

基于时频分析的电离层多模污染抑制研究^{*}

鲁转侠 柳文 李雪 李吉宁 郭文玲

(中国电波传播研究所 青岛 266107)

摘要 研究高分辨线性时频分析方法和联合时频分析方法, 利用这两种方法对高频电离层返回散射探测的多个传播模式实测数据, 对污染抑制效果进行分析. 结果显示, 这两种基于时频分析的方法针对多模和相位污染同时存在的复杂情况, 与其他常规方法相比均使杂波谱得到了较好的锐化, 目标信号在二维时频域较清楚地显出. 因此可以证明, 上述两种方法具有很高的应用价值, 对天波超视距雷达海上低速目标检测具有重要意义.

关键词 电离层, 多模传播, 时频分析, 污染抑制

中图分类号 P 352

Study on Ionospheric Multi-mode Propagation Pollution Suppression Based on Time-frequency Analysis

LU Zhuanxia LIU Wen LI Xue LI Jining GUO Wenling

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107)

Abstract The high resolution linear time-frequency analysis method and the combined time-frequency analysis method are the theoretically analyzed and verified by simulation in this paper. And these two methods are applied to high frequency ionospheric backscattering detection data that have ionospheric multi-mode propagation state. The effect of ionospheric pollution suppression is analyzed. Results show that these two methods have better effect in the case of ionospheric multi-mode propagation state and phase pollution exist at the same time. These two methods can make spectrum more sharpening than other conventional methods. The ship target is clearly revealed in time-frequency domain. Thus it is proved that these two methods have very high application value. For sky-wave over-the-horizon radar detection of low speed targets like ships, these two methods are of great significance.

Key words Ionosphere, Multi-mode propagation, Time-frequency analysis, Pollution suppression

* 国家自然科学基金项目资助 (61302006, 61331012)

2015-11-03 收到原稿, 2016-06-08 收到修定稿

E-mail: zhuanxialu@163.com

0 引言

天波超视距雷达 (OTHR) 利用电离层返回散射传播机理实现超视距覆盖探测, 克服了地球曲率限制, 作用距离达 800~3500 km, 覆盖范围几百万平方公里^[1-3]。电离层是天波超视距雷达的主要传播媒介, 具有时变、随机、色散和各向异性等特性, 影响雷达信号传播。电离层具有分层特性, 传播高频电波时, 其具有多条传播路径, 从而导致不同地面距离单元杂波落入同一群距离单元, 产生多模效应。多模效应和电离层的非平稳性引起的传播射线相位路径变化, 使得经电离层传播的雷达回波信号相位非相干, 杂波频谱展宽, 淹没低速目标信号, 制约低速目标检测^[3-5]。

目前已针对电离层多模传播以及电离层相位污染提出了多种解决措施。电离层相位污染抑制方法主要分为两大类: 一是采用短相干积累避免电离层的非平稳性; 二是目前在天波超视距雷达中广泛应用的时域估计补偿方法, 例如最大熵谱估计法^[7]、相位梯度估计法^[8]、时频分析法^[9]和特征分解法^[10]等。文献^[11]采用分段多项式相位信号建立电离层相位调制函数模型, 并利用高阶模糊函数法分析每段的瞬时相位, 最后综合出整段校正函数。

针对多模传播引起的杂波频谱展宽, 主要采取以下三类方法解决。

(1) 基于二维天线阵列^[12]。天波超视距雷达采用二维天线阵列, 利用俯仰方向上的波束形成使雷达工作于单一传播模式。该方法利用高硬件配置提升系统能力, 思路简单清晰, 问题解决最彻底。但为了满足一定的俯仰、方位分辨率, 工程应用造价极高。

(2) 基于工作频率选择^[6,14]。实时选择单模或传播模式尽量少的工作频率, 最大可能地避免多模传播效应。但其对选频的要求高, 可用频率资源少。

(3) 基于信号处理技术。一是基于多模 (单模转换) 方法^[13], 该方法受传播模式数目、各模式信号幅度、多普勒频移等估计误差影响较大; 二是海杂波循环对消法^[17]。该方法受各模式信号幅度、多普勒频率、初相等估计精度影响, 通常需要多次对消来消除杂波剩余。

在雷达实际探测中, 往往是多模传播和相位扰动同时存在, 导致多普勒谱严重污染。通常情况下的处理方法为, 首先补偿相位扰动, 锐化多普勒谱, 然后估

计多模相关特性参数。当相位污染较大时, 不同模式回波即使具有完全相同的相位污染, 多模的存在也会使解污染效果不理想。而通常情况是不同模式回波受到的相位扰动影响差异较大, 这样常规方法的解污染效果将变得非常差。文献^[17]从理论仿真的角度, 采用高分辨线性时频分析方法对多模和相位污染并存的情况进行了初步的仿真研究。

本文基于对时频分析及联合时频分析方法的研 究, 主要基于二维时频分布理论, 从整个回波的时频域来分析上述复杂情况, 从而依据二维分布特性提高目标的可识别分辨力, 不采用直接解电离层污染的方法, 实现天波超视距雷达海上低速目标的检测, 并采用高频电离层返回散射探测的多模实测数据开展了实际的多模污染抑制效果分析, 结果显示在整个回波的时频域上, 杂波谱得到了较好的锐化, 海上低速目标在时频域上的细节特征较强烈地显露出来, 因此具有很高的工程应用价值。

1 时频分析方法理论

1.1 高分辨线性时频分析方法

在时频分析技术中, 当多个信号分量存在时, 线性算子例如短时 Fourier 变换中没有交叉项, 但存在时间分辨力和频率分辨力之间的矛盾, 对信号的估计精度不高。然而双线性算子, 例如经典的 Wigner-Ville 分布, 尽管可以达到较好的时频分辨能力, 但是当多个信号分量存在时, 会产生交叉项, 这些交叉项将严重掩盖微弱的目标信号, 特别是在高频天波超视距雷达中, 目标信号回波相对于强大的外部噪声以及地/海杂波来说非常弱。因此双线性的时频分析技术在单分量的情况下可以达到非常好的性能, 但不适合存在多个信号分量的天波超视距雷达回波信号的分析处理。

高分辨线性时频分析方法是对短时 Fourier 变换进行高分辨的修正。经典 Fourier 变换是分析平稳信号的有力工具^[15], 短时 Fourier 变换 (STFT) 是通过在时域给信号加滑窗的方法获得信号局部频谱。信号 $s(t)$ 的短时 Fourier 变换定义为

$$W_{\text{STFT}}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [s(t')\gamma(t' - t)] \exp(-j2\pi ft') dt'. \quad (1)$$

其中, $\gamma(t' - t)$ 为时域上的滑窗函数, 中心为 t . 由上式可见, 短时 Fourier 变换是通过在时域上给信号加滑窗的方法获得信号的局部频谱, 由于其是一种线性变换, 当多个信号分量存在时没有交叉项的问题. 但是对信号加时窗并作 Fourier 变换这种方式将带来时间分辨率和频率分辨率之间的矛盾.

高分辨线性时频分析方法对信号加较短的时窗, 利用高分辨谱估计代替式 (1) 中的 Fourier 变换. 这种方法解决了时间分辨率和频率分辨率之间的矛盾, 在二维时频域上均可达到较好的分辨能力, 同时没有引入交叉项, 从而可以发现信号 $s(t)$ 在时频域上的细节特征. 其中高分辨谱估计技术这里采用改进协方差算法. 选用这一算法的原因是通过大量仿真和实测高频雷达数据的谱分析发现, 在诸多高分辨谱估计技术中改进协方差算法最有效和可靠^[16,17].

改进协方差谱估计方法^[18,19] 是基于自回归 (AR) 模型的一种参数估计法, 这种方法中, AR 模型参数 $\alpha[i]$ ($i = 1, 2, 3, \dots, p$), p 为模型的阶数, 可通过求解以下改进的协方差方程组得到

$$\begin{bmatrix} c[1,1] & c[1,2] & \cdots & c[1,p] \\ c[2,1] & c[2,2] & \cdots & c[2,p] \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c[p,1] & c[p,2] & \cdots & c[p,p] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha[1] \\ \alpha[2] \\ \cdots \\ \alpha[p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c[1,0] \\ c[2,0] \\ \cdots \\ c[p,0] \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中,

$$c[i,j] = x^*[n-i]x[n-j]/[2(N-p)] + x[n+i]x^*[n+j]/[2(N-p)]. \quad (3)$$

$x(n)$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N$) 为需要分析的信号, N 为该信号的时间长度. 在以下仿真和试验数据分析时, 通过 p 和 N 在不同取值条件下抑制效果的比较, 确定采样长度 N 取 160, 一个采样点 250 ms, p 值取 $N/3$. 白噪声方差可由下式得到:

$$\sigma^2 = c[0,0] + \alpha[k]c[0,k], \quad k = 0, 1, \dots, p. \quad (4)$$

信号的功率谱密度 $s(f_n)$ 可由下式估计出:

$$S(f_n) = \sigma^2 / \left| 1 + \sum \alpha[k]e^{-j2\pi f_n k} \right|^2. \quad (5)$$

以上从理论角度分析了高分辨线性时频分析方法的优点, 为了验证其处理效果, 这里仿真构建具有完全不同相位扰动的两种传播模式及一个海上低速目标, 整个接收到的回波信号表示为

$$s(t) = A_1 Q_{11} + A_2 Q_{12} + A_s Q + B_1 Q_{21} + B_2 Q_{22} + n, \quad (6)$$

$$Q_{11} = \exp(j2\pi f_b t) \exp(j\varphi_1) \exp[j\phi_1(t)], \quad (7)$$

$$Q_{12} = \exp(-j2\pi f_b t) \exp(j\varphi_2) \exp[j\phi_1(t)], \quad (8)$$

$$Q = \exp(j2\pi f_d t) \exp(j\varphi) \exp[j\phi_1(t)], \quad (9)$$

$$Q_{21} = \exp(j2\pi f_b t) \exp(j\varphi_3) \exp(j\phi_2) \cdot \exp(j2\pi f_1 t), \quad (10)$$

$$Q_{22} = \exp(-j2\pi f_b t) \exp(j\varphi_4) \cdot \exp(j\phi_2) \exp(j2\pi f_1 t), \quad (11)$$

其中, A_1, A_2, B_1, B_2 分别为两种传播模式下 Bragg 峰幅度; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 分别为两多模信号 Bragg 峰初相; f_b 为 Bragg 频率, f_1 为电离层引起的多普勒频移; A_s, f_d, φ_1 分别为目标回波的幅度、多普勒频移和初相; $\phi_1(t), \phi_2(t)$ 分别为两种传播模式下的相位污染函数; n 为噪声.

仿真时假设天波超视距雷达的工作频率为 20 MHz, 一个相干积累时间内连续发射 512 个脉冲, 脉冲重复周期 250 ms. 并按式 (6) 设两种传播模式下 Bragg 信号的幅度分别为

$$A_1 = 1, \quad A_2 = 0.4, \\ B_1 = 0.5, \quad B_2 = 0.25,$$

初相

$$\varphi_1 = 0, \quad \varphi_2 = 0, \\ \varphi_3 = \pi/6, \quad \varphi_4 = \pi/6,$$

舰船回波的幅度 $A_s = 0.1$, 多普勒频移 $f_d = -0.7$ 和初相 $\varphi = \pi/4$, 电离层引起的多普勒频移 $f_1 = -0.15$, 相位污染函数分别为

$$\phi_1(t) = 2\pi \sin(0.025t), \quad (12)$$

$$\phi_2(t) = 2\pi \sin(0.074t). \quad (13)$$

图 1 为按照上述参数仿真构建的多模、含目标信号、无相位污染的频谱. 图 2 为在图 1 基础上添加相位扰动后的频谱, 明显可见多普勒展宽严重, 基本分不出模式信号, 而且完全掩盖了目标信号, 基底噪声也大幅提高.

图 3 为对污染后的信号 (见图 2) 采用常规相位梯度法, 进行带通滤波和逆快速 Fourier 变换 (FFT) 处理得到的一阶 Bragg 峰时域信号, 进而估计其瞬时频率污染的结果. 明显可以看到相位梯度法无法准确估计瞬时频率污染, 解污染后频谱展宽仍相当严重, 模式信号锐化度差, 目标信号特征没有任何显露.

采用本文所述高分辨线性时频分析方法, 对污染后的信号 (见图 2) 在整个回波时频域上进行分析, 结果如图 4 所示, 明显可见杂波谱得到了较好的锐化,

舰船目标在时频域上的细节特征也较强地显露出来.

1.2 联合时频分析方法

联合时频分析方法是一种基于两种或两种以上时频分析方法的联合变换处理方法, 该方法融合两种或两种以上时频变换方法的优点. 文献 [20] 提出将短时 Fourier 变换与 Wigner-Ville 分布 (WVD) 联合的变换方法 [20]. 本文采用短时 Fourier 变换与平滑伪 Wigner-Ville 分布 (SPWVD) 联合的变换方法, 可以得到如下变换结果:

$$C(t, f) = C_{STFT}(t, f) \cdot C_{SPWVD}(t, f). \quad (14)$$

在信号区二者均有信号项, 乘积使得信号增强, 且保

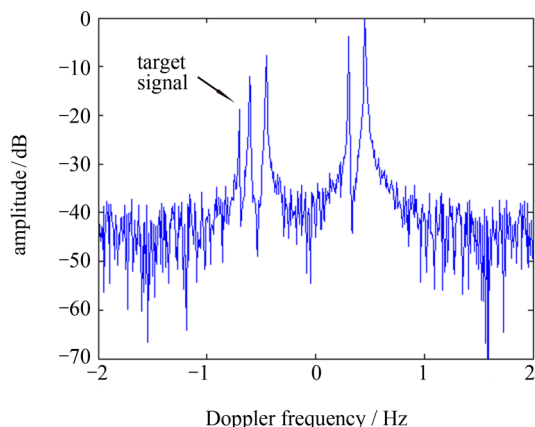


图 1 仿真构建的无污染频谱

Fig. 1 Simulation constructed non polluted spectrum

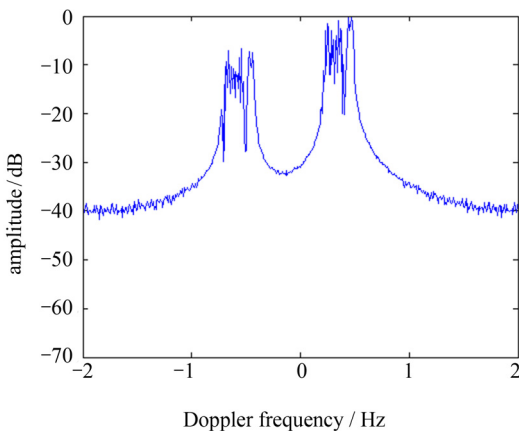


图 2 添加相位扰动后频谱

Fig. 2 Spectrum containing phase pollution

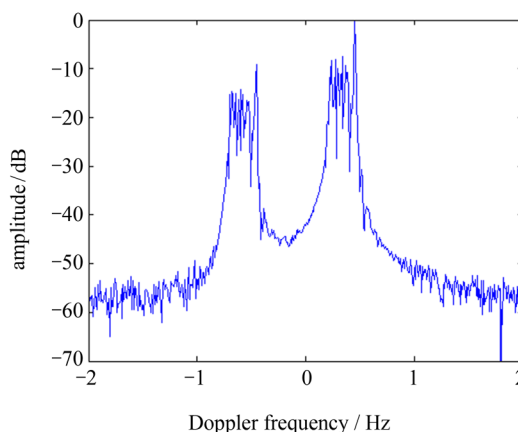


图 3 相位梯度法解污染结果

Fig. 3 Result of phase gradient method to solve the pollution

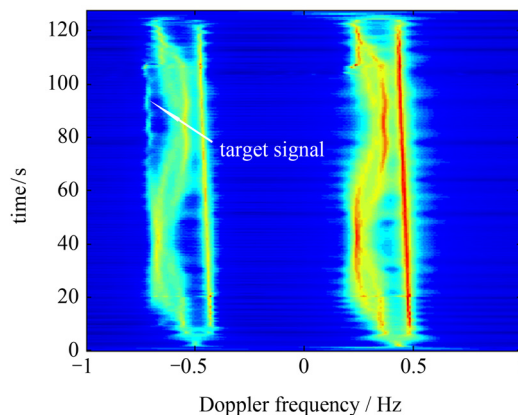


图 4 高分辨线性时频分析方法分析结果

Fig. 4 Analysis result of the high resolution linear time-frequency analysis method

留了 SPWVD 分布的高时频凝聚性; 在 $C_{SPWVD}(t, f)$ 的交叉项区, $C_{STFT}(t, f)$ 没有信号, 乘积后交叉项得到抑制. 该种联合时频分析方法融合了短时 Fourier 变换与 SPWVD 变换二者的优点, 可同时获得较高的时频凝聚性和较低交叉项.

这里的联合时频分析方法中选择 SPWVD 而非 WVD, 是由于针对多模传播和相位扰动同时存在的复杂情况, 交叉项的影响更严重, SPWVD 变换过程中考虑了有效的平滑处理, 相比 WVD 变换结果交叉项明显减少很多, 更有利于目标信号的识别检测.

图 5 为采用短时 Fourier 变换对污染后的信号 (见图 2) 在整个回波时频域上进行分析的结果, 明显可见杂波谱得到了一定程度的锐化, 目标信号在时频域上也显露出来, 但时频凝聚性较差, 杂波谱和目标信号锐化度较低.

图 6 为采用 SPWVD 对污染后的信号 (见图 2) 在整个回波时频域上进行分析的结果, 明显可见杂波谱得到了较好的锐化且时频凝聚性较高, 目标信号在时频域上较强显露, 杂波谱和目标信号锐化度较高, 但在模式信号之间或目标信号与模式信号之间存在较强的交叉项, 如果污染较强时, 这种交叉项将会严重影响目标的检测识别.

采用本文的短时 Fourier 变换与 SPWVD 结合时频分析方法对污染后的信号 (见图 2) 在整个回波时频域上进行分析的结果如图 7 所示, 明显可见杂波谱与目标信号锐化度较高, 时频凝聚性较好, 目标信号在时频域上较强显露, 信号之间的交叉项得, 有

效抑制或弱化, 更加有利于海上低速目标的检测识别, 以及多模信号的特性分析.

2 多模污染抑制结果分析

2.1 高分辨线性时频分析方法

高频电离层返回散射探测与天波超视距雷达工作于相同频段, 并且经过相同的电离层传播信道, 受电离层影响完全相同. 为了比较算法的效果, 采用高频电离层返回散射探测试验数据 (多模情况下电离层污染不明显), 人为添加相位扰动和目标信号来比较算法处理前后杂波谱锐化程度和目标可识别性.

采用高频天波返回散射电离层探测试验数据, 其工作频率 22.826 MHz, 脉冲重复周期为 100 ms, 相干

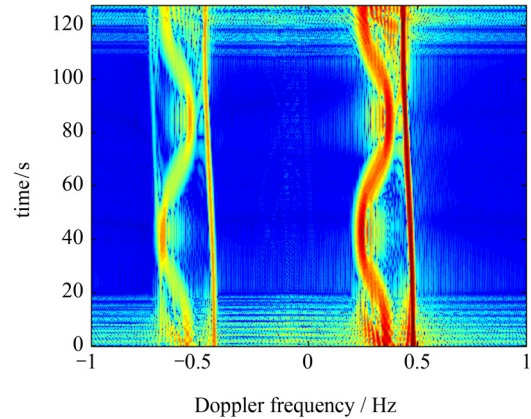


图 6 SPWVD 分析结果

Fig. 6 Analysis result of SPWVD method

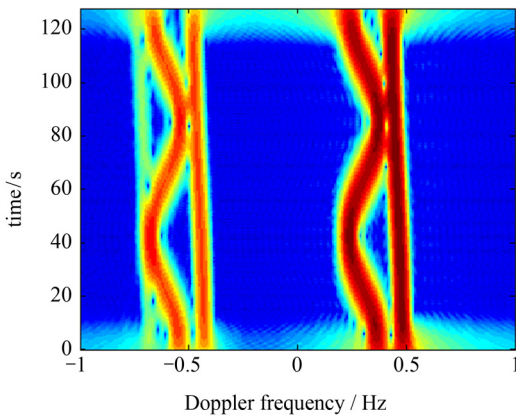


图 5 短时 Fourier 变换分析结果

Fig. 5 Analysis result of STFT method

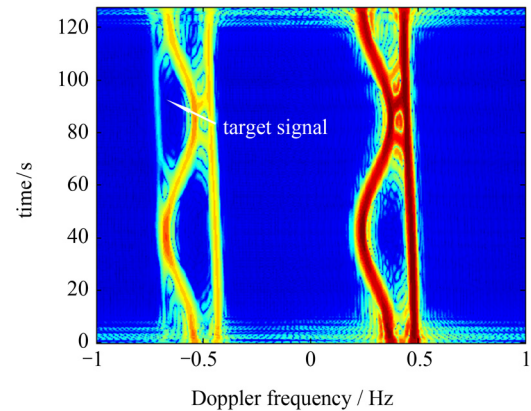


图 7 短时 Fourier 变换与 SPWVD 组合分析结果

Fig. 7 Analysis result of STFT and SPWVD combination method

积累时间 25.6 s. 其中某一个海面单元散射的回波功率谱如图 8 所示, 两个传播模式形成的 4 个突出一阶 Bragg 峰非常明显. 人为添加目标后的谱图如图 9 所示, 人为添加的相位污染如图 10 所示, 其扰动函数为

$$\phi(t) = \sin(0.1484\pi t). \quad (15)$$

受到污染后的信号功率谱如图 11 所示, 4 个一阶 Bragg 峰严重展宽, 且出现多峰现象, 给目标和多模信号的识别带来极大困难.

使用典型的时域估计补偿方法相位梯度法不但不能有效抑制电离层污染, 而且使频谱污染更加恶化, 如图 12 所示.

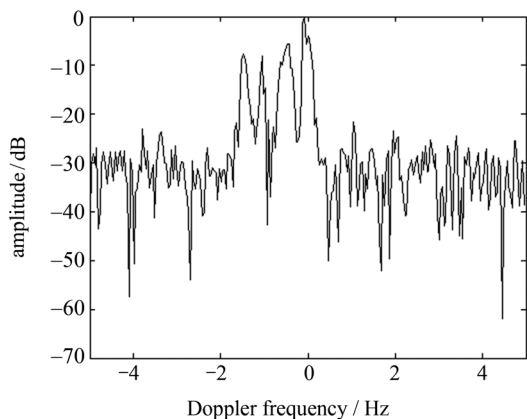


图 8 电离层返回散射探测频谱

Fig. 8 Spectrum of ionospheric backscattering detection

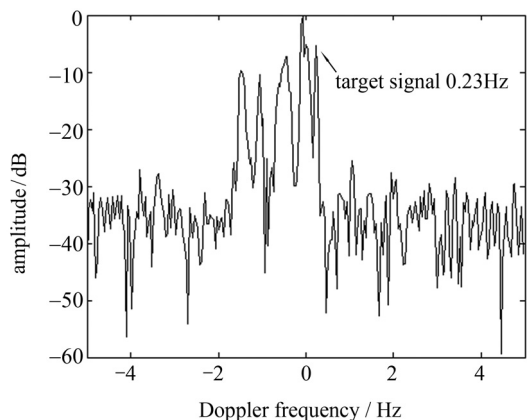


图 9 电离层返回散射探测频谱

Fig. 9 Spectrum of ionospheric backscattering detection containing the target signal

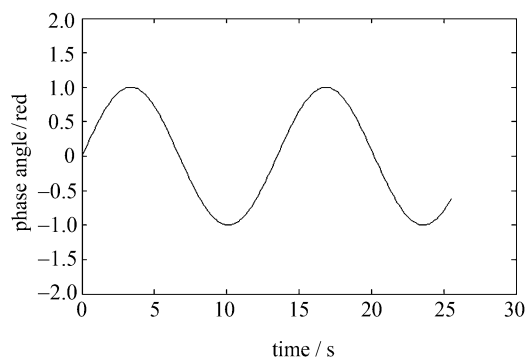


图 10 添加的污染相位

Fig. 10 Add phase pollution

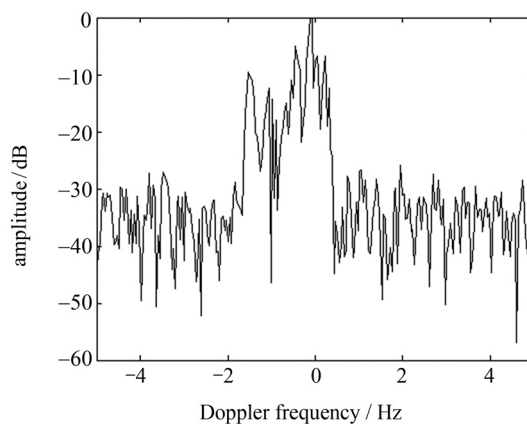


图 11 添加电离层相位污染后的频谱

Fig. 11 Spectrum containing phase pollution and the target signal

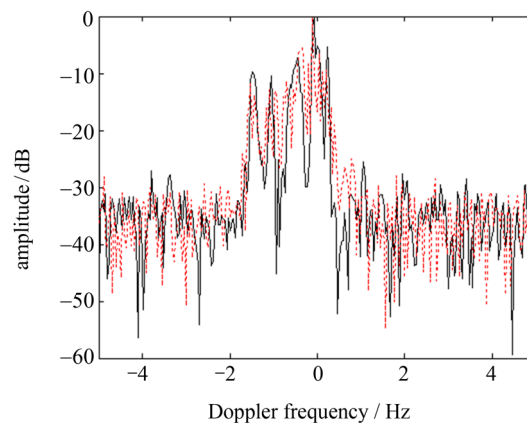


图 12 探测频谱 (黑实线) 与相位梯度法解污染结果 (红色虚线)

Fig. 12 Spectrum (black line) and spectrum of phase gradient method to solve the pollution (red dashed line)

利用高分辨时频分析的结果如图 13 所示, 明显可见在整个回波时频域上, 4 个突出的一阶 Bragg 峰得到了一定程度的锐化, 特别是目标信号在时频域上的细节特征显露清楚, 非常有利于多模传播和相位扰动并存时的目标信号检测识别。

2.2 联合时频分析方法

图 14 所示为采用 STFT 对污染后的实测数据 (见图 11) 在整个回波时频域上进行分析的结果, 明显可见杂波谱得到了一定程度的锐化, 目标信号在时频域上也显露出来, 但由于实测数据中可能存在的未知随机污染, 其时频凝聚性比仿真效果稍差。

图 15 为采用 SPWVD 对污染后的实测数据 (见图 11) 在整个回波时频域上进行分析的结果, 明显可见杂波谱得到一定程度的锐化, 目标信号细节特征在时频域上显露, 但由于实测数据中可能存在的未知随

机污染和严重的交叉项, 导致目标和多模信号的可识别性大大降低。

采用本文的短时 Fourier 变换和 SPWVD 联合时频分析方法对污染后的信号 (见图 11) 在整个回波时频域上分析的结果如图 16 所示。明显可见相比短时 Fourier 变换方法分析结果, 杂波谱和目标信号锐化度提高 (同等噪底情况下, 联合时频分析方法比短时 Fourier 变换方法分析结果目标信号展宽减小约 0.08 Hz), 时频凝聚性增强, 并且在一定程度上有效抑制或弱化了 SPWVD 方法分析结果中信号之间的交叉项, 为目标检测创造了更加有利的条件。

3 结论

目前针对多模传播引起的杂波频谱展宽问题, 多

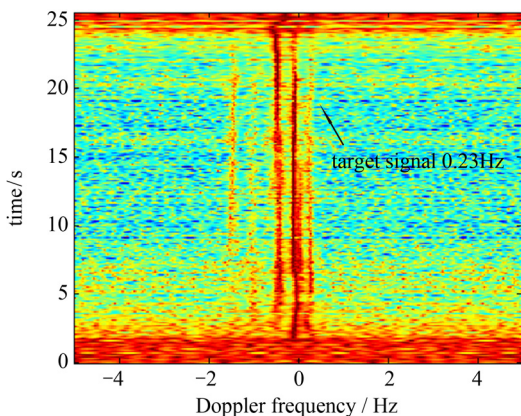


图 13 高分辨线性时频分析方法分析结果

Fig. 13 Analysis result of the high resolution linear time-frequency analysis method

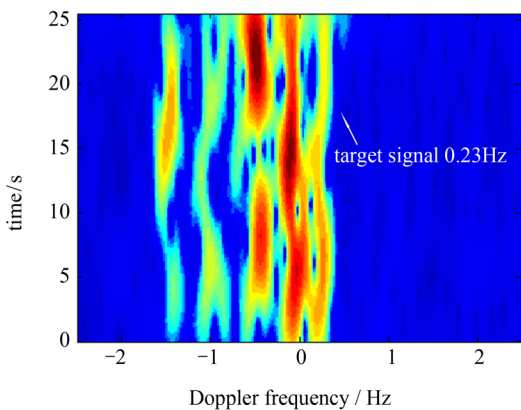


图 14 短时 Fourier 变换分析结果

Fig. 14 Analysis result of STFT method

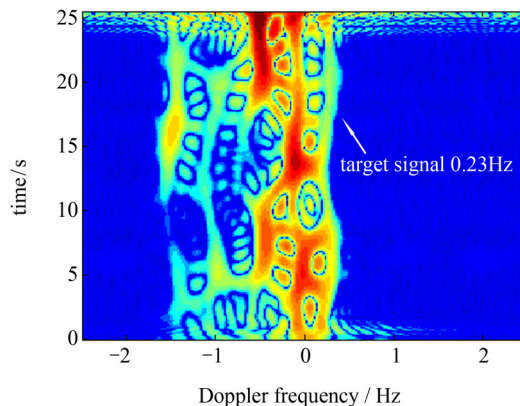


图 15 SPWVD 分析结果

Fig. 15 Analysis result of SPWVD method

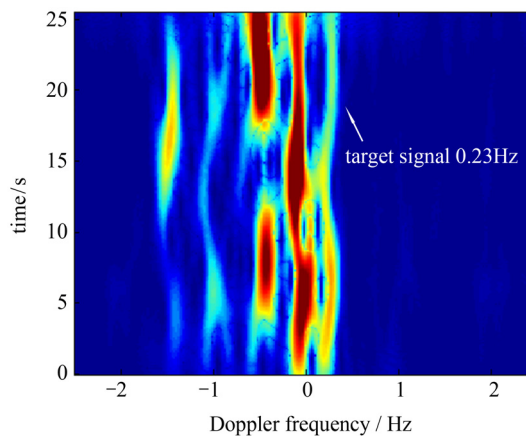


图 16 短时 Fourier 变换与 SPWVD 联合分析结果

Fig. 16 Analysis result of STFT and SPWVD combination method

采用阵列天线、工作频率选择和信号处理技术三种方法解决, 但第一种工程造价极高, 第二种需要配备专门的电离层自适应诊断管理系统, 而第三种受信号幅度、多普勒频移、初相等估计精度影响. 因此均很难满足大量研究及工程应用需求.

广泛使用的解电离层污染的典型算法, 多采用时域估计补偿方法, 以电离层相位污染的瞬时频率估计为重点, 假设能准确提取完整包含污染信息的一阶 Bragg 峰信号, 对信噪比要求严格, 使用固定带宽的带通滤波器提取杂波特征. 但其对于多个传播模式和相位污染同时存在的实际探测数据, 解污染效果均变得很差, 甚至失效.

目前针对电离层多模和相位污染并存这种复杂情况的解污染研究分析较少, 基本采用仿真构建多模信号和相位污染, 进行污染抑制研究. 因此解污染条件苛刻, 要求实测数据符合仿真试验假定的参数设置.

本文根据高分辨线性时频分析方法和联合时频分析方法的理论分析, 通过仿真构建多模和海上低速目标信号同时存在, 并且各模式受不同污染的复杂情况, 验证这两种方法多模污染抑制的有效性. 前者对信号加较短的时窗, 进而利用改进协方差方法代替 Fourier 变换, 即采用短时 Fourier 变换, 结合高分辨的修正来实现频谱的高质量锐化, 改进协方差方法基本上克服了谱线分裂、谱峰偏移和出现伪峰等缺点, 这种方法解决了时间分辨力和频率分辨力之间的矛盾, 在二维时频域上均可达到较好的分辨能力; 后者采用短时 Fourier 变换与 SPWVD 联合变换, 融合二者的优势, 同时获得较高的时频凝聚性和较少的交叉项. 针对多模与相位污染并存的复杂情况, 仿真研究结果表明, 在常规解污染算法失效的情况下, 上述两种基于时频分析方法均使杂波谱得到了较好的锐化, 目标信号在二维时频域上较强地显露出来.

通过对高分辨线性时频分析方法和联合时频分析方法特性的研究, 将两种方法应用于高频电离层返回散射探测的多模实测数据解污染研究. 结果显示, 在目前多模和相位污染并存的复杂情况下, 两种方法均取得了较好的效果, 比其他方法具有更高的频谱锐化度, 使目标信号的细节特征清楚显露. 因此对于大量研究和工程应用来讲, 高分辨线性时频分析方法和联合时频分析方法具有很高的使用价值, 特别对于电离层严重污染时天波超视距雷达海上低速目标检测

具有重要意义, 也可为多模参数估计方法研究提供更可靠的数据支撑.

高分辨线性时频分析方法中自回归模型的稳定性和阶数的确定, 不同分布特性的电离层污染抑制效果及较大的运算量及联合时频分析方法中多信号之间交叉项的有效弱化或抑制方法等问题有待于更加深入研究.

参考文献

- [1] NELASON R, MILLMAN G H. RF sky-wave backscatter radar for over-the-horizon detection[C]//Proceedings of the International Conference. London: Institution of Electrical Engineers, 1982: 97-100
- [2] HEADRICK J M. Looking over the horizon [J]. *IEEE Spectrum*, 1990, **27**(7): 36-39
- [3] ZHOU Wenyu, JIAO Peinan. Over-the-Horizon Radar Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008 (周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008)
- [4] FAN Junmei, JIAO Peinan, XIAO Jingming. The sea clutter effect on the low doppler targets detection by HF radar [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1997, **12**(2): 205-210 (凡俊梅, 焦培南, 肖景明. 海洋杂波对高频雷达检测海面上低速目标的影响 [J]. 电波科学学报, 1997, **12**(2): 205-210)
- [5] HUANG Deyao. Character of HF radar sea echo spectra and factor of the effects on the quality of the spectra [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1996, **11**(2): 94-101 (黄德耀. 高频雷达海洋回波谱特性及影响其质量的因素 [J]. 电波科学学报, 1996, **11**(2): 94-101)
- [6] LI Tiecheng, LI Xue, FENG Jing, et al. Study on OTHR multi-mode propagation suppression based on adaptive frequency selection [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2013, **28**(4): 686-691 (李铁成, 李雪, 冯静, 等. 基于自适应频率选择的 OTHR 多模传播抑制研究 [J]. 电波科学学报, 2013, **28**(4): 686-691)
- [7] BOURSILLON A, GAUTHIER F, PARENT J. Use of maximum entropy spectral analysis to improve ship detection by over-the-horizon radar [J]. *Radio Sci.*, 1987, **22**(2): 313-320
- [8] PARENT J, BOURDILLON A. A method to correct HF skywave backscattered signals for ionospheric frequency modulation [J]. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, 1988, **36**(1): 127-135
- [9] HOWLAND P E, COOPER D C. Use of the Wigner-Ville distribution to compensate for ionospheric layer movement in high frequency sky wave radar systems [J]. *IEEE Proc. F*, 1993, **140**(1): 29-36
- [10] ANDERSON S J, ABRAMOVICH Y I. A unified approach to detection, classification and correction of iono-

- spheric distortion in HF sky wave radar systems [J]. *Radio Sci.*, 1998, **33**(4): 1055-1067
- [11] LU Kun, WANG Jiong, LIU Xingzhao. A piecewise parametric method based on polynomial phase model to compensate ionospheric phase contamination [C]//Proceeding of ICASSP. Hong Kong, 2003: 405-409
- [12] BAZIN V, MOLINIE J P, MUNOZ J. A general presentation about the OTH-radar NOSTRADAMUS [J]. *IEEE Conf. Radar*, 2006, **17**(8): 634-642
- [13] YANG Zhiqun. Research on Signal processing of sky wave over-the-horizon radar [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003 (杨志群. 天波超视距雷达信号处理方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2003)
- [14] ANDERSON S J, MEI F J, JIAO P N. Enhanced OTHR ship detection via dual frequency operation [C]//Proceedings of 2001 CIE International Conference on Radar. Beijing: CIE International Conference on Radar, 2001: 85-89
- [15] ZHANG Xinda, Modern Signal Processing (2 ed.) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 (张贤达. 现代信号处理 (第2版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002)
- [16] VIZINHO A, WYATT L R. Evaluation of the use of the modified covariance method in HF radar ocean measurement [J]. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2001, **26**(4): 832-840
- [17] GUO Xin. Study on skywave over-the-horizon radar signal processing [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003 (郭欣. 天波超视距雷达信号处理技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2003)
- [18] MARPLE S L, CAREY W M. Digital Spectral Analysis with Applications [M]. *J. Acous. Soc. Am.*, 1989, **86**(5): 2043
- [19] RUANO M G, FISH P J. Cost/benefit criterion for selection of pulsed Doppler ultrasound spectral mean frequency and bandwidth estimators [J]. *IEEE Trans. BME*, 1993, **40**(12): 1338-1341
- [20] ZHANG Xin, ZHAO Yongjun. A combined transform based on STFT and WVD [J]. *Elec. Warfare*, 2008, **120**: 39-42 (张鑫, 赵拥军. 基于短时傅里叶变换和 Wigner-Vill 分布的联合变换 [J]. 电子对抗, 2008, **120**: 39-42)