

基于局部 Hilbert 谱平均带宽的微弱目标检测算法

张 建^{*①②} 关 键^① 董云龙^③ 何 友^①

^①(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)

^②(海军航空工程学院新装备培训中心 烟台 264001)

^③(海军航空工程学院科研部 烟台 264001)

摘 要: 该文采用实测海杂波数据分析了目标出现频段内海杂波局部 Hilbert 谱的脊线及其平均带宽,研究了目标和天线极化方式对海杂波局部 Hilbert 谱脊线及其平均带宽的影响。研究发现,目标的出现将导致目标所处频段的海杂波局部 Hilbert 谱脊线起伏趋于和缓,局部 Hilbert 谱平均带宽减小,在此基础上,借鉴恒虚警检测技术提出了一种新的微弱目标检测算法。该算法先采用目标所处频段的局部 Hilbert 谱脊线计算平均带宽,以提取目标与海杂波差异,然后将平均带宽作为检测统计量,实现对海杂波中的微弱目标进行检测。与基于海杂波盒维数的方法和单元平均恒虚警(CA-CFAR, 100 个脉冲)方法相比,该方法有效提高了对海杂波中微弱目标的检测性能。

关键词: 目标检测; 海杂波; Hilbert-Huang 变换; 平均带宽

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0121-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00091

Weak Target Detection Based on the Average Bandwidth of the Partial Hilbert Spectrum

Zhang Jian^{①②} Guan Jian^① Dong Yun-long^③ He You^①

^①(Department of Electronic and Information Engineering,

Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

^②(New Equipment Training Center, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

^③(Department of Scientific Research, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In the paper, the partial Hilbert spectrum near the frequency of the target ridge and average bandwidth of the real sea clutter data is analyzed, and the influence of the target and polarization on the ridge and the average bandwidth of the partial Hilbert spectrum are discussed. As shown of the result, the appearance of the target will smooth its ridge and decrease its average bandwidth, on the base of the result, a novel method is proposed to detect the weak target in the sea clutter, where the average bandwidth is calculated by the partial Hilbert spectrum near the frequency of the target ridge to extract the difference of the target and the sea clutter, then it is used as the detection statistic to detect the weak target in the sea clutter. Compared with the target detection method directly using the box dimension and the Cell Average-Constant False Alarm Rate (CA-CFAR, 100 pulses), the proposed method improves the detection performance of the weak target in the sea clutter distinctly.

Key words: Target detection; Sea clutter; Hilbert-Huang Transformation (HHT); Average bandwidth

1 引言

为解决海杂波中微弱目标检测这一难题,人们进行了孜孜不倦地研究,但至今也未能很好地解决该问题。在传统的目标检测算法中,都是从统计理论的角度研究海杂波^[1-4],将其视为一随机过程,故提取的有用信息有限,不能很好地检测海杂波中的微弱目标。因此,人们又求助于现代信号处理理

论的一些方法。如将混沌^[5,6]、分形^[7,8]和变换域^[9,10]理论引入海杂波中的微弱目标检测领域,虽然取得了一定的检测效果,但是检测结果却并不十分理想。

Hilbert-Huang 变换(Hilbert-Huang Transformation, HHT)是由黄锬等人^[11]于1998年提出的时频分析方法,它能将复杂信号分解成若干个具有不同频率的固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),得到由信号瞬时频率和瞬时幅值构成的完整时频谱,非常适合分析非线性和非平稳数据,已广泛地应用到许多领域^[12,13],并取得了良好的研究效果。鉴于 HHT 在其他领域取得的良好

2011-01-27 收到, 2011-09-27 改回

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0912)和国家自然科学基金(60672140, 60802088)资助课题

*通信作者: 张建 zhangjian_study@163.com

效果,一些专家和学者也已开始采用 HHT 方法分析雷达目标和海杂波信号^[14,15],对 HHT 在雷达目标检测和参数估计方面中的应用也进行了初步探讨^[16],并取得了一定的研究成果。目前的研究表明,HHT 方法非常适合分析非高斯的高分辨率海杂波数据,具备提高雷达对微弱目标检测性能的潜力。

为提高雷达对海杂波中微弱目标的检测能力,本文从分析海杂波 HHT 域特性入手,研究目标与海杂波在 HHT 域的差异。通过分析发现,目标的出现将导致其所处频段内的海杂波局部 Hilbert 谱脊线起伏趋于和缓,局部 Hilbert 谱平均带宽减小。在此基础上,本文采用目标所处频段内的局部 Hilbert 谱平均带宽作为区分目标与海杂波的统计量,提出了一种基于局部 Hilbert 谱平均带宽的微弱目标检测算法,其检测性能要优于仅基于盒维数方法和多脉冲单元平均恒虚报警(CA-CFAR,100个脉冲)方法的检测性能。

2 HHT

HHT 的核心思想^[11]是通过经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法,将信号分解成若干个 IMF,然后对各个 IMF 进行 Hilbert 变换构造解析信号,进而得到其瞬时角频率和振幅,最后得到完整的 Hilbert 谱。

IMF 是满足单分量信号解释的一类信号,应满足两个要求:一是在所分解的信号长度内,极值点数目和过零点数目应相等或最多相差一个;二是在任意时刻,上包络线和下包络线的均值为零,即上包络线与下包络线相对时间轴局部对称,其中,上包络线由局部极大值点构成,下包络线由局部极小值点构成。

当信号 $x(t)$ 不满足 IMF 的两个要求,应利用 EMD 对其进行分解^[11]。经过 EMD 方法分解后信号 $x(t)$ 可以表示成一系列的 IMF $c_i(t)$, $i=1,2,\dots,n$ 与一个余项 $r_n(t)$ 的和。

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

对式(1)中的各个 $c_i(t)$ 进行 Hilbert 变换,可得其解析信号,然后分别计算其幅值函数 $a_i(t)$ 和相位函数 $\phi_i(t)$,进而可得到其瞬时频率

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \omega_i(t) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\phi_i(t)}{dt} \quad (2)$$

和 Hilbert 谱

$$H(t, f) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int 2\pi f_i(t) dt} \right\} \quad (3)$$

式中 $\text{Re}\{\}$ 为求信号实部。

3 海杂波数据简介

在分析海杂波在 HHT 域的特点时,本文以 X 波段 IPIX 雷达的 280#数据(数据 1,含 VV 和 HH 极化两部分),311#数据(数据 2,VV 极化)和我国的某部 ISAR 雷达数据(数据 3,VV 极化)为例进行分析。

在两组 IPIX 雷达数据中,某些距离单元含有目标,其中,受目标影响最大的单元称为主目标单元,主目标单元旁边,受目标影响较弱的单元称为次目标单元。该两组数据的主目标与次目标单元序号如表 1 所示,该目标为低 SCR 的固定目标。IPIX 雷达及其采集数据的详细参数见加拿大的 McMaster 大学主页^[17]。

表 1 数据 1 和数据 2 的主目标单元与次目标单元序号

编号	文件名	主目标单元	次目标单元
280#	19931118_023604_stareC0000.cdf	8	7:10
311#	19931118_162658_stareC0000.cdf	7	6:9

ISAR 雷达为我国某所研制的实验雷达,分辨率为 3.75 m,其数据中不含目标,为纯海杂波数据。

4 海杂波局部 Hilbert 谱脊线分析

将脊线的概念引入 HHT,定义局部 Hilbert 谱脊线为:在时间方向上,在 $[f_1, f_2]$ 频率范围内,使 Hilbert 谱幅值最大的频率所连成的曲线。其计算公式为

$$R_p(n) = \arg_f \max \{H(n, f)\} \quad (4)$$

式中 $H(n, f)$ 为信号的 Hilbert 谱的离散形式, n 为正整数,表示时间, f 为频率, $f_2 \geq f \geq f_1$, $\max\{\}$ 表示取最大值, \arg_f 表示 $H(n, f) = \max\{H(n, f)\}$ 时对应的 f 值,故 $R_p(n)$ 的单位为 Hz。局部 Hilbert 谱脊线反映了在时间点 n 上,哪个频率点上会出现局部 Hilbert 谱峰值。如对于余弦信号 $x(n) = \cos(2\pi fn)$, f 为常数,表示频率, $n \leq N$, 表示时间,其在 $[0, f]$ Hz 频率范围内的局部 Hilbert 谱脊线是一条斜率为 0 的直线,即 $R_p(n) = f$, 单位为 Hz; 对于线性调频信号 $x(n) = \cos(\pi Kn^2)$, K 为常数,表示调频斜率,其在 $[0, Kn]$ Hz 频率范围内的局部 Hilbert 谱脊线是一条斜率为 K 的直线 $R_p(n) = Kn$, 单位为 Hz。

下面将分析在目标可能出现频率附近的海杂波实部局部 Hilbert 谱脊线的特点及目标对局部 Hilbert 谱脊线的影响。在分析海杂波局部 Hilbert 谱脊线的特点时,采用的海杂波数据为数据 1 (VV 极化)。

对数据 1 中的前 10000 个数据实部进行 EMD 处理, 得到若干个 IMF, 并由 IMF 计算得到其 Hilbert 谱 $H(n, f)$, 然后由式(4), 就可以得到海杂波实部的局部 Hilbert 谱脊线。在计算局部 Hilbert 谱脊线时, 频率范围取为 $[0, 50]$ Hz(根据对大量海杂波数据的分析, 我们发现该范围为固定慢起伏目标对海杂波影响的主要频率范围)。图 1 给出了 VV 极化部分纯海杂波实部的局部 Hilbert 谱幅值最大值及其脊线, 图 2 给出了 VV 极化部分目标+海杂波实部的局部 Hilbert 谱幅值最大值及其脊线。

从图 1 和图 2 中可以看出:

(1)在 VV 极化方式下, 由于受海面的海浪波动及其海风等影响, 纯海杂波实部局部 Hilbert 谱幅值最大值起伏剧烈。当目标出现时, 海杂波实部局部 Hilbert 谱最大值起伏将趋于和缓。

(2)在 VV 极化方式下, 纯海杂波实部局部 Hilbert 谱脊线起伏剧烈, 局部 Hilbert 谱幅值最大值出现的频率在 $0\sim 50$ Hz 之间较为分散; 当目标出现时, 海杂波实部的局部 Hilbert 谱脊线起伏将趋于和缓, 局部 Hilbert 谱最大值出现的频率将趋于稳定, 主要集中在 $0\sim 30$ Hz 之间。

5 海杂波局部 Hilbert 谱平均带宽分析

对比 $0\sim 50$ Hz 范围内的纯海杂波实部局部

Hilbert 谱脊线和目标+海杂波实部局部 Hilbert 谱脊线的图形可以直观的发现, 当目标出现时, 局部 Hilbert 谱最大值出现的频率趋于稳定, 变化较慢, 在该频段内能量更为集中。为定量的描述海杂波能量的集中程度, 定义局部 Hilbert 谱的平均带宽 W_A , 并分析极化方式和目标对海杂波局部 Hilbert 谱平均带宽的影响等。

局部 Hilbert 谱的平均带宽 W_A (单位: Hz^2)可以由下式计算:

$$W_A = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N W(n) \quad (5)$$

式中 $n=0,1,2,\dots,N$, 表示时间, N 为最大时间长度, $W(n)$ 为瞬时带宽, 单位为 Hz^2 , 且

$$W(n) = \sum_f [f - R_p(n)]^2 \frac{|H(n, f)|}{\sum_f |H(n, f)|} \quad (6)$$

式中 $H(n, f)$ 为海杂波的 Hilbert 谱, $f_2 \geq f \geq f_1$, $R_p(n)$ 为局部 Hilbert 谱脊线; $f - R_p(n)$ 表示时间点 n 上, 各频率点与脊线之间的频率跨度; $\frac{|H(n, f)|}{\sum_f |H(n, f)|}$

表示时间点 n 上, 频率点 f 处的 Hilbert 谱幅值占 $[f_1, f_2]$ 频率范围内的 Hilbert 谱幅值和的比例。从式(5)和式(6)中可以看出, 局部 Hilbert 谱平均带宽能够

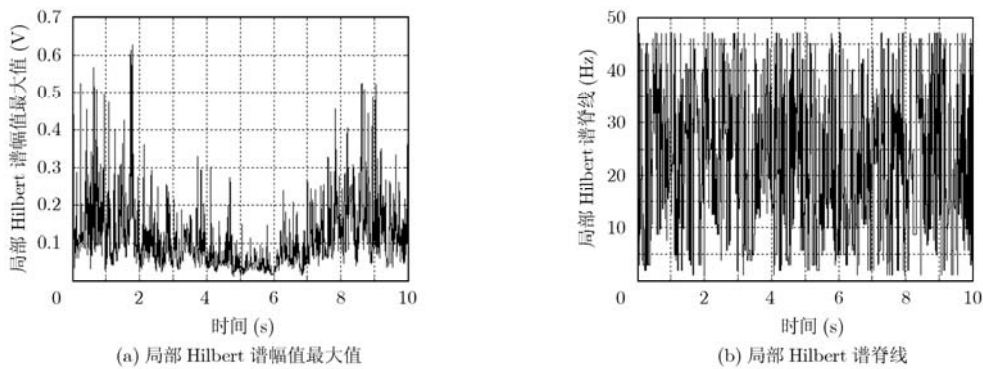


图 1 数据 1(VV 极化)纯海杂波实部局部 Hilbert 谱幅值最大值及其脊线

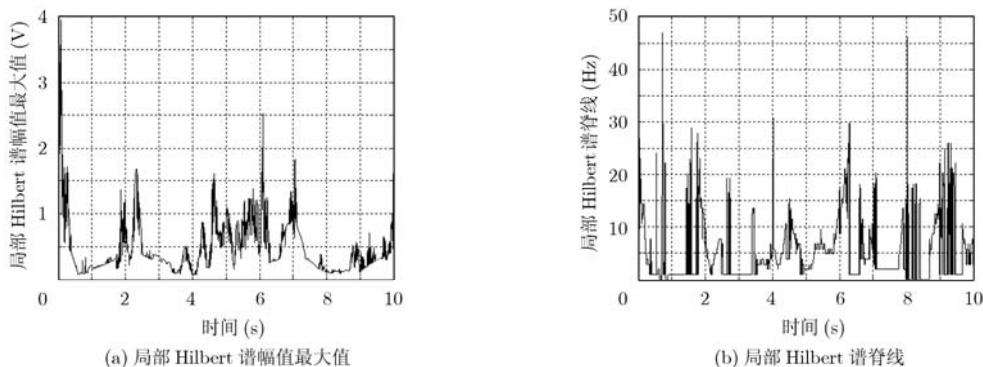


图 2 数据 1(VV 极化)目标+海杂波实部局部 Hilbert 谱幅值最大值及其脊线

反映局部 Hilbert 谱能量的集中程度,如果海杂波局部 Hilbert 谱的能量在脊线 $R_p(n)$ 附近较为集中(即靠近脊线 $R_p(n)$ 处的 Hilbert 谱幅值较大,而远离 $R_p(n)$ 处的 Hilbert 谱幅值较小),则平均带宽较小,反之,则平均带宽较大。

图3和图4分别给出了数据1(VV极化)和数据2(VV极化)中490段(每段包含3072个数据点)数据的0~50 Hz范围内的海杂波实部局部 Hilbert 谱平均带宽及其均值。

从图3和图4中可以看出:

(1)在数据1中,10个纯海杂波单元(No.1~No.6, No.11~No.14)的局部 Hilbert 谱平均带宽均值的平均值为 3.6×10^6 (Hz^2);在数据2中,10个纯海杂波单元(No.1~No.5, No.10~No.14)的局部 Hilbert 谱的平均带宽均值的平均值为 2.5×10^6 (Hz^2),小于数据1中的纯海杂波局部 Hilbert 谱平均带宽均值的平均值,而局部 Hilbert 谱平均带宽能够反映局部 Hilbert 谱能量的集中程度,根据局部 Hilbert 谱平均带宽的性质,平均带宽越大,能量分布越均匀,因此我们可知,与数据2相比,数据1的能量在0~50 Hz范围内 Hilbert 谱上的分布相对较为均匀。在同一组数据中,各距离单元的纯海杂波局部 Hilbert 谱的平均带宽均值虽存在一定的差

异,但各距离单元纯海杂波的均值都大于 2×10^6 (Hz^2)。

(2)当海杂波中出现目标时,不管是主目标单元还是次目标单元,海杂波局部 Hilbert 谱的平均带宽都将减小,即目标的出现将减小海杂波局部 Hilbert 谱的平均带宽,反映出目标的出现将增加目标出现区域内的局部 Hilbert 谱能量的集中程度。

6 微弱目标检测新方法及其性能分析

从上面的分析可知,当目标出现时,在其出现频段内的海杂波能量的集中程度将产生明显的变化,且该范围内的局部 Hilbert 谱平均带宽可以描述这一变化,这就为检测海杂波中的微弱目标提供了一种新的思路,即采用目标可能出现频段内的海杂波实部局部 Hilbert 谱平均带宽来检测目标,在这里称之为基于局部 Hilbert 谱平均带宽的微弱目标检测算法。该算法的原理框图如图5所示。

从图5中可知,该算法通过 EMD 对海杂波实部数据进行分解得到 IMF,并由 IMF 计算得到 Hilbert 谱,然后提取目标所处频段(对于固定慢起伏目标,可取为0~50 Hz)的局部 Hilbert 谱的脊线并计算平均带宽,得到检验统计量,最后将局部 Hilbert 谱平均带宽与一门限比较,就可以得到判决结果。由于目标的存在会使海杂波局部 Hilbert 谱平

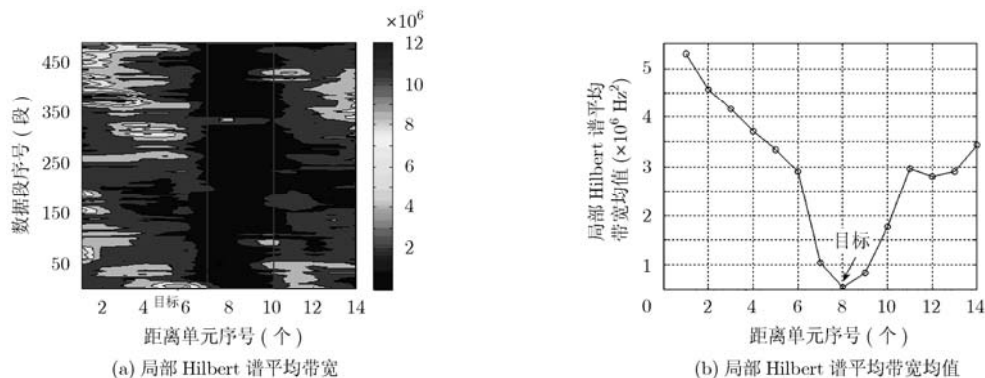


图3 数据1(VV极化)海杂波实部局部 Hilbert 谱平均带宽及其均值

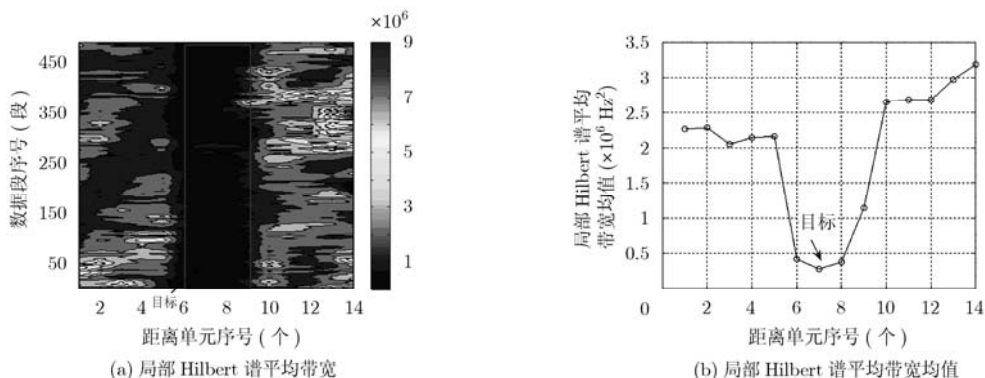


图4 数据2(VV极化)海杂波实部局部 Hilbert 谱平均带宽及其均值

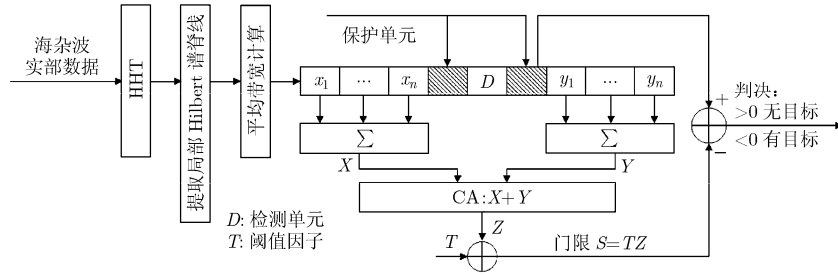


图5 基于局部 Hilbert 谱平均带宽的检测算法原理框图

均带宽减小，因此，如局部 Hilbert 谱平均带宽小于门限判为有目标，大于门限则判为无目标。门限的获得可采用类似于 CA-CFAR 的方法，即将检测单元两侧参考单元的局部 Hilbert 谱平均带宽取平均，然后再乘一阈值因子，就可得到门限。

下面将分析基于局部 Hilbert 谱平均带宽微弱目标检测算法的检测性能以及极化方式对检测性能的影响等。

(1)基于局部 Hilbert 谱平均带宽算法的检测性能分析 因为我们仅知道数据 1(VV 极化)和数据 2(VV 极化)为低信杂比数据，不知其信杂比的具体数值，所以无法给出在具体信杂比下的检测概率。因此，为进一步检验该检测方法的有效性，本文比较了该方法与另一种基于盒维数的微弱目标检测方法的检测性能，其检测性能曲线($P_d \sim P_{fa}$)如图 6 和图 7 所示。检测概率 P_d 和虚警概率 P_{fa} 采用 Monte Carlo 仿真方法统计，分别由式(7)和式(8)计算。

$$P_d = \frac{\text{Num}_{T_s}}{\text{Num}_{T_a}} \quad (7)$$

$$P_{fa} = \frac{\text{Num}_{S_s}}{\text{Num}_{S_a}} \quad (8)$$

式中 Num_{T_s} 为采用含目标海杂波数据(主目标单元)计算的局部 Hilbert 谱平均带宽小于门限的次数， Num_{T_a} 为采用含目标海杂波数据(主目标单元)计算局部 Hilbert 谱平均带宽的次数； Num_{S_s} 为采用纯海杂波数据计算的局部 Hilbert 谱平均带宽小于门限的次数， Num_{S_a} 为采用纯海杂波数据计算局部 Hilbert 谱平均带宽的次数。门限因子可以根据虚警概率进行调整，从而获得在某虚警概率下的检测概率。

从图 6 和图 7 中可以看出：

(1)对于该两组数据，基于局部 Hilbert 谱平均带宽算法的检测性能都优于基于海杂波实部盒维数的检测性能。

(2)该两种微弱目标检测算法对数据 2 的检测性能都优于对数据 1 的检测性能。对于数据 2，基于局部 Hilbert 谱平均带宽方法的检测概率能够达到

95%以上($P_{fa}=2\%$)。

由于很难得到足够的变信杂比实验数据，因此为进一步分析该方法的检测性能，本文采用了 Monte Carlo 仿真的方法，仿真次数为 10000 次。在仿真中，海杂波数据为实测海杂波数据(数据 3, VV 极化)，目标通过控制 SCR 仿真产生，该目标为 Swerling I 型目标，该目标在 100 个脉冲内具有相同的幅值 A ，且 A 是瑞利分布的随机变量。

表 2 给出了 $P_{fa}=1\%$ 时，基于局部 Hilbert 谱平均带宽算法、基于海杂波实部盒维数算法和多脉冲 CA-CFAR(100 个脉冲)算法^[18]3 种方法的检测概率。

表 2 $P_{fa}=1\%$ 时 3 种方法的检测概率(%)

检测方法	SCR(dB)			
	-15	-10	-5	0
基于局部 Hilbert 谱平均带宽算法	31	95	100	100
基于海杂波实部盒维数算法	2	4	19	72
多脉冲 CA-CFAR (100 个脉冲)算法	-	19	57	82

从表 2 中可以看出：

(1)在 $0 \text{ dB} > \text{SCR} > -10 \text{ dB}$ 时，基于局部 Hilbert 谱平均带宽算法的检测性能较好，对微弱目标的检测能力较强，而其它两种方法的检测概率都较低，对目标信号的检测能力较弱。

(2)当 $\text{SCR}=-5 \text{ dB}$ 时，基于局部 Hilbert 谱平均带宽算法的检测概率已经能够达到 100%，对目标的检测性能较好，优于其他两种方法的检测性能；而基于海杂波实部盒维数算法虽然是一种针对微弱目标的检测算法，但其对该类目标的检测概率较低，只能达到 19%，其检测性能甚至弱于多脉冲 CA-CFAR(100 个脉冲)算法的检测性能。

图 8 给出了 $\text{SCR}=-15 \text{ dB}$ 时，基于局部 Hilbert 谱平均带宽算法对数据 3 的检测性能。从图 8 中可以看出，当 $P_{fa}=10\%$ 时，检测概率能够达到 90%以上，也具备一定的检测性能。而仅基于盒维数算法

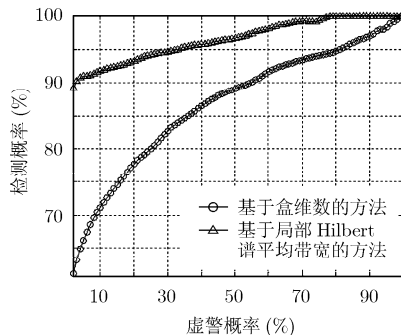


图6 对数据1(VV极化)的检测性能

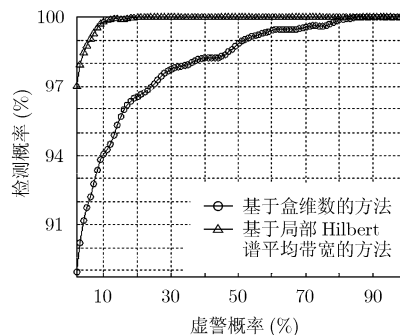


图7 对数据2(VV极化)的检测性能

的检测概率和虚警概率曲线近似为直线, 对该目标并不具备检测能力。

从以上的分析可以看出, 基于局部 Hilbert 谱平均带宽的微弱目标检测算法对慢起伏目标具备良好的检测性能, 且其性能要优于基于盒维数的微弱目标检测算法和多脉冲 CA-CFAR(100 个脉冲)算法。我们分析其原因主要是: 该方法仅采用目标所处频段的局部 Hilbert 谱提取脊线和计算平均带宽, 可以抑制其它频段的纯海杂波能量, 增强目标对海杂波局部 Hilbert 谱平均带宽的影响, 从而提高了对微弱目标的检测能力。

(2)极化方式对检测性能的影响分析 在分析极化方式对检测性能的影响时, 我们以数据 1 为例进行分析。图 9 给出了基于局部 Hilbert 谱平均带宽方法对数据 1(HH 极化)的检测性能。

对比图 6 和图 9 可知, 极化方式对该方法的检

测性能有一定影响, 在 HH 极化下的检测性能略高于在 VV 极化下的检测性能。

7 结束语

本文分析了海杂波实部局部 Hilbert 谱脊线及其局部 Hilbert 谱平均带宽的特点, 研究了极化方式和目标对海杂波实部局部 Hilbert 谱脊线及其局部 Hilbert 谱平均带宽的影响, 提出了基于局部 Hilbert 谱平均带宽的目标检测算法, 并分析了该方法的检测性能以及极化方式对其检测性能的影响等。本文所提方法先采用目标所处频段的局部 Hilbert 谱脊线计算平均带宽, 以提取目标与海杂波差异, 然后再采用局部 Hilbert 谱平均带宽对目标进行检测。仿真结果表明, 与本文所提的其他两种算法相比, 该算法检测性能较好。

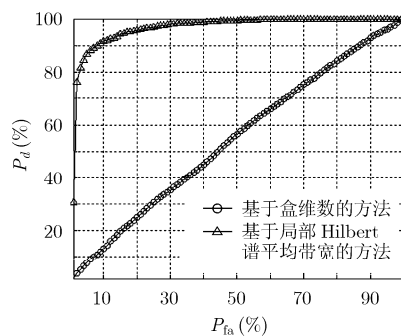


图8 对数据3(SCR=-15 dB, VV极化)的检测性能

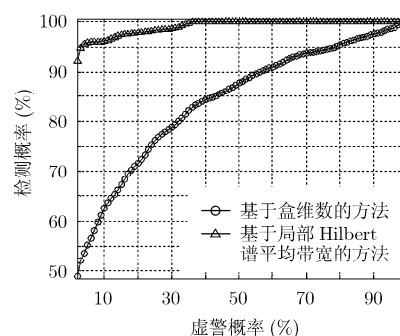


图9 对数据1(HH极化)的检测性能

参考文献

- [1] 简涛, 何友, 苏峰. 非高斯杂波下修正的SDD_GLRT距离扩展目标检测器[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2662-2667.
Jian Tao, He You, and Su Feng. Modified SDD-GLRT detector for range-spread targets in non-Gaussian clutter[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(12): 2662-2667.
- [2] 戴奉周, 刘宏伟, 吴顺君. 一种基于顺序统计量的距离扩展目标检测器[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2488-2492.

- Dai Feng-zhou, Liu Hong-wei, and Wu Shun-jun. Order-statistic based detector for range spread target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(10): 2488-2492.
- [3] 李涛, 冯大政, 夏宇垠. 基于EM算法和GOF的宽带分布式目标检测算法[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2246-2250.
Li Tao, Feng Da-zheng, and Xia Yu-yin. A detection method based on EM and GOF for wideband spatially distributed target[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(10): 2246-2250.

- [4] 陈远征, 陈建军, 付强. 复合高斯杂波下基于GLRT 的扩展目标检测[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6): 1327-1331.
Chen Yuan-zheng, Chen Jian-jun, and Fu Qiang. Detection of range spread target based on GLRT in compound-Gaussian clutter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(6): 1327-1331.
- [5] Haykin S. Adaptive Radar Signal Processing[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007, Chapter 3.
- [6] 王谷, 方宁, 苗俊刚. 复杂目标角闪烁序列的混沌特性[J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1505-1508 .
Wang Gu, Fang Ning, and Miao Jun-gang. The chaos feature of glint series for complex targets[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(7): 1505-1508.
- [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] Guan Jian, Liu Ning-bo, and Song Jie. Multifractal correlation characteristic for radar detecting low-observable target in sea clutter[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(2): 523-535.
- [9] 刘亚波, 李亚超, 邢孟道, 等. 基于锥形尺度变换的弱小舰船目标检测[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11): 2575-2580.
Liu Ya-bo, Li Ya-chao, Xing Meng-dao, *et al.* Detection of weak ship target based on taper scale transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(11): 2575-2580.
- [10] 黄小红, 贺夏, 辛玉林. 基于时频特征的低分辨雷达微动多目标分辨方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2342-2347.
Huang Xiao-hong, He Xia, and Xin Yu-lin. Resolving multiple targets with micro-motions based on time-frequency feature with low-resolution radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(10): 2342-2347.
- [11] Huang E, Shen Zheng, Long R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceeding of the Royal Society, London, A*, 1998, 454: 903-995.
- [12] 于德介, 程军圣, 杨宇. 机械故障诊断的Hilbert-Huang变换方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 75-76 .
Yu De-jie, Cheng Jun-sheng, and Yang Yu. The Fault Diagnosis Approach for Manchine Based on Hilbert-Huang Transform [M]. Beijing: Science Press, 2006: 75-76.
- [13] 王逸林, 梅继丹, 蔡平. 水声矢量信号的希尔伯特黄变换仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(15): 4173-4175.
Wang Yi-lin, Mei Ji-dan, and Cai Ping. Research on Hilbert-Huang transform of underwater acoustic vector signal[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(15): 4173-4175.
- [14] 石志广. 基于统计与复杂性理论的杂波特性分析及信号处理方法研究[D]. 长沙, 国防科学技术大学, 2007.
Shi Zhi-guang. The research on the analysis of the clutter characteristic based on the statistics and complexity theory and the method of the signal processing[D]. Changsha, National University of Defense Technology, 2007.
- [15] 张小蓟, 张歆, 孙进才. 基于经验模态分解的目标特征提取与选择[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(4): 453-456.
Zhang Xiao-ji, Zhang Xin, and Sun Jin-cai. Improving feature extraction of ship-radiated target signals with empirical mode decomposition (EMD) and Hilbert spectrum[J]. *Journal of Northwestern Poly Technical University*, 2006, 24(4): 453-456.
- [16] 陈文武. 基于HHT的多分量LFM信号检测与参数估计[J]. 现代雷达, 2007, 29(12): 59-61.
Chen Wen-wu. Multicomponent LFM signal detection and parameter estimation based on Hilbert-Huang transformation[J]. *Modern Radar*, 2007, 29(12): 59-61.
- [17] McMaster University. <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix> [EB/OL].
- [18] 何友, 关键, 彭应宁. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 25-37.
He You, Guan Jian, and Peng Ying-ning. Automatic Radar Detection and CFAR[M]. Beijing: Tsinghuan University Press, 1999: 25-37.
- 张 建: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为海杂波特性分析与微弱目标检测.
- 关 键: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达自动检测与恒虚警处理.