标时域 S-型行展开矢量采样序列作为初始数据,对每个方位角的目标数据进行非相干合成,得到一个合成协方差矩阵,再对这些方位角下的协方差矩阵进行非相干合成,从而得到了最终的协方差矩阵.

图7和图8分别给出了输入 CNR = 10dB、输入 SNR = 10dB 条件下目标 F 检测概率与输入 SCNR 以及横向极化滤波器组长度  $N$  的关系曲线.

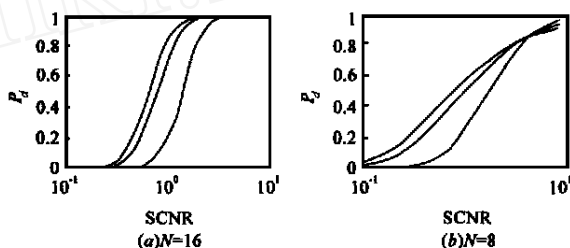


图7 随机性目标检测概率与输入 SCNR 的依赖关系曲线. 输入 CNR = 10dB; 目标 F; 第一类杂波; 图中各曲线由左至右依次对应着入射极化为:左旋圆极化(L),右旋圆极化(R),水平极化(H),垂直极化(V);后两条曲线几乎重合

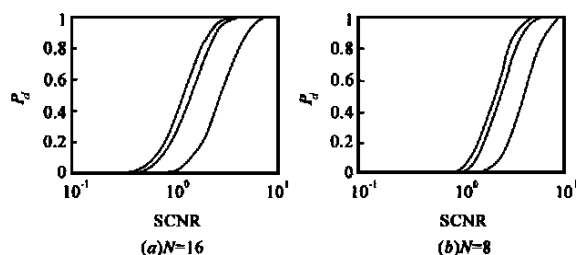


图8 随机性目标检测概率与输入 SCNR 的依赖关系曲线. 输入 SNR = 10dB; 目标 F; 第一类杂波; 图中曲线顺序与图7 相同.

分析以上实验结果,探究随机性目标检测性能与雷达收发极化配置、目标性质、横向极化滤波器长度、以及输入 SNR、CNR、SCNR 等因素之间的关系,可以得到与目标为确知性情况几乎相同的结论.需要指出的是,相对于确知性目标而言,随机性目标极化特性的起伏造成了雷达回波极化度的降低,这在一定程度上削弱了目标与杂波环境之间的极化差异性,因而会产生检测性能的损失,而这正是相同探测条件下随机性目标检测性能低于确知性目标检测性能的原因.

### 4 结束语

本文以某隐身飞机与某战斗机的实测宽带全极化散射数据为基础,针对三种杂波模型,进行了高分辨雷达目标极化检测仿真实验.实验分为两类型情况进行:(1)目标为确知性的情况;(2)目标、杂波均为零均值平稳起伏过程的情况.这两

类典型情况的实验结果,验证了文献[1]中提出的宽带高分辨目标极化检测理论.实验结果表明,基于横向极化滤波的高分辨目标检测方法能够有效地利用目标与杂波的空间一极化结构之间的差异性信息,具有良好的检测性能.

需要指出的是,由于实验条件所限,本文仅对目标的静态宽带极化散射进行了外场测量,而未能对目标的高分辨动态起伏特性进行测量实验和建模;同样也未能对杂波进行高分辨测量实验和建模,而是直接采用了文献[3]提供的杂波模型,这些不足在一定程度上影响了最终实验结果的准确性.但是,本文的研究目的在于通过这些检测实验得到雷达检测性能与诸相关参数的依赖关系,而这些关系具有一定的“相对性”和“适应性”,即未必需要获知被实验对象的各项绝对参数的精准模型.在这个意义上,本文得到的实验结论仍然具有普遍的意义.

#### 参考文献:

- [1] 王雪松,肖顺平,李永祯.高分辨雷达目标极化检测理论与性能优化模型[J].电子学报,2000,7.
  - [2] 王雪松,宽带极化信息处理的研究[D].长沙:国防科技大学电子工程学院,1999,6.
  - [3] L. M. Novak, M. J. Cardullo. Studies of target detection algorithms that use polarimetric radar data [J]. IEEE Trans, 1989, AES-25 (2): 150 ~ 165.
  - [4] J. J. van Zyl. On the importance of polarization in Radar scattering problems [D]. California Institute of technology, pasadena, CA, Jan. 1986.
  - [5] 林茂庸,柯有安.雷达信号理论[M].北京:国防工业出版社,1981.
  - [6] 庄钊文,肖顺平,王雪松.雷达极化信息处理及其应用[M].北京:国防工业出版社,1999.
- 
- (上接第 89 页)
- [10] He You, Peng Yingning, Lu Dajin. Composite Filtering in Hybrid Multi-sensor Data Fusion Systems [S]. Inter. Radar Symposium, Germany September, 1998: 745 - 748.
  - [11] He You, Peng Yingning, Lu Dajin. Sensor track fusion with feedback information [S]. Inter. Conf. on Radar System, May, 1999, France.
  - [12] 何友,王国宏,陆大猷,彭应宁.多级式多传感器信息融合中的状态估计[J].电子学报,1999,27(8):66 - 69.
  - [13] 何友,王国宏,陆大猷,彭应宁.多传感器信息融合及应用[M].电子工业出版社.北京:第十一章,2000,11.
  - [14] A. T. Alouani, T. R. Rice. Performance analysis of an asynchronous track fusion and architecture [J]. SPIE. 1997, 3068: 194 - 205.