

基于波动分析的海上小目标检测

孙康^{*①} 金钢^{②③} 朱晓华^①

^①(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

^②(中国空气动力研究与发展中心 绵阳 621000)

^③(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

摘要: 该文通过建立不同尺度下的平均波动,分析了海杂波的自仿射性质,提出一种基于波动分析的海上小弱目标检测方案。根据波动曲线的线性特征,以 q 阶归一化波动曲线斜率作为区分目标和海杂波的分形特征值。对实测数据的试验结果表明,该文方法对不同环境、不同极化情况下获取的实测数据能够从海杂波背景下可靠地检测出目标。

关键词: 目标检测; 分形; 海杂波; 自仿射; 波动分析

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)04-0882-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00927

Small Target Detection within Sea Clutter Based on the Fluctuation Analysis

Sun Kang^① Jin Gang^{②③} Zhu Xiao-hua^①

^①(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

^②(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

^③(School of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Based on the fluctuation analysis, a novel approach for target detection in sea clutter is proposed. The self-affinity and scaling behaviors of sea clutter is analyzed by using the mean fluctuation. The q order normalized slope of fluctuation curve, as the characteristic parameter, is suggested to describe the fractal property of the target and sea clutter. The tests on the real data show that the target could be clearly distinguished from the sea clutter background with the proposed approach.

Key words: Target detection; Fractal; Sea clutter; Self-affine; Fluctuation analysis

1 引言

雷达对海面或贴近海面的目标进行探测时,发射信号受到海平面的起伏变化而发生散射现象,其中后向散射到雷达接收机的回波(海杂波)通常会带有类似目标的特征,导致其难以与真实目标相区分,严重影响雷达对海面目标的探测性能。对海杂波本质属性的研究一直是雷达技术领域的一个热点问题。在传统理论中,海杂波被视为一种平稳的随机过程,出现了如经典的 Log-Normal 分布、Weibull 分布、复合高斯分布和复合 K 分布等统计分布模型。尽管这类模型可以描述某些特定情况下的海杂波,但在实际应用中却存在很大的局限性。随着分形的概念被引入到海杂波建模中,为描述海杂波内在特

征提供了新的理论和思路。近年来,关于海面目标探测的分形应用理论研究取得了一定的进展^[1-4]。

分形的一个典型特征是自仿射性。文献[5]利用自仿射映射理论与线性自回归过程提出了一种针对分形信号的预测方案,并将其应用到海杂波分析处理中,取得了良好的效果。在随机过程、时间序列分析和混沌理论中,波动分析是用来确定信号统计自仿射性质的常用手段。Hu Jing 等人^[6,7]发现目标数据和海杂波数据经过波动分析方法的变换,往往会出现饱和现象,即 Hurst 指数趋近于 1,不利于目标与杂波特征的区分,此时将原始数据直接当作“随机游走”过程处理,可得到更有利的结果。

本文尝试将波动分析方法用于对海杂波的标准差强度数据进行处理,研究分析海杂波的自仿射性质,结果同样出现了文献[6,7]中提到的饱和现象,得到的 Hurst 指数在有无目标的情况下都非常接近

于 1, 单纯使用 Hurst 指数无法对有无目标进行判断, 即使将其作为“随机游走”过程处理, 也不能保证稳健地区分目标与海杂波。通过进一步分析发现, 出现饱和现象时, 尽管有无目标单元的 Hurst 指数均接近为 1, 但波动特征曲线在时间轴上呈近似线性关系, 即 $F \sim m$, 而且, 有无目标表现在其线性度即 $F \sim m$ 曲线斜率存在较明显的差别。因此, 可将其作为一个特征检测参量, 刻画海杂波分形的自仿射性质, 用以区分目标单元和海杂波单元。

2 基于自仿射性的波动分析方法

2.1 自仿射性

自仿射是分形理论的基础, 通常指被考察事物的局部在各个不同方向上放大不同的倍数后, 其形态与事物的整体形态相同或相似。

在时间序列分析中, 设 $x(t)$ 是一个时间序列, 对于任意的尺度因子 a , 如果 $x(t)$ 存在如下的尺度关系:

$$x(t) \rightarrow a^H x(at) \quad (1)$$

则 $x(t)$ 被描述是自仿射的。 H 称为 Hurst 指数, 用来刻画自仿射性质^[8]。另一方面, 从频率角度来看, 如果时间序列的功率谱密度在频率分量上存在幂次方的关系, 则称这个时间序列是自仿射的^[9]。

自仿射数据的尺度特性可以用均方位移(也称均方波动)来描述。波动分析方法就是通过研究均方位移的尺度性质来确定反映自仿射性质的 Hurst 指数值^[8]。

对于具有自仿射性质的时间序列, 容易得到如下推论: 若 $x(t)$ 是一个自仿射时间序列, 对于任意的尺度因子 $a > 0$, 有 $x(t) \rightarrow a^H x(at)$, 令 $z(t) = |x(t) - \bar{x}|$, 其中 \bar{x} 是 $x(t)$ 的均值, 则 $z(t)$ 也是一个自仿射时间序列。

2.2 波动分析

标准波动分析源于随机游走理论, 它刻画了时间序列的二阶统计性质, 即相关性^[6-8,10]。作为一般性考虑, 本文采用带漂移项的随机游走模型, 设有时间序列 $x = \{x(i), i = 1, 2, \dots, M\}$ 。

首先, 计算该序列的部分和

$$y(n) = \sum_{i=1}^n x(i) \quad (2)$$

产生一个新序列 $y = \{y(n), n = 1, 2, \dots, M\}$ 。 y 称为 x 的“随机游走”过程。

然后, 求得平均波动 $F(m)$,

$$F(m) = \sqrt{\langle |y(n+m) - y(n)|^2 \rangle} \quad (3)$$

其中, $\langle \cdot \rangle$ 表示集平均。若序列 x 具有自仿射性, 则有

$$F(m) \sim m^\alpha \quad (4)$$

α 是波动指数。对于单一分形时间序列, 波动指数 α 等同于 Hurst 指数 H 。

3 海杂波的自仿射尺度特性

本文使用的海杂波数据是加拿大 McMaster 大学于 1993 年利用 IPIX 高分辨率雷达实地测量获得的数据^[11], 共有 14×4 组, 即在 14 个不同时间不同环境下分别使用 4 种发射/接受极化形式测量得到。每组测量包含 14 个不同距离单元的数据, 每个距离单元数据有 2^{17} 个样本点。在 14 个距离单元中包含 1 个主要目标单元, 以及毗邻主要目标单元的 2~3 个包含部分目标信息的次要目标单元, 其余为无目标的海杂波单元, 目标信杂比在 0~6 dB 之间。

3.1 目标信号与海杂波的波动曲线特征对比

图 1 给出了某一组测量中主要目标单元的回波信号和两个无目标单元的海杂波信号, 可以看到目标单元的回波信号幅度起伏变化比海杂波单元明显要大。设 $u(n), n = 1, 2, \dots$ 为信号幅度原始数据, 定义信号标准差强度数据为

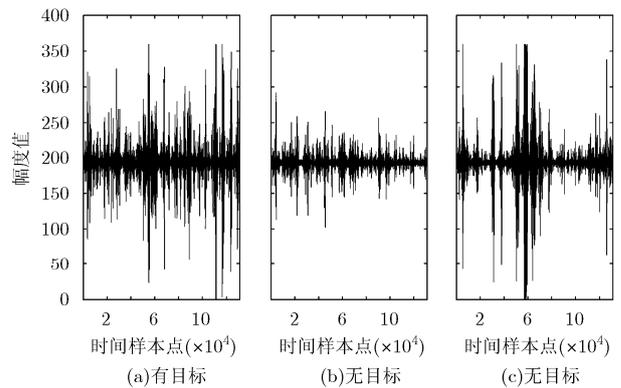


图 1 主要目标单元回波信号与无目标单元海杂波信号比较

$$w(n) = |u(n) - \bar{u}|, \quad n = 1, 2, \dots \quad (5)$$

$w(n)$ 反映信号幅度起伏变化的程度。

采用 Yule-Walker AR 模型方法对标准差强度数据进行功率谱估计, 图 2 给出了一组测量中目标单元和海杂波(无目标)单元的标准差强度数据的功率谱密度曲线。可以看出其在频率轴上近似存在幂次方的关系, 由 2.1 节, 标准差强度数据具有自仿射性。

将波动分析方法应用于标准差强度数据。表 1 所列其中 3 组测量的 14 个距离单元对应的 Hurst 指数, 可以看到, 其值大都接近为 1, 差别甚微, 因此难以用于区分目标与海杂波。

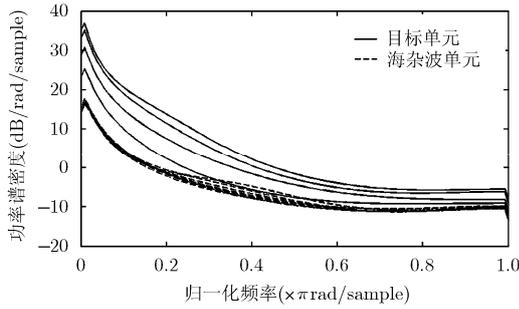


图2 一组标准差强度数据的功率谱密度曲线

表1 部分测量中14个距离单元对应的Hurst指数值

距离单元	测量1	测量2	测量3
01	0.9498	0.9350	0.9700
02	0.9667	0.9408	0.9715
03	0.9474	0.9391	0.9718
04	0.9386	0.9509	0.9678
05	0.9532	0.9619	0.9682
06	0.9508	0.9504	0.9680
07	0.9540	0.9388	0.9591
08	0.8919	0.9384	0.9681
09	0.8919	0.9456	0.9728
10	0.8906	0.9334	0.9713
11	0.9227	0.9357	0.9739
12	0.9582	0.9404	0.9741
13	0.9592	0.9445	0.9754
14	0.9445	0.9318	0.9752

若将标准差强度数据看作“随机游走”过程，通过波动分析可得到部分测量数据的Hurst指数如图3所示。可见，尽管不存在饱和现象，海杂波单元和目标单元的Hurst指数存在差别，目标检测能

力可得到改善(图3(a))，但其中部分海杂波单元与目标单元的Hurst指数值相差不大(图3(b))，甚至某些海杂波单元的Hurst指数值还高于目标单元的Hurst指数值(图3(c))。因此，即使将标准差强度数据作为“随机游走”过程，仍不能稳健地区分出目标单元和海杂波单元。

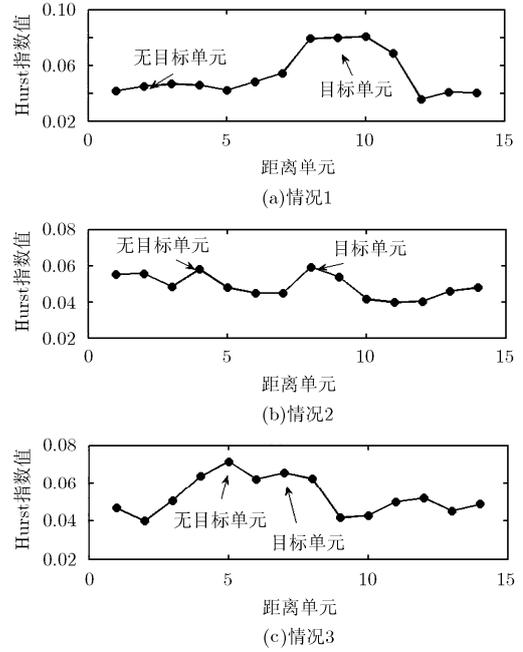


图3 部分测量数据作为“随机游走”过程的波动分析结果

显然，单纯由Hurst指数在有些情况下难以有效区分目标单元和海杂波单元。考察 $F(m)$ 与 m 二者之间的关系，因Hurst参数近似为1，可以认为二者具有线性关系，即 $F(m) \sim Am$ ，图4给出具有代表性的其中两组测量的结果。

图4显示，海杂波(无目标)单元的波动曲线斜

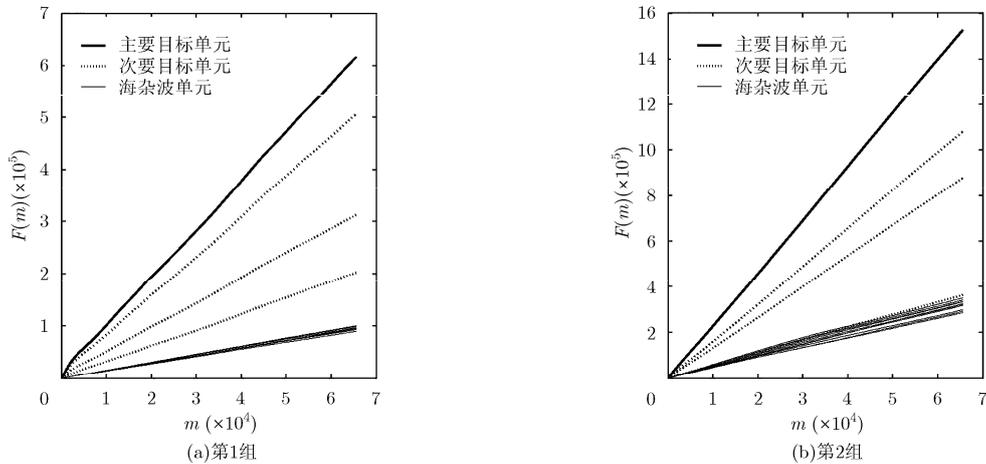


图4 两组不同测量数据各距离单元的波动特征曲线

率相对比较集中在某一值附近, 目标单元信号波动曲线的斜率则更大, 二者有很明显的差别。究其原因, 通常海洋表面在多种物理机制的共同作用下, 起伏不定呈现出某种分形特征, 其回波具有较强的自仿射性。而当海面存在目标时, 目标的物理特性与海面的起伏变化不一致, 海面的分形特性受到破坏, 其回波信号的自仿射性质也就在一定程度上被削弱或改变。图5是同一次测量在4种发射/接收极化形式下的波动特征曲线。在4种极化形式下, 目标和海杂波的波动特征曲线均存在上述差别。

图6(a)和图6(b)分别是高海况和低海况下的海杂波幅度数据(VV极化), 高海况下的海杂波幅度变化要比低海况下的海杂波幅度变化大, 因此, 高海况下海杂波的曲线斜率要比低海况下海杂波的曲线斜率稍大一些(图7)。但与图5中对应的波动特征曲线相比, 即使高海况下的斜率也明显小于目标单元的波动特征曲线斜率。

3.2 基于归一化波动曲线斜率特征参数的目标检测

显然, 波动曲线斜率的上述差异, 可用来区分目标单元与海杂波单元。

对于标准差强度数据, 由 $F(m) \sim Am$, 可以拟合得到不同距离单元的波动曲线斜率:

$$A = F(m)/m \quad (6)$$

考虑将每组数据 $N = 14$ 个距离单元的波动曲线斜率数据整合成为一个空间数据向量 $\mathbf{A} = [A(1), A(2), \dots, A(N)]$, 定义 q 阶归一化波动曲线斜率:

$$A'(i) = \left(\frac{A(i)}{A_{\text{mean}}} \right)^q, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中, $A_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(i)$ 。 q 的取值与回波信号的信

噪比有一定的关系, 信噪比越低, 需设置 q 值越大, 以凸显目标与海杂波之间的差别, 一般情况下, q 值可取 1~3。

图8给出了一组典型测量数据各距离单元的归一化波动曲线斜率($q=2$), 在有目标的距离单元处, 各种极化状态下, 对应的 A' 都有一个明显的峰值。因此, 在特征参数空间 A' , 设定一个合适的门限, 即可有效区分出目标单元与海杂波单元。采用这种方法对其它各组数据进行处理, 均可获得与图8相似的特征参数曲线分布, 在目标单元处凸现一峰值。图9是各种海况下测量数据的归一化波动曲线斜率的统计分布(HH极化)。从图中可以看出, 海杂波单元的特征参数值分布比较集中, 与目标单元的特征参数值不存在重叠, 因此, 可以采用最大类间方差法对目标和海杂波单元进行有效分割。

将本文方法与 DFA(Detrended Fluctuation Analysis)算法检测性能进行比对。每个距离单元的数据均分成部分重叠的 17 段, 相邻段之间重叠 1/5, 每段有 2^{15} 个采样点。采用工作特性曲线(ROC)下的面积 AUC(Area Under the ROC Curve)能够较好地刻画检测算法的整体性能, 是一种常用的评估指标^[12,13]。AUC 值越高, 反映其检测性能越好。表2比较了两种算法的 AUC 值。由表可见, 在 VV 极化下, 本文方法表现出了较优的性能。

4 结论

本文用波动分析方法研究海杂波的自仿射特性。仿真分析表明, 对海杂波标准差强度数据用波动分析方法进行处理将出现所谓饱和现象, Hurst 指数趋于 1; 即使将其作为“随机走动”过程处理,

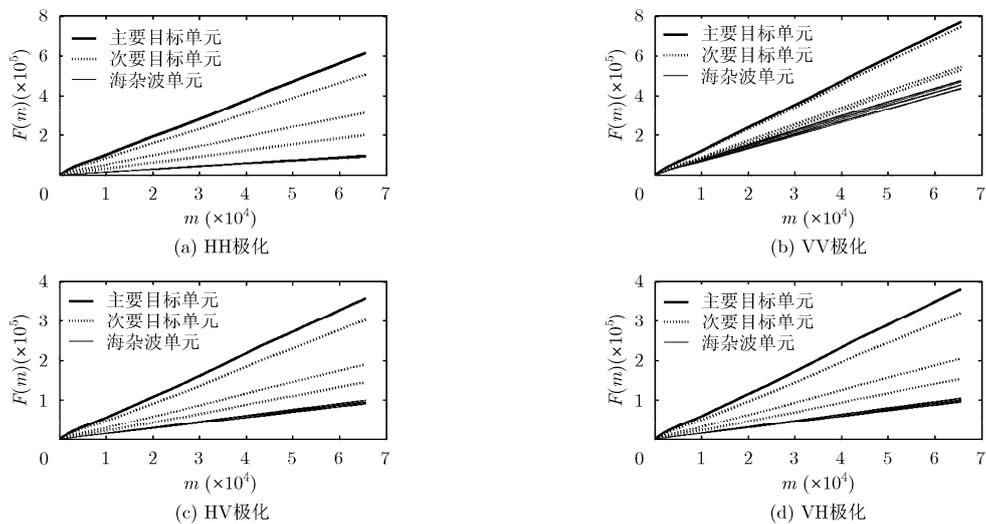


图5 不同发射/接收极化形式下各距离单元的波动特征曲线

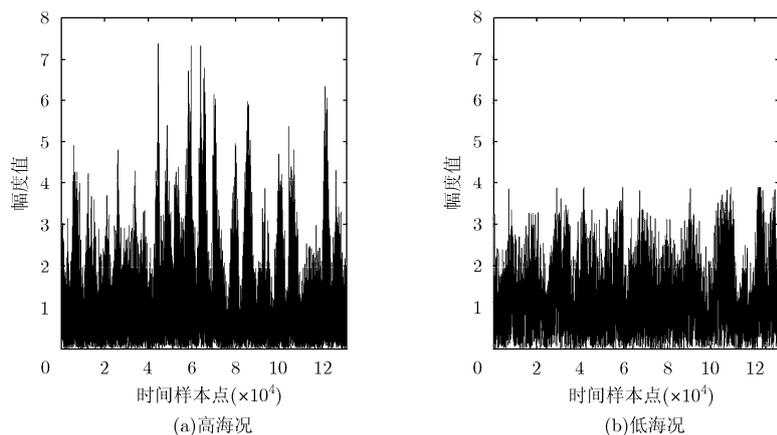


图6 两种海况下的海杂波幅度数据(VV 极化)

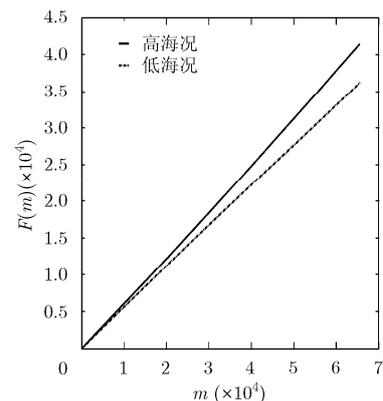


图7 两种海况下的海杂波数据的波动特征曲线

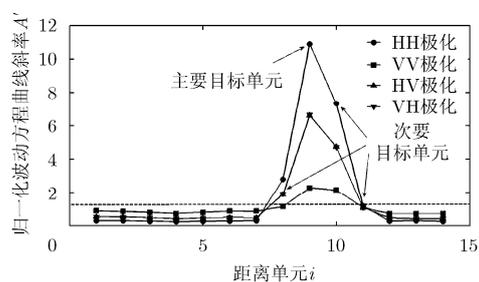


图8 一组测量的14个距离单元的特征参数曲线

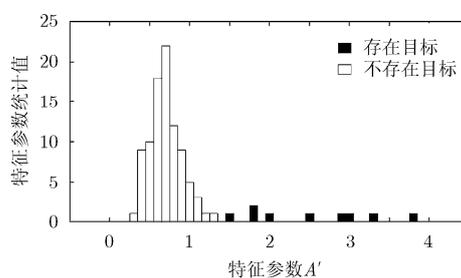


图9 IPIX 测量数据的归一化波动曲线斜率值的统计分布(HH 极化)

表2 部分测量中14个距离单元对应的Hurst指数值

	DFA	本文方法
HH	0.993	0.996
VV	0.905	0.995
HV	0.986	0.998
VH	0.984	0.998

也不能可靠地将目标从海杂波背景下分离出来。本文分析了“饱和”情况下标准差幅度数据的波动曲线特征,构建了 $F \sim m$ 线性关系模型,提出了以 q 阶归一化波动曲线斜率作为一种描述海杂波自仿射性的特征参数,用于海杂波背景下的目标检测。对于不同极化、不同环境下目标信杂比 0~6 dB 的实测海杂波数据的试验结果表明,在此特征参数空间,目标单元相对海杂波单元会有一个明显的峰值,可有效检测出海杂波背景下的小弱目标。

参考文献

- [1] 陈小龙, 刘宁波, 宋杰, 等. 海杂波 FRFT 域分形特征判别及动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 823-830. Chen Xiao-long, Liu Ning-bo, Song Jie, et al. Fractal feature discriminant of sea clutter in FRFT domain and moving target detection algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(4): 823-830.
- [2] 刘宁波, 黄勇, 关键, 等. 实测海杂波频域分形特性分析[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 929-935. Liu Ning-bo, Huang Yong, Guan Jian, et al. Fractal analysis of real sea clutter in frequency domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 929-935.
- [3] Pournejatian N M and Nayebi M M. Fractal-multiresolution based detection of targets within sea clutter[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(6): 345-347.
- [4] Xu Zhan, Wan Jian-wei, Li Gang, et al. Target detection within sea clutter based on multifractal detrended fluctuation analysis[J]. *Advanced Engineering Forum*, 2012, 4: 259-262.
- [5] Zhou Yi-feng, Yip P C, and Leung H. On the efficient prediction of fractal signals[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(7): 1865-1868.
- [6] Hu Jing, Gao Jian-bo, Posner F L, et al. Target detection within sea clutter: a comparative study by fractal scaling analyses[J]. *Fractals*, 2006, 14(3): 187-204.
- [7] Hu Jing, Tung Wen-wen, and Gao Jian-bo. Detection of low observable targets within sea clutter by structure function based multifractal analysis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(1): 136-143.
- [8] Meyers R A. Encyclopedia of Complexity and Systems Science[M]. New York: SpringerScience+BusinessMedia, LLC., 2009: 3754-3778.
- [9] Malamud B D and Turcotte D L. Self-affine time series: measures of weak and strong persistence[J]. *Journal of*

- Statistical Planning and Inference*, 1999, 80(1, 2): 173-196.
- [10] Peng C K, Buldyrev S V, Goldberger A L, *et al.* Long-range correlation in nucleotide sequences[J]. *Nature*, 1992, 356(6365): 168-170.
- [11] The McMaster IPIX radar sea clutter database[OL]. <http://soma.crl.mcmaster.ca/ipix/>. 2011.3.
- [12] 陈志杰, 冯德军, 王雪松. 基于 ROC 曲线的弹道目标识别评估及优化[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(17): 4028-4032.
Chen Zhi-jie, Feng De-jun, and Wang Xue-song. Assessment & optimization of ballistic target recognition based on ROC curves[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(17): 4028-4032.
- [13] 汪云云, 陈松灿. 基于 AUC 的分类器评价和设计综述[J]. 模式识别与人工智能, 2011, 24(1): 64-71.
Wang Yun-yun and Chen Song-can. A survey of evaluation and design for AUC based classifier[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2011, 24(1): 64-71.
- 孙 康: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、雷达海上目标探测.
- 金 钢: 男, 1958 年生, 研究员, 研究方向为信息与信号处理、光学工程.
- 朱晓华: 男, 1966 年生, 教授, 研究方向为雷达系统理论与技术、雷达信号理论与应用、高速实时数字信号处理等.