

基于时频分析的高频雷达目标检测与定向

周 浩,文必洋,吴世才,马志刚

(武汉大学电子信息学院,湖北武汉 430079)

摘 要: 针对宽波束高频雷达对非平稳目标探测的问题,提出了一种新的基于线性时频分析的目标检测与定向方法,即先从时频面上检测出目标的时频脊,然后沿脊线对线性时频表示采样形成阵列快拍,进行空间谱估计.分析了目标横向运动对空间谱估计的影响,提出了横向运动补偿及目标时变方位和横向速度估计的方法.雷达实测数据处理表明,本文方法能有效地应用于宽波束高频雷达对非平稳目标的探测中.

关键词: 高频雷达; 时频分析; 定向; 横向速度

中图分类号: TN958.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2265-04

Target Detection and Direction Finding with HF Radars Based on Time-Frequency Analysis

ZHOU Hao, WEN Bi-yang, WU Shi-cai, MA Zhi-gang

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract: A novel method for non-stationary target detection and direction finding with broad-beam high-frequency (HF) radars based on time-frequency analysis is proposed. Target ridges on the time-frequency representation (TFR) of the echo data are detected, and then array snapshots are formed by sampling the TFR along the ridges, which are finally used to calculate the spatial spectra. Furthermore, the effects on target direction finding due to the cross-range motion of the target are analyzed, and a motion-compensation method is developed, which can effectively estimate the time-variant direction as well as the cross-range velocity of the target. Radar echo signal processing results show the validness of the above methods for the detection and direction finding of non-stationary targets with broad-beam HF radars.

Key words: HF radar; time-frequency analysis; direction finding; cross-range velocity

1 引言

高频地波雷达已在中远距离预警、海面移动目标监测等方面获得广泛应用^[1].为降低选址难度及建设维护费用,天线阵小型化成为高频地波雷达的一个发展方向,它采用宽波束接收,以超分辨率空间谱估计算法来实现与庞大的相控阵相当的角度分辨率^[2].然而,宽波束接收要求在每个距离元上对不同方位和不同速度的多目标同时进行检测,也为目标探测带来了新的困难,而这一困难在目标作非匀速运动时尤为突出.传统的目标检测方法^[2,3]是先进行频域检测,然后通过时域滑窗处理获得目标的频域采样以求取空间谱估计,因而要求在雷达相干积累时间内目标的多普勒变化不超过雷达的多普勒分辨率.但为了探测舰船等低速移动目标,相干积累时间不能太短,因此目标的平稳性通常无法满足,从而导致传统方法性能下降甚至失效.首先是目标的非平稳性将导致多普勒谱展宽并可能出现分裂,不再呈现线谱形式,不利于频域检测;其次是单一频率采样将使采样偏离真实信号

而产生较大的定向误差,同时分裂的谱峰将导致目标虚警的产生.要对非平稳目标进行探测,就必须相应地采用非平稳的信号处理方法.本文从高频地波雷达目标探测的实际出发,提出了一种新的基于时频分析的目标检测与定位方法.首先从时频面上检测出目标的时频脊线,然后沿该曲线对线性时频表示进行采样,形成阵列快拍,由其协方差矩阵采用多重信号分类法(Multiple Signal Classification, MUSIC)获得空间谱估计^[4].就整体而言,本文方法为宽波束高频地波雷达的目标探测提供了一种新的基于非平稳分析方法的解决途径.此外,本文还对目标在相干积累时间内横向运动对空间谱估计的影响进行了分析,提出了对其进行补偿的方法.经过横向运动补偿后获得的目标空间谱峰更为尖锐,提高了定向性能,而同时也可获得目标的瞬时方位分布,并可估计出目标的横向速度,这就为目标精确跟踪提供了更为丰富的信息.

2 时频面目标检测

本文以宽波束高频地波雷达在某一距离元上的回波信号

作为处理的基础,此信号包含了该距离元上可能存在的多个目标,检测的目的便是要获知目标个数及各目标的(径向)速度和方位信息.传统的多普勒域检测方法是基于平稳信号分析,但在实际情况中,目标的径向速度则几乎总是时变的,当这种变化太大时,就将使传统检测方法不再适用.而对低速移动目标的探测要求使这个问题不能简单的通过缩短相干积累时间以满足目标的平稳性条件来解决.为此本文提出了另一种解决思路,即在目标在雷达相干积累时间内径向运动不超过一个距离元的条件下,尽量采用长的相干积累时间,利用非平稳信号分析的方法实现目标检测.在高频雷达中,一般目标信号在时频面上呈现为单分量的时频脊;不同时变速度的多个目标即使具有相同的频谱形状,在时频面也能被有效地分离.

文中采用短时傅立叶变换来计算回波信号的线性时频表示(Time-Frequency Representation, TFR)^[5].当获得所有天线通道上某距离元信号的时频表示后,在平均时频表示上按预设的信噪比门限和持续时间门限检测出目标时频脊,各时频脊的定向则由后续的空间谱估计算法实现.

3 线性时频空间谱估计

假设工作波长为 λ 、间距为 d 的 M 元均匀直线阵接收到空间 K 个目标的回波信号 ($M > K$),阵列输出向量 $X(t) = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T$ 满足下列线性模型^[4]

$$X(t) = A(\theta) S(t) + N(t) \quad (1)$$

其中 $S(t) = [s_1(t), \dots, s_K(t)]^T$ 为空间目标入射信号向量, $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_K]^T$ 为目标到达角向量, $A(\theta) = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_K)]$ 为阵列响应矩阵, $a(\theta_k) = [1, e^{-j\theta_k}, \dots, e^{-j(M-1)\theta_k}]^T$, $\theta_k = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_k, k = 1, \dots, K$, $N(t)$ 为加性白噪声,上标 T 表示转置.

为有效地实现对非平稳目标的定向,使雷达对目标进行自动检测与跟踪处理,本文提出了一种基于线性时频表示的空间谱估计算法,其基本思想是用沿目标瞬时频率采样的方法去除目标的非平稳性,然后以传统的平稳空间谱估计方法对目标进行定向.由式(1),阵列输出向量的线性时频表示可写为

$$F_x(t, f) = A(\theta) F_s(t, f) + F_N(t, f) \quad (2)$$

其中 $F_s(t, f)$ 和 $F_N(t, f)$ 分别是空间目标入射信号和噪声的时频表示向量.而目标信号 $s_k(t) (k = 1, \dots, K)$ 是由于附加多普勒频移 $f_D(t)$ 而成为非平稳信号,在目标包络变化缓慢的条件下,时频表示 $F_s(t, f)$ 可写为

$$F_s(t, f) = F_p(t, f - f_D(t)) \quad (3)$$

其中 $F_p(t, f)$ 为目标包络信号的时频表示.沿瞬时频率曲线 $f_D(t)$ 对时频表示 $F_x(t, f)$ 进行采样,可得到阵列时频快拍

$$X_{TF}(t) = F_x(t, f_D(t)) = A(\theta) F_p(t, 0) + N(t, f_D(t)) \quad (4)$$

这种时频快拍采样方式等效于在目标包络频谱中心进行采样,从而去除了目标回波信号由时变多普勒频率引起的非平稳性,使阵列输出信号恢复为平稳信号.因此可计算阵列时频快拍 $X_{TF}(t)$ 的协方差矩阵 $R_{TF} = E[X_{TF}(t) X_{TF}^H(t)] / E[| \cdot |]$ 为期望算子).假定时频脊噪声 $N(t, f_D(t))$ 是高斯白噪声,且与

目标包络信号不相关,则有

$$R_{TF} = A(\theta) R_{F_p} A^H(\theta) + R_{F_N} \quad (5)$$

其中 $R_{F_p} = E[F_p(t, 0) F_p^H(t, 0)]$ 是空间目标入射信号包络向量的协方差矩阵, $R_{F_N} = \sigma^2 I$ 是时频脊噪声协方差矩阵, σ^2 为时频脊上噪声的平均功率.

当空间目标包络信号 $p_k(t) (k = 1, \dots, K)$ 均不相干时,容易证明 $F_p(t, 0)$ 也不相干,因此入射信号包络向量的协方差矩阵 R_{F_p} 满秩,此时阵列时频采样协方差矩阵 R_{TF} 的 K 个主特征向量和 $A(\theta)$ 的各列向量张成相同的信号子空间.可以对 R_{TF} 应用传统的多重信号分类法(MUSIC)进行空间谱估计.对 R_{TF} 进行特征分解得 $R_{TF} = [U_s U_n] [\Lambda U_s U_n]^H$, 其中 U_n 为 $M - K$ 列,张成噪声子空间.其 MUSIC 空间谱估计为

$$P(\theta) = \frac{1}{\| U_n^H a(\theta) \|^2} \quad (6)$$

信号到达角则由 $P(\theta)$ 的 K 个谱峰位置给出.

由以上分析可知,线性时频空间谱估计算法通过沿时频脊采样获得的时频快拍实际上提取了信号的包络信息,从而使其恢复了平稳性,同时由于时频脊对应着信号功率峰值,也实现了信号的最大信噪比采样,而这种采样方式本身也具有使噪声白化的作用.因此,该算法十分有利于高频雷达的非平稳目标定向.

4 目标横向运动补偿

上文所述线性时频空间谱估计算法是利用沿时频脊对线性时频表示进行采样的方法去除目标回波信号由时变多普勒频率引起的非平稳性,这实际上是在空间谱估计中对目标的径向运动进行补偿.分析表明,目标的横向运动对空间谱估计也存在模糊效应.横向运动导致相干积累时间内目标方位的变化,普通的空间谱估计算法无法跟踪这一变化,得到的空间谱有较大展宽,角分辨率下降.因此,在进行目标定向时也需要对目标的横向运动进行补偿.

在单目标入射的情况下,由瞬时方位角为 $\theta(t)$ 的目标引起的两相邻天线间相位差为

$$\Delta \theta(t) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta(t) \quad (7)$$

这一时变相位差使阵列导引向量 $a(\theta)$ 具有时变性而应改写为

$$a(\theta, t) = [1, e^{-j\Delta \theta(t)}, \dots, e^{-j(M-1)\Delta \theta(t)}]^T \quad (8)$$

从而导致目标方位估计的不准确,对横向运动进行补偿也就是要对导引向量 $a(\theta, t)$ 中的时变部分进行补偿.

假设目标的横向运动速度为 $v_c(t)$, 则其方位角为

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t v_c(t) dt \quad (9)$$

其中 R 为目标距离(此时目标在相干积累时间内距离变化的影响可以忽略), θ_0 为初始方位角, $\theta(t)$ 为方位角的时变部分.当 $\Delta \theta$ 很小时,由式(7)和(9)有

$$a(\theta, t) = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\cos \theta_0 - \frac{\sin \theta_0}{R} \int_0^t v_c(t) dt \right] = a(\theta_0, t) \quad (10)$$

其中 θ_0 是初始空间相位差, $\theta(t)$ 是空间相位差的时变部分,且有 $\theta(0) = 0$. 阵列导引向量 $a(\theta, t)$ 可写为

$$a(\theta, t) = (\theta_0, t) a(\theta_0) \quad (11)$$

其中 $a(\theta_0) = [1, e^{-j\theta_0}, \dots, e^{-j(M-1)\theta_0}]^T$, $(\theta_0, t) = \text{diag}[1, e^{-j\theta_0}, \dots, e^{-j(M-1)\theta_0}]$, 此时阵列输出向量相应为

$$X(t) = (\theta_0, t) a(\theta_0) s(t) + N(t) \quad (12)$$

若 (θ_0, t) 已知, 则可以形成横向运动补偿后的阵列快拍

$$X_c(t) = (\theta_0, t)^{-1} X(t) = a(\theta_0) s(t) + (\theta_0, t)^{-1} N(t) \quad (13)$$

并由 $X_c(t)$ 进行时频空间谱估计. 横向运动补偿等效于使目标保持在初始方位 θ_0 , 去除了阵列导导向量的时变性, 从而使空间谱峰变得聚集和尖锐, 恢复其优良的定向性能.

(θ_0, t) 可由目标空间相位差 $\phi_m(t)$ 得到, 而 $\phi_m(t)$ 则可由目标时频脊采样 $X_{TF}(t)$ 在通道间的瞬时相位差估计得到. $X_{TF}(t)$ 在相邻的第 m 和第 $m-1$ 个通道 ($m=2, \dots, M$) 的瞬时相位差为

$$\phi_m(t) = \arg(x_{TFm}(t)) - \arg(x_{TFm-1}(t)) \quad (14)$$

它包含了目标空间相位差 $\phi_m(t)$ 以及噪声 $n(t)$, 即 $\phi_m(t) = \phi_m(t) + n(t)$. $\phi_m(t)$ 的估计 $\hat{\phi}_m(t)$ 可以通过误差函数 $J(\hat{\phi}_m) = \sum_{m=2}^M |\hat{\phi}_m(t) - \phi_m(t)|^2$ 的最小化来实现. 得到 $\hat{\phi}_m(t)$ 后, 则可得到目标的时变方位角估计

$$\hat{\theta}(t) = \arccos\left(\frac{d\hat{\phi}_m(t)}{2}\right) \quad (15)$$

它包含了比用传统定向算法获得的简单的一个方位估计更为丰富的信息, 有利于雷达实现对目标的精确跟踪. 而且值得注意的是, 由式(9)可以获得另一个非常有意义的信息即目标的横向速度 $\hat{v}_c(t)$ 的估计

$$\hat{v}_c(t) = R \frac{d\hat{\theta}(t)}{dt} \quad (16)$$

目标横向速度的提取将为多目标跟踪提供更为丰富的信息, 尤其是当多个目标的航迹非常接近或出现交叉情况需要辨别时, 横向速度则可以提供直接的判据.

5 实测数据处理结果

我们利用雷达实测数据来检验上述基于时频分析的目标检测及定向方法, 数据采自由武汉大学研制的宽波束高频地波雷达 OSMAR2000^[6]. 该雷达采用间距 17m 的 8 元均匀直线天线阵, 工作体制为收发共用、一发八收, 工作频率为 7.5MHz, 线性调频, 相干积累时间本文取为约 6min.

图 1 显示了某距离元上回波的功率谱和线性时频(等高线)图, 其中位于 $\pm 0.28\text{Hz}$ 处的两条时频脊为海浪一阶谱区, 零频脊为零频干扰, 在这些区域以外可检测出两条目标时频脊. 由图可见, 在 0.1 到 0.2Hz 间的目标 1 功率谱峰存在分裂, 将在传统检测中导致虚警. 图 2 显示了目标 1 的空间谱估计, 分别采用了基于频域检测的传统的 MUSIC 空间谱估计结果(虚线)、平均双线性时频 MUSIC 算法^[7](点划线)、线性时频 MUSIC 算法(实线)以及经目标横向运动补偿的线性时频 MUSIC 算法(点线). 图 3 显示了目标 1 的瞬时速度和方位估计. 以上结果表明, 对于非平稳目标传统的基于平稳信号分析的定向算法基本失效, 而时频 MUSIC 算法则呈现出良好的性

能. 特别的, 经过目标横向运动补偿的线性时频 MUSIC 算法的谱峰更为尖锐, 也证明了补偿的有效性. 通过雷达实测数据处理, 可以得出结论, 本文提出的基于时频分析的目标检测及定向算法是有效的, 能够满足高频雷达对非平稳目标进行实时探测的需要.

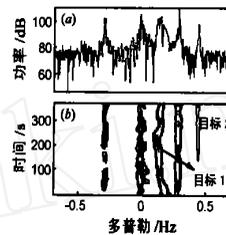


图 1 信号功率谱及时频表示; (a)功率谱;(b)时频表示;

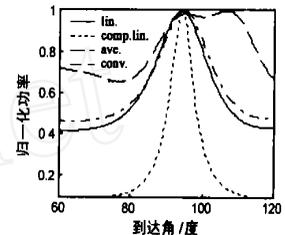


图 2 目标 1 的空间谱估计

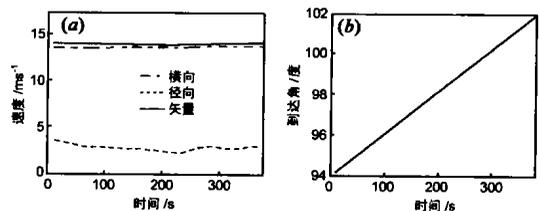


图 3 瞬时速度和到达角 (a)速度;(b)到达角

6 结论

本文针对宽波束高频地波雷达对非平稳目标进行探测的问题提出了一种基于线性时频分析的目标检测及定向方法, 并针对目标横向运动对空间谱估计的影响提出了一种对其进行补偿的方法. 雷达实测数据处理表明上述方法是有效的. 在高频雷达目标探测中, 不必一定要缩短相干积累时间以与目标的平稳性相适应, 相反的, 在目标径向运动不超过一个距离元的条件下, 可以延长相干积累时间, 采用非平稳分析方法进行目标的检测与定向. 时频分析等非平稳分析方法的研究利用必将为宽波束高频雷达的目标探测技术提供更为广阔的发展空间.

参考文献:

[1] Khan R, Gamberg B, et al. Target detection and tracking with a high frequency ground wave radar [J]. IEEE J Oceanic Eng, 1994, 19(4): 540 - 548.
 [2] 杨绍麟. 高频海洋遥感雷达的天线阵设计与空间超分辨率算法[D]. 武汉: 武汉大学电子信息学院, 2001.
 YANG Shao-lin. Antenna array design and spatial super-resolution algorithm for HF ground wave radar ocean surface state remote sensing[D]. Wuhan: School of Electronic Information, Wuhan University, 2001. (in Chinese)
 [3] 赵汉青. 高频地波雷达海面目标方位角估计算法研究[D]. 武汉: 武汉大学电子信息学院, 2002.
 ZHAO Han-qing. Application of eigendecomposition-based spatial spectrum estimation algorithm in DOA estimation of HF GWR sea surface targets[D]. Wuhan: School of Electronic

- Information, Wuhan University, 2002. (in Chinese)
- [4] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans Antenna and Propagation. 1986, 34(3) :276 - 280.
- [5] 科恩. 时-频分析:理论与应用[M]. 白居宪,译. 西安:西安交通大学出版社. 1998.
- [6] 吴世才,杨子杰,等. 高频地波雷达的东海试验[J]. 武汉大学学报(理学版),2001,47(1) :111 - 117.
- WU Shi-cai, YANG Zi-jie, et al. Test of HF ground wave radar OSMAR2000 at the eastern China sea [J]. Journal of Wuhan Univ. (Natural Science Ed.),2001,47(1) :111 - 117. (in Chinese)
- [7] Sekihara K, NAGARAJAN S S, et al. Estimating neural sources from each time-frequency component of magnetoencephalographic data[J]. IEEE Tans Biomedical Eng,2000, 47(5) :642 - 653.

作者简介:



周浩 男,1978年8月出生于湖北省,博士,现为武汉大学电子信息学院讲师,感兴趣的研究方向为自适应信号处理、阵列信号处理、时频分析等. E-mail :zhouhao771@yahoo.com.cn.



文必洋 男,1963年11月出生于湖北省,武汉大学电子信息学院教授,博士生导师,感兴趣的研究方向为高频雷达海洋环境监测、目标检测与跟踪、自适应信号处理、阵列信号处理等.

吴世才 男,1941年7月生于湖北省,武汉大学电子信息学院教授,博士生导师,感兴趣的研究方向为高频地波雷达海洋环境监测等.

马志刚 男,1978年6月出生于内蒙古,武汉大学电子信息学院博士研究生,主要研究方向为现代电路与系统设计.