

基于正交投影的海面小目标检测技术

杨勇* 肖顺平 冯德军 张文明
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 强烈的海杂波将海面低速运动小目标的回波信号淹没, 导致雷达难以检测到目标。针对这一问题, 该文提出了基于正交投影的恒虚警率(CFAR)检测方法。该方法利用邻近距离单元杂波的相关性, 通过正交投影方法实现对杂波的抑制, 进而实现 CFAR 检测。同时, 该文给出了基于正交投影的 CFAR 检测器实现结构图, 对比分析了正交投影方法与奇异值分解方法的杂波抑制效果和计算量。理论分析与实测数据处理结果验证了该文所提方法的优越性。

关键词: 目标检测; 杂波; 正交投影; 奇异值分解; 恒虚警率

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0024-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00758

Detection of Small Target on the Sea Surface Using Orthogonal Projection

Yang Yong Xiao Shun-ping Feng De-jun Zhang Wen-ming

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

Abstract: Fierce sea clutter submerges the slow weak target echo which makes the target detection difficult. To address the problem, a Constant False Alarm Rate (CFAR) detection method based on orthogonal projection is proposed in this paper. Utilizing the correlation of the clutter between neighbored range cells, this method suppresses clutter by orthogonal projection at first, and then carries out the CFAR detection. The structure chart of the CFAR detector using orthogonal projection is given. And the performance of clutter suppression and computation amount for orthogonal projection method and singular value decomposition method are compared. Theoretical analysis and simulation results with the experimental data show the superiority of the proposed method.

Key words: Target detection; Clutter; Orthogonal projection; Singular Value Decomposition (SVD); Constant False Alarm Rate (CFAR)

1 引言

海面低速小目标检测一直是雷达界研究的热难点问题。目标信号在时域和频域均被杂波覆盖, 导致雷达难以检测目标。如何提高信杂比, 是雷达检测海面低速运动小目标的关键。

通过波形设计、增加相干处理时间均能够增强目标信号、在一定程度上提高信杂比^[1-3]。同时, 根据杂波分布特性设计最佳或准最佳检测器, 也能达到提高信杂比的目的, 但信杂比改善程度有限^[4,5]。在强杂波环境下, 通过抑制杂波来提高信杂比, 是实现低速小目标检测较为有效的技术手段, 从而备受关注^[6-13]。其中, 文献[6,7]采用子空间检测方法

实现了强杂波环境下的目标检测; 基于子空间思想, 文献[8]中提出了奇异值分解杂波抑制方法; 文献[9]结合实测数据, 分别分析了信号平均、时频分析及形态滤波 3 种方法的杂波抑制效果; 文献[10]提出采用递归非线性滤波方法实现对杂波的预测, 进而抑制杂波。此外, 自适应带阻滤波器、分数阶傅里叶变换、阵列自适应加权等方法也不断被提出用于杂波抑制和目标检测^[11-13]。上述方法中, 信号平均法实现最简单, 但其杂波抑制能力有限; 奇异值分解法具有较好的杂波抑制性能, 工程实现相对简单, 且可与常规恒虚警率(CFAR)检测器串联使用; 其他方法虽然均具有较好的杂波抑制能力和目标检测性能, 但在工程实现过程中, 需对现有雷达的 CFAR 检测器做较大改动, 实现较复杂。

本文将正交投影与 CFAR 检测相结合, 提出了基于正交投影的 CFAR 检测方法, 该方法通过正交投影对各距离单元进行杂波抑制, 进而实现 CFAR

2012-06-15 收到, 2012-09-13 改回

国家自然科学基金(61072119), 湖南省研究生科研创新项目(CX2011B021)和国防科技大学优秀研究生创新项目(B110406)资助课题

*通信作者: 杨勇 youngfvc@163.com

检测。同时, 本文给出了基于正交投影的 CFAR 检测器结构框图, 并从杂波抑制效果和计算量两方面, 将正交投影方法与文献[8]中的奇异值分解方法进行了对比。实测数据处理结果证明了该方法的有效性和高效性。

文章结构如下: 第2节研究了基于奇异值分解的杂波抑制算法; 第3节提出了基于正交投影的 CFAR 检测方法; 第4节对奇异值分解和正交投影两种杂波抑制方法进行了对比; 第5节采用实测数据对所提方法的检测性能进行了验证; 第6节总结了全文。

2 基于奇异值分解的杂波抑制方法

雷达待检测距离单元的多次观测信号可表示为

$$\mathbf{x} = [x(1) \ x(2) \ \cdots \ x(N)]^T \quad (1)$$

其中 N 为观测次数。根据待检测距离单元内有、无目标, 雷达接收信号可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{H}_0: \mathbf{x} &= \mathbf{c} + \mathbf{n} \\ \mathbf{H}_1: \mathbf{x} &= \mathbf{s} + \mathbf{c} + \mathbf{n} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 \mathbf{H}_0 表示无目标情况下, \mathbf{H}_1 表示存在目标情况下, $\mathbf{s} = [s(1) \ \cdots \ s(N)]^T$, $\mathbf{c} = [c(1) \ \cdots \ c(N)]^T$, $\mathbf{n} = [n(1) \ \cdots \ n(N)]^T$ 分别为 N 次观测下的目标、杂波以及热噪声信号向量。

假定雷达 CFAR 检测采用的距离参考单元数为 $2L$, 第 i 个距离参考单元的 N 次观测信号向量为 $\mathbf{x}_i = [x_i(1) \ x_i(2) \ \cdots \ x_i(N)]^T$, 将 $2L$ 个距离参考单元的 N 次观测数据组成一矩阵:

$$\mathbf{X}_r = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \cdots \ \mathbf{x}_{2L}] \quad (3)$$

则 \mathbf{X}_r 为一 $N \times 2L$ 的矩阵。根据距离参考单元多次观测杂波数据可估计得到待检测距离单元的杂波协方差为^[8]

$$\mathbf{R} = \frac{\sum_{i=1}^{2L} |\eta_i|^\gamma \mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H}{\sum_{i=1}^{2L} |\eta_i|^\gamma} \quad (4)$$

其中 γ 是一取值范围为[1,2]的常数,

$$\eta_i = \frac{\mathbf{x}_i^H \mathbf{x}}{\|\mathbf{x}_i\| \|\mathbf{x}\|} \quad (5)$$

为待检测距离单元观测信号向量与第 i 个距离参考单元观测信号向量的相关系数, $\|\cdot\|$ 为复赋范空间的 2 范数。容易证明, \mathbf{R} 为 Hermite 矩阵。

由于 Hermite 矩阵的奇异值分解与特征值分解一致, 对 \mathbf{R} 进行奇异值分解, 得

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^H = \sum_{i=1}^M \beta_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H + \sum_{i=M+1}^N \beta_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \quad (6)$$

其中 β_i , $i = 1, \dots, N$ 为 \mathbf{R} 的奇异值, \mathbf{u}_i , $i = 1, \dots, N$ 为各奇异值对应的奇异向量, $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_N]$, $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}[\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N]$, M 为 \mathbf{R} 的较大奇异值个数。由式(6)可以看到, 杂波的绝大部分能量分布在由较大奇异值对应的奇异向量所构成的子空间中。假定取前 K 个较大奇异值, $K \leq M$, 则由此 K 个较大奇异值对应的奇异向量所张成的子空间被认为是杂波子空间, 剩余 $N - K$ 个较小奇异值对应的奇异向量张成的子空间被认为是噪声子空间。很明显, 杂波子空间与噪声子空间相互正交。待检测距离单元的杂波信号可估计为^[8]

$$\hat{\mathbf{c}} = \sum_{i=1}^K \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \mathbf{x} \quad (7)$$

待检测单元经杂波对消后的剩余信号为

$$\tilde{\mathbf{x}} = \left(\mathbf{I} - \sum_{i=1}^K \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \right) \mathbf{x} \quad (8)$$

其中 \mathbf{I} 为 $N \times N$ 的单位矩阵。当 $K = M$ 时, $\hat{\mathbf{c}}$ 的估计精度最高, 杂波剩余量最小; 当 $K < M$ 时, K 越小, $\hat{\mathbf{c}}$ 的估计误差越大, 杂波剩余量越多。

3 基于正交投影的 CFAR 检测技术

实测数据表明: 海面邻近距离单元的回波之间、同一距离分辨单元回波的多次观测值之间均具有较强的相关性^[14,15]。根据这种相关性, 我们可认为待检测距离单元的杂波信号可由邻近距离参考单元的观测数据近似为

$$\hat{\mathbf{c}} = \sum_{i=1}^{2L} \alpha_i \mathbf{x}_i \quad (9)$$

其中 α_i 为加权因子。式(9)等效为 $\hat{\mathbf{c}} \in \text{span}\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{2L}\}$, 即待检测单元杂波属于列向量组 $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{2L}\}$ 构成的子空间。

从向量和投影的角度看, 为了使杂波估计误差最小, 估计杂波向量 $\hat{\mathbf{c}}$ 应为 \mathbf{x} 在子空间 $\text{span}\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{2L}\}$ 上的投影。设投影算子为 \mathbf{P}_x , 则

$$\hat{\mathbf{c}} = \sum_{i=1}^{2L} \alpha_i \mathbf{x}_i = \mathbf{P}_x \mathbf{x} \quad (10)$$

根据投影定理, 有

$$\langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x} - \mathbf{P}_x \mathbf{x} \rangle = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 2L \quad (11)$$

由式(11)可计算得

$$\mathbf{P}_x \mathbf{x} = \mathbf{X}_r (\mathbf{X}_r^H \mathbf{X}_r)^{-1} \mathbf{X}_r^H \mathbf{x} \quad (12)$$

则待检测单元经杂波对消后的剩余信号为

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{P}_x \mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}_x) \mathbf{x} = \mathbf{P}_x^\perp \mathbf{x} \quad (13)$$

其中 $\mathbf{P}_x^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{P}_x$ 为 \mathbf{x} 到与 \mathbf{X}_r 正交的子空间的正交投影矩阵。

由式(12), 式(13)可见, 正交投影方法直接利用

距离参考单元的观测数据来抑制待检测单元杂波。为此,我们很自然地想到将正交投影与 CFAR 检测串联使用,从而提高强杂波环境下的目标检测性能。图 1 给出了基于正交投影的 CA-CFAR(Cell-Averaging CFAR)检测器结构框图,图中 T 为门限因子。

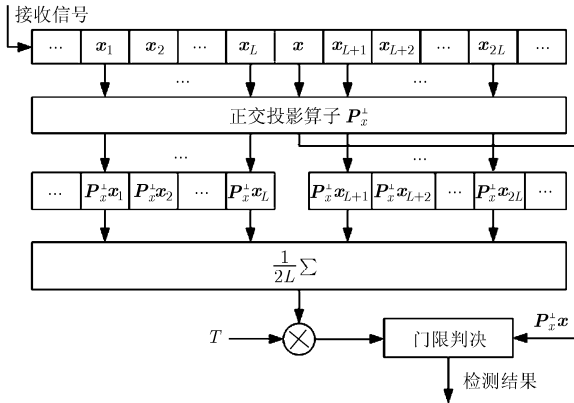


图 1 基于正交投影的 CA-CFAR 检测器结构图

从图 1 可以看出,该检测器的实现无需改变现有雷达 CFAR 检测器框架,只需在距离参考单元求平均前增加一步正交投影处理,简单易实现。

4 性能对比分析

由第 2, 第 3 节可知,基于奇异值分解的杂波抑制方法通过距离参考单元观测数据获得杂波能量主要分布的子空间,然后利用构成子空间的一组正交基实现待检测距离单元杂波重构;基于正交投影的杂波抑制方法利用邻近距离单元杂波的相关性,通过对距离参考单元观测数据进行加权,估计得到待检测距离单元杂波。虽然两种方法利用的观测数据相同,但两种方法的实现过程不同,最终会导致两种方法在杂波抑制效果和计算量方法具有一定差异。下面我们来具体分析其差异性。

由于两种方法采用同样的观测数据,于是有

$$\text{span}\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_N\} = \text{span}\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{2L}\} \quad (14)$$

假定热噪声相对于杂波可忽略,当式(7)中的 $K = M$ 时,

$$\text{span}\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K\} = \text{span}\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{2L}\} \quad (15)$$

此时,在估计待检测单元杂波信号时,奇异值分解法与正交投影法利用的杂波信息量相同,两种方法的估计精度相同。接着我们来比较两种方法的计算量。两种方法的绝大部分计算量都集中在复数乘法运算中,且奇异值分解法计算量主要集中在奇异值分解上,正交投影法主要集中在矩阵求逆上。虽然对于同一 P 阶方阵,奇异值分解和矩阵求逆的计算

量均为 $O(P^3)$,但由式(4)和式(11)我们可以看到,对 \mathbf{R} 进行奇异值分解的计算量为 $O(N^3)$,而对 $\mathbf{X}_r^H \mathbf{X}_r$ 进行求逆的计算量为 $O(8L^3)$ 。实际中,距离参考单元数往往小于观测次数^[8],即 $2L < N$,因此,奇异值分解法的计算量大于正交分解法的计算量。

当 $K < M$ 时,

$$\text{span}\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K\} \subset \text{span}\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{2L}\} \quad (16)$$

正交投影法利用的杂波信息量较奇异值分解法更充分,在估计待检测单元杂波时,奇异值分解法较正交投影法具有更大的估计误差,二者估计误差相差

$$\Delta \hat{\mathbf{c}} = \sum_{i=K+1}^M \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \mathbf{x} \quad (17)$$

在计算量方面,两种方法的计算量分别与 $K = M$ 时的相同。

5 实验验证

本节采用加拿大 McMaster 大学 IPIX 雷达测得的海杂波数据,对基于奇异值分解和基于正交投影的 CFAR 检测性能进行仿真分析。IPIX 雷达主要参数如表 1 所示^[16]。

表 1 IPIX 雷达参数

工作频率	9.39 GHz
脉冲重复频率	1 kHz
脉冲宽度	200 ns
采样率	10 MHz
雷达高度	30 m
天线最大增益	45.7 dB
半功率波束宽度	0.9°

雷达工作在凝视模式,采用垂直极化发射,垂直极化接收。雷达对距离为 2574~2769 m 的海面持续观测 131.072 s,海面平均浪高为 2.1 m,观测得到的海杂波数据存储于 131072×14 的数组中(行代表观测时间,列代表观测距离),经预处理后的海杂波强度如图 2 所示(预处理方法详见文献[16]),图中杂波强度单位为 dBW。

我们从观测数据中选取第 1025~1280 行杂波数据,构成 256×14 的杂波数组,并在该数组的第 8 列上叠加仿真的目标信号,平均信杂比为 -10 dB,目标多普勒频率为 200 Hz。采用正交投影方法对该组数据进行处理,得到杂波抑制效果图如图 3 所示。

从图 3(a)可以看出,当待检测单元无目标时,正交投影法能够较好地抑制杂波,杂波平均强度衰减约 18 dB,剩余杂波平均幅度为 -20 dB。当待检

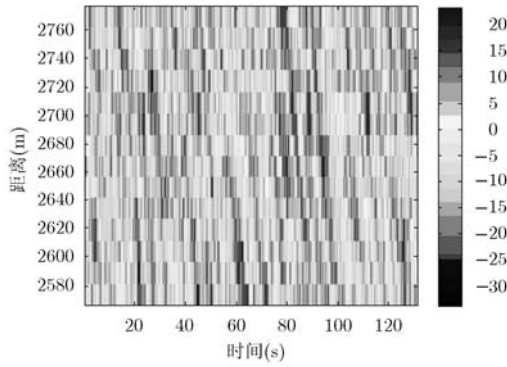


图 2 IPIX 雷达实测海杂波数据

测距离单元存在目标时，由于目标信号与邻近距离单元杂波不相关，在待检测单元杂波被抑制的同时，目标信号能够得以保留，如图 3(b)所示。对比图 3(a), 3(b)可以发现，经投影算法后，信杂比得到明显提高，这将有利于后续的 CFAR 检测。

图 4 给出了基于正交投影 CFAR 检测性能(OP)、基于奇异值分解的 CFAR 检测性能(SVD)以及常规 CFAR 检测性能。仿真过程中，我们选取图 2 中数据的第 1025~1124 行进行仿真实验，通过调整门限因子，以保证虚警概率为 10^{-2} 恒定，同时，我们取第 2~7 列和第 9~14 列作为 CFAR 检测的距离参考单元。

图 4 说明，基于正交投影或奇异值分解的 CFAR

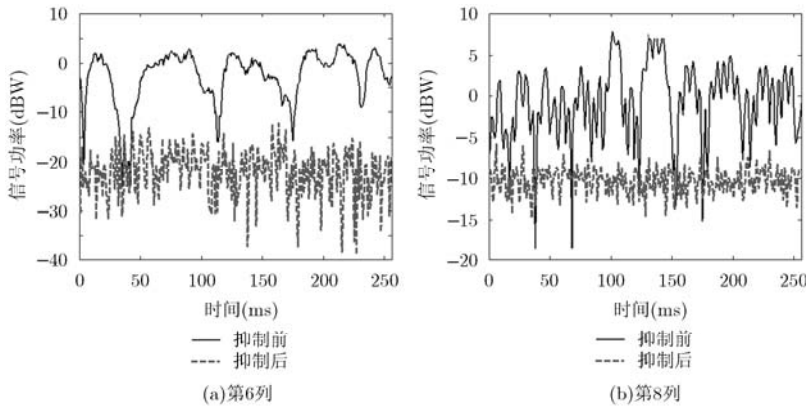


图 3 杂波抑制前后不同距离单元的信号强度

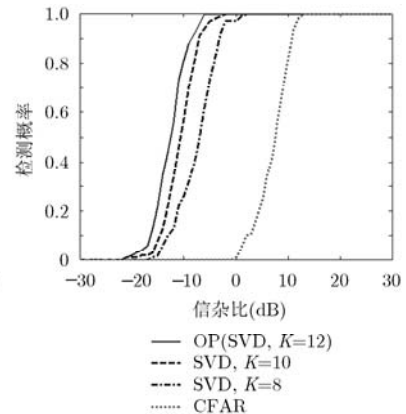


图 4 不同方法下雷达检测性能对比图

参 考 文 献

[1] Sen S, Tang G G, and Nehorai A. Multiobjective optimization of OFDM radar waveform for target detection[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 639-652.

[2] Sira P S, Cochran D, and Papandreou-Sappappda A. Adaptive waveform design for improved detection of low-RCS targets in heavy sea clutter[J]. *IEEE Journal of*

检测性能明显优于常规 CFAR 检测性能；在信杂比为 -10 dB 情况下，采用基于正交投影的 CFAR 检测方法，雷达能够以约 0.9 的概率检测到目标。当 $K = M$ 时，基于正交投影和基于奇异值分解的 CFAR 检测性能相同，而随着 K 值的减小，基于奇异值分解的 CFAR 检测性能逐渐下降，这与第 4 节的分析结论一致。仿真过程中，我们对正交投影法和奇异值分解法进行杂波抑制的运行时间进行了统计，仿真所使用的计算机的 CPU 为 Pentium(R) Dual-Core，内存为 2 G。Matlab 仿真时长显示：采用正交投影方法，对所选观测数据进行杂波抑制的时间为 0.016 s，而采用奇异值分解方法，对所选观测数据进行杂波抑制的时间为 4.469 s，可见，正交投影方法的实时性明显优于奇异值分解方法。

6 结 束 语

本文以雷达检测海面低速小目标为背景，提出了基于正交投影的 CFAR 检测方法。该方法利用邻近距离单元杂波的相关性，首先采用正交投影方法实现杂波抑制，然后对杂波抑制后的各距离单元进行 CFAR 检测。该方法较好的将正交投影与 CFAR 检测结合在一起，在工程上简单易实现，且具有较好的检测性能。实测数据处理结果表明，该方法的检测性能与基于奇异值分解的 CFAR 检测最佳检测性能相同，但该方法实时性明显优于基于奇异值分解的 CFAR 检测方法，具有较大的实际应用前景。

Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(1): 56-66.

[3] McDonald M and Lycett S. Fast versus slow scan radar operation for coherent small target detection in sea clutter[J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(6): 429-435.

[4] Sangston K J, Gini F, and Greco M S. Coherent radar target detection in heavy-tailed compound-Gaussian clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*,

- 2012, 48(1): 64-77.
- [5] Maio D A, Alfano G, and Conte E. Polarization diversity detection in compound-Gaussian clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(1): 114-131.
- [6] Liu J, Zhang Z J, and Yang Y. Performance enhancement of subspace detection with a diversely polarized antenna[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, 19(1): 4-7.
- [7] Gini F, Farina A, and Montanari M. Vector subspace detection in compound-Gaussian clutter part II: performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(4): 1312-1323.
- [8] Wang G, Xia X G, Root B T, *et al.* Manoeuvring target detection in over-the-horizon radar using adaptive clutter rejection and adaptive chirplet transform[J]. *IEEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 292-298.
- [9] Panagopoulos S and Soraghan J J. Small-target detection in sea clutter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1355-1361.
- [10] Leung H and Young A. Small target detection in clutter using recursive nonlinear prediction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 713-718.
- [11] He Q, Lehmann N H, and Blum R S. Adaptive fractional fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(5): 389-401.
- [12] Alabaster C M and Hughes E J. Examination of the effect of array weighting function on radar target detectability[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1364-1375.
- [13] Shi Y L and Shui P L. Target detection in high-resolution sea clutter via block-adaptive clutter suppression[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(1): 48-57.
- [14] Farina A, Gini F, Greco V M, *et al.* High resolution sea clutter data: statistical analysis of recorded live data[J]. *IEEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation*, 1997, 144(3): 121-130.
- [15] Carretero-Moya J, Gismero-Menoyo J, Blanco-del-Campo A, *et al.* Statistical analysis of a high-resolution sea-clutter database[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2024-2037.
- [16] Rembrandt B and Brian C. The McMaster IPIX radar sea clutter database[OL]. <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix/dartmouth/datasets.html>. 2001.
- 杨 勇: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为复杂背景下雷达目标检测技术.
- 肖顺平: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达极化信息处理、电子信息系统仿真评估技术.
- 冯德军: 男, 1972 年生, 副研究员, 研究方向为雷达目标识别与综合电子战.
- 张文明: 男, 1972 年生, 副教授, 研究方向为空间信息获取与处理技术.