

基于时频联合域极化滤波的高分辨极化雷达信号检测

曾勇虎^{1,2}, 王雪松¹, 肖顺平¹, 庄钊文¹

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 洛阳市061信箱 516号, 河南洛阳 471003)

摘要: 本文以瞬态极化时频分析作为理论工具, 针对高分辨极化雷达体制, 提出了时频联合域极化滤波的概念; 然后应用文中介绍的瞬态极化短时 Fourier 变换(STFT), 提出了一种通过时频联合域积累的高分辨极化雷达信号检测算法, 仿真实验表明了该算法的可行性和有效性。

关键词: 极化; 高分辨; 信号检测; 瞬态极化 STFT; 时频联合域极化滤波

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2005) 03 0524 03

High Resolution Polarimetric Radar Signal Detection Based on Polarization Filtering in Time-Frequency Domain

ZENG Yong-hu^{1,2}, WANG Xue-song¹, XIAO Shun-ping¹, ZHUANG Zhao-wen¹

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

2 No. 516, P. O. Box 061, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: With the guidance of the theory of instantaneous polarization time-frequency analysis, the notion of polarization filtering in time-frequency domain is presented for high-resolution polarimetric radar system. Using instantaneous polarization STFT, a novel high-resolution polarimetric radar signal detection algorithm is designed through integration over time-frequency domain. Simulation results verify its feasibility and validity.

Key words: polarization; high resolution; signal detection; instantaneous polarization STFT; T-F polarization filtering

1 引言

在雷达信号检测问题中, 信号干噪比等功率性指标往往是决定检测性能优劣的核心因素, 当目标处于很强的噪声背景下时, 目标就会淹没于噪声当中而无法检测出来。极化滤波理论表明^[1-5], 通过合理调整电磁接收系统天线的极化方式, 可以在极化域内有效地滤除干扰、增强信号, 换言之, 极化滤波技术可以在接收系统信号处理前端提高信号干噪比等功率性指标, 从而改善系统的探测性能。高分辨雷达目标的散射机理非常复杂, 目标上的某些部件(如飞机的进气道、直升机的螺旋桨、坦克的炮管等)的散射是频率的强色散函数, 并且很可能在距离域上引起目标回波的展宽, 因而仅从单一的时域或频域往往难以细致地刻画目标的这种复杂的电磁散射特性。在时频分析所定义的时频联合域上, 目标的时域局部散射行为(如理想点散射中心)或频域局部散射行为(如谐振频率点)以及其它散射机理的作用(如爬行波或波导模式的多次反射等引起的色散现象)都能够同时显现出来, 它比单从时域或频域表示能够获得更为丰富的目标信息, 使高分辨雷达目标散射过程中的复杂电磁散射现象得到更为深入地刻画^[6]。本

文以瞬态极化时频分析理论^[7]作为工具, 针对高分辨极化雷达体制提出了时频联合域极化滤波的概念, 然后采用瞬态极化 STFT, 提出了一种通过时频联合域积累的高分辨极化雷达目标回波信号的检测算法, 仿真实验表明了该算法的可行性和有效性。

2 瞬态极化 STFT

短时傅里叶变换是研究非平稳信号最广泛使用的方法, 其中的概念是简单而有效的。给定一个时间宽度很短的窗函数 $h(t)$, 令窗滑动, 则信号 $z(t)$ 的短时 Fourier 变换(缩写为 STFT)定义为^[8]

$$\text{STFT}_z(t, f) = \int z(\tau) h^*(\tau - t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (1)$$

式(1)中积分的积分限均为 $(-\infty, +\infty)$, 若未加说明, 文中公式中积分的积分限均为 $(-\infty, +\infty)$ 。

对一个时变电磁波 $e(t) = [e_h(t) \quad e_v(t)]^T$, 定义其 STFT 为

$$P_{e, \text{STFT}}(t, f) = \int e(\tau) h^*(\tau - t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (2)$$

需要指出的是式(2)中 $P_{e, \text{STFT}}(t, f)$ 、 $e(\tau)$ 均为二维复矢量, 因此式(2)相当于对电磁波的两个正交分量信号分别作 STFT。

在瞬态极化理论体系^[3]中, 电磁波 $e(t)$ 的时域瞬态

Stokes 矢量定义为 $j(t) = R[e(t) \odot e^*(t)]$ (4)

其中 \odot 表示 Kronecker 积, 为准酉矩阵^[3]

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & j & -j & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对电磁波 $e(t)$ 作 STFT, 然后以构造时域瞬态 Stokes 矢量同样的方式构造时频联合域 Stokes 矢量, 即有

$$P_{j, \text{STFT}}(t, f) = R[P_{e, \text{STFT}}(t, f) \odot P_{e, \text{STFT}}^*(t, f)] \quad (5)$$

称 $P_{j, \text{STFT}}(t, f)$ 为瞬态极化 STFT, 显然 $P_{j, \text{STFT}}(t, f)$ 也是一个 Stokes 矢量.

把式(2)代入式(5)可得

$$P_{j, \text{STFT}}(t, f) = \iint (\tau_1, \tau_2) h^*(\tau_1 - t) h(\tau_2 - t) \cdot e^{-2j\varphi(\tau_1 - \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (6)$$

其中 $j(\tau_1, \tau_2) = R[e(\tau_1) \odot e^*(\tau_2)]$ 为电磁波 $e(t)$ 的时域互相干 Stokes 矢量^[3].

进一步地, 还可定义两个电磁波的瞬态极化互 STFT. 设有两个空间传播的平面电磁波 $e_a(t)$ 和 $e_b(t)$, 这两个电磁波的瞬态极化互 STFT 定义为:

$$P_{j_{ab}, \text{STFT}}(t, f) = R[P_{e_a, \text{STFT}}(t, f) \odot P_{e_b, \text{STFT}}^*(t, f)] \quad (7)$$

其中 $P_{e_a, \text{STFT}}(t, f)$ 和 $P_{e_b, \text{STFT}}(t, f)$ 由式(2)定义, 分别对应电磁波 $e_a(t)$ 和 $e_b(t)$.

按照式(2)分别计算得到 $P_{e_a, \text{STFT}}(t, f)$ 和 $P_{e_b, \text{STFT}}(t, f)$, 并将其代入式(7)可得

$$P_{j_{ab}, \text{STFT}}(t, f) = \iint (\tau_1, \tau_2) h^*(\tau_1 - t) h(\tau_2 - t) \cdot e^{-2j\varphi(\tau_1 - \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (8)$$

其中 $j_{ab}(\tau_1, \tau_2) = R[e_a(\tau_1) \odot e_b^*(\tau_2)]$ 为电磁波 $e_a(t)$ 和 $e_b(t)$ 的时域互相干 Stokes 矢量^[7].

若记 $e_{a+b}(t) = e_a(t) + e_b(t)$, 则根据定义容易证明 $P_{j_{a+b}, \text{STFT}}(t, f)$ 可表示为:

$$P_{j_{a+b}, \text{STFT}}(t, f) = P_{j_a, \text{STFT}}(t, f) + P_{j_b, \text{STFT}}(t, f) + P_{j_{ba}, \text{STFT}}(t, f) + P_{j_b, \text{STFT}}(t, f) \quad (9)$$

3 高分辨极化雷达信号的时频联合域极化滤波及检测

3.1 时频联合域极化滤波

一般而言, 如果窄带信号具有较高的极化度, 那么利用极化滤波技术可以较好地达到抑制干扰、增强信号的目的. 但是当雷达回波的合成极化度较低时, 直接采用传统的极化滤波技术所获得的信号干扰比的改善并不明显. 为此, 王雪松等人提出了“横向极化滤波”的概念^[4], 张国毅等人提出了频谱极化滤波器的概念^[5], 在时域或频域上对互不重叠的干扰分别进行滤波, 从而提高总的滤波效果. 前已述及, 高分辨雷达目标的散射机理非常复杂, 仅从单一的时域或频域往往难以细致地刻画目标这种复杂的电磁散射特性, 在时频联合域上则

可使之得到更为深入的刻画. 若采用瞬态极化时频分析方法^[7], 不仅可描述回波在时频域上的能量分布状况, 还可描述其在时频域上的极化状态分布状况, 因而对目标回波信息的开发和利用更加全面. 基于上述分析, 本文提出时频联合域极化滤波的概念, 其目的在于滤波时充分利用信号和杂波间在时频域以及极化域上的差异信息, 以进一步提高滤波效果.

设高分辨极化雷达目标回波的电场为 $e_s(t)$, 运用瞬态极化时频分析方法, 求得其瞬态极化时频分布为 $P_{j_s}(t, f)$, 相应地, 在接收系统设计一时频域极化滤波器, 滤波矢量为 $P_{j_h}(t, f)$, 则接收系统输出功率的时频分布为

$$P(t, f) = \frac{1}{2} P_{j_h}^T(t, f) U_4 P_{j_s}(t, f) \quad (10)$$

其中 $U_4 = \text{diag}\{1, 1, 1, -1\}$, U_4 的引入是因为采用了后向散射对准(BSA)约定的结果^[3]. 式(10)的离散形式为

$$P(m, n) = \frac{1}{2} P_{j_h}^T(m, n) U_4 P_{j_s}(m, n), \quad m = 1, \dots, M; n = 1, \dots, N \quad (11)$$

3.2 基于时频联合域极化滤波的雷达目标回波信号检测

由于通过高分辨雷达目标回波能够测量到多个强散射中心, 它们分布在不同的距离单元内, 为了降低目标检测时的虚警率, 一般采用多距离单元的联合检测. 常见的两种检测策略是 m/N 检测器^[9] 和距离域单元积累检测器^[10]. 本文针对高分辨极化雷达体制, 通过对目标回波进行时频联合域极化滤波, 在此基础上提出一种基于时频联合域积累的检测策略.

为简单起见, 假设目标为确定性目标, 且其高分辨雷达回波信号的瞬态极化特性已知, 杂波为服从正态分布的未极化波, 而测量噪声可忽略不计. 则高分辨极化雷达目标回波信号检测是一个如下式所描述的二元假设检验问题:

$$\begin{aligned} H_0: e_r(t) &= e_c(t) \\ H_1: e_r(t) &= e_s(t) + e_c(t) \end{aligned} \quad (12)$$

当在接收系统处采用时频联合域极化滤波技术时, 在离散情况下, 上述二元假设检验问题可以转化为

$$\begin{aligned} H_0: P(m, n) &= \frac{1}{2} P_{j_h}^T(m, n) U_4 P_{j_c}(m, n) \\ H_1: P(m, n) &= \frac{1}{2} P_{j_h}^T(m, n) U_4 P_{j_{s+c}}(m, n) \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $P_{j_h}(m, n)$ 为接收系统处的时频联合域滤波矢量. 在本文检测问题的假设条件下, 最优滤波矢量由目标回波的瞬态极化时频分布确定, 使得接收滤波器在整个时频联合域上与目标回波极化匹配, 从而使目标回波接收功率最大. 设无杂波时目标回波的瞬态极化时频分布为 $P_{j_s}(m, n)$, 在后向散射对准约定下, 最优滤波矢量为 $P_{j_h}(m, n) = U_4 P_{j_s}(m, n)$; $P_{j_s}(m, n)$ 为无目标时的回波信号的瞬态极化时频分布, $P_{j_{s+c}}(m, n)$ 为杂波背景下目标回波的信号瞬态极化时频分布, 若采用瞬态极化 STFT 作为瞬态极化时频分析的工具, 由式(9)可知

$$P_{j_{s+c}}(m, n) = P_{j_s}(m, n) + P_{j_{sc}}(m, n) + P_{j_{cs}}(m, n) + P_{j_c}(m, n) \quad (14)$$

在对目标回波信号进行时频联合域极化滤波后, 再以输

出的时频联合域积累作为检测统计量, 记为 η , 其表达式为:

$$\eta = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N P(m, n) \quad (15)$$

记 η 的条件概率密度分别为 $f(\eta|H_0)$ 、 $f(\eta|H_1)$, 则似然

$$\text{比检测判决关系式为} \quad \eta \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \gamma \quad (16)$$

$$\text{此时虚警概率为} \quad P_{fa} = \int_{\gamma}^{\infty} f(\eta|H_0) \quad (17)$$

4 实验结果和结语

仿真实验中选用隐身飞机 F117A 的缩比模型作为目标, 其姿态为: 俯仰角 θ^e 、横滚角 θ^r 、方位角 θ^a ; 雷达入射波为水平极化, 接收系统天线水平、垂直极化同时接收; 信号的径向分辨力为 15cm, 目标长度约为 2.3m. 图 1 给出了应用本文提出的检测算法对高分辨极化雷达目标回波进行检测时的检测概率与输入信号信杂比之间的性能关系曲线, 其中的虚警率水平为 10^{-4} . 图 1 中还给出了直接作距离域积累的检测方法以及对回波信号进行横向极化滤波后再作距离域积累的检测方法的检测性能. 其中应用直接作距离域积累的检测方法时, 把两个正交极化通道的接收信号求模后相加再作距离域积累.

从图 1 中可以看出, 采用极化滤波技术后的检测器在检测性能上有明显的改善. 而且, 针对高分辨雷达目标部分散射中心在散射过程中的强色散现象, 通过对目标回波信号在时频联合域上极化滤波后再进行检测,

其检测性能较之于采用横向极化滤波后再进行检测的方法有进一步的提高. 这也初步表明, 针对宽带全极化雷达体制, 运用瞬态极化时频分析方法, 在时频联合域上刻画和分析目标及杂波散射场的极化信息, 对于提高雷达系统的探测性能具有很大的潜力.

参考文献:

- [1] Poelman A J, Guy J R F. Multinotch logic product polarization suppression filters: Atypical design example and its performance in a rain clutter environment[J]. Proc IEE pt F, 1984, 131(4): 383- 396.

- [2] Stapor D P. Optimal receive antenna polarization in the presence of interference and noise[J]. IEEE Trans, 1995, AP-43(5): 473- 477.
- [3] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究[D]. 长沙: 国防科技大学电子科学与工程学院, 1999.
- [4] 王雪松, 徐振海, 李永祯, 等. 高分辨雷达信号极化检测研究[J]. 电子学报, 2000, 28(12): 15- 18.
- [5] 张国毅, 刘永坦. 高频地波雷达多干扰的极化抑制[J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1206- 1209.
- [6] August W R, Stephen J H. Radar Resolution and Complex Image Analysis[M]. Boston: Artech House, 1996.
- [7] 曾勇虎. 极化雷达时频分析与目标识别的研究[D]. 长沙: 国防科技大学电子科学与工程学院, 2004.
- [8] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [9] Hughes II, P K. A high resolution radar detection strategy[J]. IEEE Trans, 1983, AES-19(5): 663- 667.
- [10] 何松华, 郭桂蓉, 郭修煌. FMCW 毫米波雷达高分辨率目标距离像及其处理[J]. 系统工程与电子技术, 1991, 10: 33- 38.

作者简介:



曾勇虎 男, 1972 年 12 月生于江西龙南, 分别于 1997 年、2004 年获国防科技大学工学硕士、博士学位, 现为电子装备试验中心博士后, 已在国内外期刊及会议上发表论文 20 余篇, 主要研究方向为综合电子战技术、雷达极化信息处理、电子系统仿真试验与评估等. E-mail: zengyonghu@sina.com



王雪松 男, 1972 年 10 月生于内蒙古包头, 1994 年毕业于国防科技大学电子技术系, 1999 年 6 月获国防科技大学工学博士学位, 博士学位论文被评为教育部 2001 年度“全国百篇优秀博士学位论文”, 现为国防科技大学教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 合作出版专著 2 部, 在国际、国内期刊及学术会议上发表论文 100 余篇, 其中 30 多篇进入 SCI、EI 等国际著名检索, 主要研究方向为雷达极化信息处理、信号处理与目标识别、导弹攻防对抗等. E-mail: wxs1019@sina.com