

利用二维恒虚警进行非均匀噪声背景下的目标检测

桂任舟^{1,2,3}

(1 同济大学电子与信息工程学院,上海市四平路 1239 号,200092)

(2 东南大学毫米波国家重点实验室,南京市四牌楼 2 号,210096)

(3 同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室,上海市曹安公路 4800 号,201804)

摘要:针对高频地波雷达中的非均匀噪声环境及各种干扰源时变的特点,提出构建一种时变白化滤波器。先对非均匀噪声环境进行白化处理,然后在一维恒虚警的基础上,采用一种基于多普勒频率和距离的二维恒虚警处理算法。实验结果表明,利用时变白化滤波进行处理后,再在距离和多普勒频率维同时进行恒虚警检测,可以得到较好的检测结果。

关键词:非均匀背景;时变滤波器;白化处理;二维恒虚警检测

中图法分类号:P237.3

对于海洋本身的海流和风的影响以及存在其他多种干扰的高频地波雷达检测环境,很难再把此时的目标检测看成是在平稳高斯白噪声环境下的目标检测。尽管恒虚警目标的检测已被应用到雷达系统中^[1-3],但当噪声环境是时变的非均匀噪声环境时,效果不理想,且它们都要事先知道噪声环境的统计特性^[4]。所以存在这样的问题,即如何根据外界噪声变化的特点来构建检测背景噪声的协方差矩阵,从而自适应地调整检测门限值,实现对目标的恒虚警检测。

对于这种时变雷达检测环境,本文分析了二维恒虚警算法在高斯平稳噪声背景下的应用特点,先对时变背景噪声环境进行白化处理,然后再进行目标检测。

1 目标检测面临时变干扰

高频地波雷达在进行目标检测时面临的干扰由雷达系统噪声、海杂波(海浪回波)、岛屿回波、零频干扰、雷电流星干扰、电离层干扰、无线电通信干扰、其他杂波及大气噪声干扰等组成。由于

外部噪声起主要作用,所以雷达系统内部噪声没有被考虑。海杂波主要由波长为雷达波长一半的海浪与高频电波作用产生,其主要由一次、二次散射得到的一阶回波和二阶回波组成。一阶回波对应海洋表面流信息,二阶回波对应风浪场的浪高谱信息。由于海洋表面流和浪高等都在不停地变化,所以代表海洋动力学参数的海杂波也是在不停的变化之中。岛屿回波与舰船目标相似,只是其多普勒频率为零,且其尺度大于舰船,故其信息可能在不同距离上存在。岛屿和陆地回波常常会干扰对低速舰船的探测。零频干扰是指位于多普勒频谱上零频附近的干扰,不是指岛屿回波或多普勒频率接近零的舰船回波,而是指由雷达系统内部频率合成器相位噪声等引起的干扰,其特征表现为零频附近谱基底出现凸起,严重时将影响目标信息的提取。电离层干扰是由电离层电子浓度分布变化形成的干扰。电离层干扰频谱分布很宽,并使多普勒谱基底抬高,对目标信息的提取有很大干扰。射频干扰是由于雷达工作的高频(短波)段已分布着大量的短波通讯电台和广播形成的干扰。除了上述的主要信号和干扰之外,雷达

收稿日期:2012-01-08。

项目来源:国家教育部留学回国人员科研启动基金资助项目;东南大学毫米波国家重点实验室开放研究基金资助项目(K200916);武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目(09R05);卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放研究基金资助项目(SOED1105)。

回波中还存在其他一些不明原因的杂波和干扰,它们在距离和多普勒域均有较大扩展。大气噪声则构成了海洋回波谱的背景噪声。由于风的作用,大气噪声一般是非平稳随机过程,其分布不满足高斯分布。有许多干扰,如大气噪声干扰、射频干扰、雷电干扰等都是时变的^[5-8]。

2 时变白化滤波器的构建

白化处理的实质就是根据当前噪声协方差矩阵来构建白化滤波器。为了防止白化滤波器对目标信号进行白化所造成的有用目标信号的损失,在构建噪声协方差矩阵时,排除了同待测距离元相邻的两距离元信息。采用对应待测距离元之外的背景噪声数据来构建噪声的协方差矩阵。假设预测值仅取决定时刻 n 以前发生的已输出样本,则 $x(i)$ 的因果预测 $\hat{x}(i)$ 可表示为:

$$\hat{x}(n) = - \sum_{i \in \Omega} a(n, i) x(i)$$

式中,

$$\Omega = \{i: n_1 - k_1 \leq i \leq n_1 + k_1; i \neq n_1 - 1, n_1, n_1 + 1\} \tag{1}$$

式中, n_1 为待测距离元; k_1 为相邻距离元的个数。

由上式得到所有参数 $a(n, i), i \in \Omega$, 然后, 由所得参数来构建白化滤波器。白化滤波器的传递函数为 $H(z) = 1 + \sum_{i \in \Omega} a(i) z^{-i}$, 即非均匀噪声背景经过白化滤波器后变为均匀噪声背景^[9]。可以认为在实际工作中噪声背景是非均匀的, 且干扰的变换具有一定时变特性。所设计的白化滤波器的传递函数应随着外界环境的变化而改变, 即是一种时变的白化滤波器。而白化滤波器传递函数的参数 $a(n, i), i \in \Omega$ 又是由背景噪声的协方差矩阵所决定的, 故必须进行协方差矩阵正确估计。要进行协方差的正确估计就应首先选定一个合适快拍数。依据干扰的时变特性, 考虑计算量, 在确定了白化滤波器的初始传递函数后, 每隔 3 s 更新一次白化滤波器的传递函数。为了保证白化滤波器的连贯性, 采用一种迭代的方式进行协方差矩阵的更新。最初的白化滤波器传递函数的噪声协方差矩阵可用下式得到:

$$\hat{R}_{xx}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x(n)x(m+n), \quad |m| \leq N-1 \tag{2}$$

而后面的第 $T+1$ 个噪声协方差矩阵可用下式来进行迭代。

$$\hat{R}^{(t+1)} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{r_k r_k^T}{r_k^T (\hat{R}^{(t)})^{-1} r_k} \tag{3}$$

选取 2004 年 4 月 13 日 15 点 45 分在浙江朱家尖的实际测量数据进行处理。当时雷达的工作参数为:载频 7.973 MHz, 扫频带宽 30 kHz, 距离分辨率 5 km, 一次扫描时间为 653 ms。当采用固定的白化滤波器来进行处理时, 得到白化后的距离-多普勒信息三维图如图 1 所示。

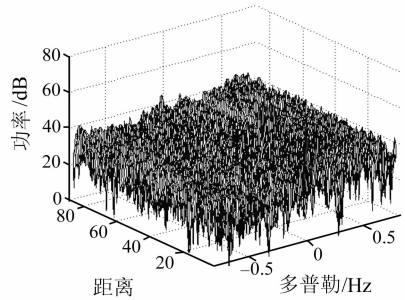


图 1 距离-多普勒信息三维图(固定白化滤波)
Fig. 1 Three Dimensions Graph of Distance & Doppler-Spectrum

可以看出, 经过固定白化滤波处理后, 海杂波基本被消除, 但背景的起伏还是非常明显且“刺状”干扰没有得到有效抑制。这是因为海杂波在较长时间内的变化都不是很大, 其他干扰的时变速度较快, 用固定的白化滤波器不能有效跟踪它们的变化从而有效进行抑制。

当每次更新白化滤波器时选择快拍次数为 6, 每次快拍包括的样本数为 1 024, 按式(3)进行迭代, 这样可以使得以前的数据也在新的白化滤波器中起作用, 既可实现对时变干扰信号的有效跟踪, 又可使白化滤波器的更新不改变有效的目标信号。当采用这种时变的白化滤波器进行处理时, 得到的白化后的距离-多普勒信息三维图如图 2 所示。

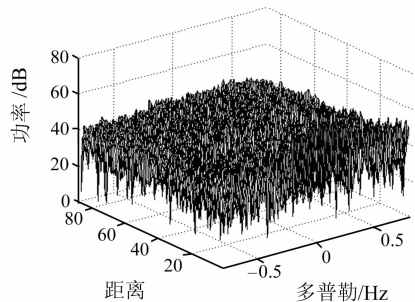


图 2 距离-多普勒信息三维图(时变白化滤波)
Fig. 2 Three Dimensions Graph of Distance & Doppler-Spectrum

经过时变白化滤波器进行处理后, 不但海杂波基本被消除, 而且背景的起伏不是非常明显, “刺状”干扰也得到了有效抑制。

3 基于多普勒频率和距离的二维恒虚警检测

恒虚警检测利用被检测单元周围的单元来估计噪声与杂波的功率水平,并根据估计值形成一个与噪声及杂波相适应的自适应门限。因此,当噪声与杂波的强度发生变化时,门限也会随之变化,从而保证虚警概率能够维持稳定^[10]。本文采用基于多普勒频率和距离的二维恒虚警方法来处理实际目标检测,然后再依据时间的情况进行自适应更新。

尽管经过白化处理后背景噪声可以看成均匀的,但在多目标的情况下,如果用简单的 CA-CFAR,由于其他目标的存在,检测门限的选取受到多目标信号的影响,不能确保恒虚警检测,影响检测结果,会造成漏检。故本文提出了用 OS-CFAR 有序统计恒虚警检测器来实现多目标情况下的恒虚警检测。OS-CFAR 可以在某种程度上减轻多目标干扰和边缘杂波背景两者之间的矛盾。在多目标环境中,它具有较好的抗干扰性能。在均匀杂波背景和杂波边缘环境中的性能下降也是可以接受的。

OS-CFAR 检测器首先是对参考单元采样由小到大进行排序,即

$$x(1) \leq x(2) \leq \dots \leq x(r)$$

然后,取第 k 个采样值作为总的杂波功率水平估计 $Z = x(k)$ 。

在二维区域上进行 CFAR 检测,其检测假设为:

$$H_0: x(d, r) = |n(d, r)|$$

$$H_1: x(d, r) = |s(d, r) + n(d, r)|$$

式中, d 和 r 分别表示多普勒单元和距离单元; $s(d, r)$ 表示对应的目标在多普勒维和距离维的回波信号; $n(d, r)$ 为背景噪声或杂波。 H_0 和 H_1 是对距离-多普勒频率图的幅度检测。

通常,目标信号在距离-多普勒信息三维图中可以看成是一个圆锥体。这是因为待测距离元相邻的两距离元会包含目标的旁瓣信息,而在多普勒频域相邻的 4 个距离元也会存在目标的泄漏信息。所以预测的支撑区对于同待测距离元相邻的两个距离元和同多普勒频率相邻的 4 个频率分辨率单元都没有考虑在内。经过时变白化滤波器的处理后,进行经典的二维区域噪声估计,待检测单元与其相比较构成检测统计量 D 。如果待检单元的检测统计量越过由虚警概率确定的门限,则判定

待检单元是目标。

基于排序方法的二维检测统计量的构成为:

$$D = \frac{x(d, r)}{\max\{\text{rank}_k(x(d+l, r+m))\}}, \quad |l| > 2, |m| > 1 \quad (4)$$

$T_a = TZ$, Z 是杂波功率水平的估计, T 为标称化因子,可由式 $T = p_{fa}^{-1/2n} - 1$ 得到。

在多目标环境中,由于干扰和其他目标干扰的存在,检测性能有所损失。通常仅考虑强干扰目标的情况,此时干扰目标的回波总是占据最高的有序统计量,通过高位的几个样本就可能得到背景噪声水平的估计。可用 AIC 方法进行目标数的估计,假设在参考单元中存在 IR 个干扰目标,那么不含有干扰目标的参考单元数目是 $R - IR$,则此时 OS-CFAR 在多目标环境下的检测概率为:

$$p_d = k \binom{R}{k} \frac{\Gamma\left[(R - IR) - k + 1 + \frac{T}{1 + \lambda}\right] \Gamma(k)}{\Gamma\left((R - IR) + \frac{T}{1 + \lambda} + 1\right)} \quad (5)$$

其中, $\Gamma(k) = (k-1)!$; λ 是目标信号的平均功率与杂噪功率之比。

由此可见,多目标环境下的 OS-CFAR 检测器性能与干扰目标的数目有关。当选择的估计序数 $k < (R - IR)$ 时,系统的检测性能损失是可以接受的。反之,当 $k > (R - IR)$ 时,系统的检测性能损失就比较大。

为了验证本文方法的可行性,比较 3 种情况下的目标检测概率:① 运用时变白化滤波器且在距离-多普勒频率二维平面上进行恒虚警检测;② 用不变的白化滤波器且同样在距离-多普勒频率二维平面上进行恒虚警检测;③ 未进行白化滤波处理且只在多普勒频率维上进行恒虚警检测。把多个仿真目标随机放在不同的位置,且待检测区域目标的信噪比大小在不断地从 0 dB 到 45 dB 进行调整,在不同信噪比情况下分别用 3 种方法在保证目标检测的虚警概率为 0.001 时进行目标检测,得到 3 种情况下目标检测概率的离散点,把这些点连成曲线后得到图 3。

显然,采用基于时变的白化滤波器且进行二维恒虚警检测的方法优于其他两种方法。

4 结 语

针对高频地波雷达中时变干扰的特点,本文提出了一种基于迭代方法的时变白化滤波器方法

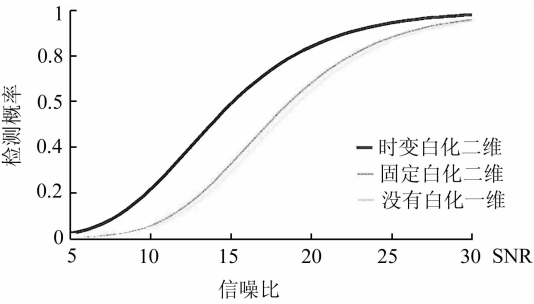


图 3 3 种方法的目标检测概率曲线

Fig.3 Detecting Probability Curves with Three Methods

来对这种非均匀背景噪声进行白化处理。然后,在白化后的均匀背景下采用 OS-CFAR 方法在多普勒频率和距离维同时进行恒虚警检测。实验证明了此方法的可行性。

参 考 文 献

[1] Gui R Z, Yang Z J. Application of Hopfield Neural Network for Extracting Doppler Spectrum from Ocean Echo[J]. Radio Science, 2006, 41(4): 90-96

[2] 桂任舟,杨子杰. 基于信号分解的时频分析方法在高频地波雷达目标监测中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(7):653-656

[3] Gill E W, Walsh J. A Combined Sea Clutter and Noise Model Appropriate to the Operation of High-frequency Pulsed Doppler Radar in Regions Constrained by External Noise[J]. Radio Science,

2008, 43:12-26

[4] Gandhi P P, Kassam S A. Analysis of CFAR Processors in Homogeneous Background [J]. IEEE Transactions on AES, 1988,24(4):247-445

[5] Khan R, Gamberg B, Power D, et al. Target Detection and Tracking With a High Frequency Ground Wave Radar[J]. IEEE JOE, 1994, 19(4): 540-548

[6] Headrick J M, Anderson S J. HF Over-the-Horizon Radar in Radar Handbook [M]//Skdnik. New York: McGraw-Hill, 2008

[7] Gini G, Rangaswamy M. Knowledge-Based Radar Detection, Tracking, and Classification[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, Italy, 2008

[8] Leong H, Ponsford A. The Effects of Sea Clutter on the Performance of hf Surface Wave Radar in Ship Detection[C]. Radar Conference, Italy, 2008

[9] Rohling H. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations[J]. IEEE Transactions on AES, 1983,19(4): 608-621

[10] Yaremchuk M, Sentchev A. Mapping Radar-Derived Sea Surface Currents with a Variational Method[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(14): 1 711-1 722

作者简介:桂任舟,讲师,博士,研究兴趣为电波传播、雷达系统设计和雷达信号处理。
E-mail: rzgui@tongji.edu.cn

Detecting Target Located in Nonstationary Background Based on Two-Dimensions Constant False Alarm Rate

GUI Renzhou^{1,2,3}

(1 School of Electronics and Information, Tongji University, 1239 Siping Road, 200092 Shanghai, China)

(2 State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, 2 Sipailou, 210096 Nanjin,China)

(3 The Key Laboratory of Embedded System and Service Computing, Ministry of Education, Tongji University, 4800 Caoangong Road, Shanhai 201804, China)

Abstract: According to the time-varying properties of the disturbances which exist in high frequency ground wave radar, we propose a new algorithm of two-dimensions constant false arm rate based on Doppler and range spectrum. The nostationary background is whited with time-varying filter. The three results are compared such as time-varying whitening and two dimension processing, fixed whitening and two dimensions processing, no whitening and one dimension processing. The new algorithm is valued correctly with the comparing results.

Key words: nonstationary background; time-varying filter; whiten processing; two-dimensions CFAR detection