

一种基于 S 变换的高频地波雷达瞬态干扰抑制方法

徐兴安, 吴雄斌, 陈骁锋, 沈志奔

(武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430072)

摘 要: 针对高频地波雷达中出现的瞬态干扰问题, 提出了基于 S 变换 (Stockwell transforms) 的瞬态干扰抑制方法. 首先分析了两次 FFT 信号处理机制下瞬态干扰的时频特征; 然后应用 S 变换对雷达信号进行时频分析, 利用瞬态干扰在时频维扩展性不同的特点, 实现瞬态干扰的检测; 最后应用三层 BP (Back Propagation) 神经网络对海洋回波信号进行预测和恢复. 该方法避免了海杂波抑制的步骤, 具有计算量小、信号损失小的优点. 现场实测数据分析表明, 该方法能够有效抑制瞬态干扰, 使回波多普勒谱信噪比提高达 10dB, 有效提高了雷达的抗干扰能力.

关键词: 高频地波雷达; 瞬态干扰抑制; S 变换; BP 神经网络;

中图分类号: TN958.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)03-0602-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.028

An Instantaneous Interference Suppression Approach Based on S Transforms

XU Xing-an, WU Xiong-bin, CHEN Xiao-feng, SHEN Zhi-ben

(School of Electronics & Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: A new method based on S transforms is proposed to suppress instantaneous interference for high frequency surface wave radar (HFSWR) application. The characteristics of instantaneous interference in time and Doppler domain were discussed within the twice-FFT signal processing framework; then S transforms was applied to outline the characteristics of instantaneous interference in time-frequency domain for interference detection and excision; finally, BP neural network was used to recover the sea echo signals. Experiment results show that the anti-interference ability is enhanced by this method, and the SNR of Doppler spectrum is improved for about 10dB.

Key words: high frequency surface wave radar; instantaneous interference suppression; S transforms; time-frequency analysis; BP neural network

1 引言

高频地波雷达利用 3 ~ 30MHz 电波沿海面传播衰减减小的特点, 能够有效照射海面数百千米范围, 实现超视距探测. 高频地波雷达主要应用于海洋表面状态参数提取和低速目标探测. 其中, 海态反演是利用波长为电磁波半波长的海浪谐振产生的一阶散射回波信号提取海流和风速信息, 雷达回波中二阶散射回波信号反演风向和浪高信息^[1]. 另外, 高频电波的波长为 10 ~ 100m, 与船只的尺寸相当, 容易产生谐振, 因而具有较好的海上目标探测潜力.

高频地波雷达的噪声和干扰主要来自于外部环境, 根据干扰的来源及特征, 主要分为: 瞬态干扰、电离层干扰 (杂波)、射频干扰. 其中, 瞬态干扰造成雷达回波多普

勒谱噪声基底大幅抬高, 将会淹没海洋回波信号和舰船目标信号, 而海态参数提取和目标检测都是基于回波多普勒谱, 因此严重的瞬态干扰将会对雷达探测性能造成灾难性影响.

目前瞬态干扰抑制方法主要包括: 时频分析类, 文献[2]和文献[3]将瞬态干扰当作奇异信号, 利用小波变换检测瞬态干扰、AR 模型 (Autoregressive Model) 线性预测方法恢复信号, 但此方法中需要先抑制海洋回波, 计算复杂度高且难以工程应用; 文献[4]和文献[5]分别利用复数经验模式分解和 AGR (the Adaptive Gaussian basis Representation) 将雷达信号分解成多个信号模式分量, 在各个分量上进行干扰抑制, 然后通过信号重构得到干扰抑制后的雷达信号, 此类方法需要搜索分解系数, 计算量较大; 图像处理类, 文献[6]利用分形维检测瞬态干

扰,利用瞬态干扰分形维与海杂波数值方向分形维差异不同,进行瞬态干扰的检测,并通过 AR 模型线性预测恢复信号;文献[7]在子空间分解进行干扰抑制的基础上,通过压缩感知技术实现信号恢复。

本文在经典的“小波分解-时域挖除-恢复”的抗干扰框架下,提出一种基于 S 变换的瞬态干扰抑制方法。S 变换是由 Stockwell 于 1996 年提出的一种时频分析方法^[8],结合了其它常用时频分析方法的优点:多分辨特性、无交叉项且计算速度快,并能够直观地得到信号能量的时频二维分布。本文中首次将 S 变换应用于瞬态干扰抑制,与经典的干扰检测-信号恢复方法相比,该方法无须进行海洋回波抑制。本文首先分析了瞬态干扰的时频特征,针对该特征提出了一种基于 S 变换的干扰抑制方法。将该方法应用于高频地波雷达 OS-MAR071,通过探测数据的处理结果,表明了该方法的有效性。

2 瞬态干扰特点

2.1 高频地波雷达信号处理流程

高频地波雷达发射线性调频中断连续波(FMICW)。在每个扫频周期,发射信号的频率从 f_0 以扫频斜率 K 线性变换,带宽为 $B = K/T$ 。

在雷达接收机中,回波信号 $S_R(t)$ 与本振信号 $S(t)$ 混频,经过低通滤波器去掉高频部分和脉冲调制,如图 1 所示:

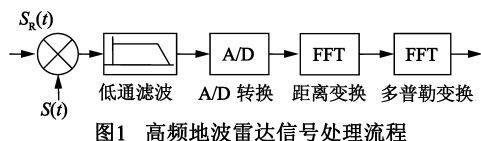


图1 高频地波雷达信号处理流程

经过 A/D 后得到距离信息和速度(多普勒)信息混在一起的基带信号。分别通过两次 FFT 实现解距离和解速度(对应多普勒频率)。第一次 FFT 后,每个谱点对应一个距离元。经过一定时间的相干积累,得到每个距离元的采样序列,对其进行第二次 FFT,即可得到相应距离的回波多普勒谱。

2.2 瞬态干扰的时频特征

瞬态干扰主要由闪电、流星余迹、突发通信信号等引起,其持续的时间一般为几毫秒到几秒。其中闪电干扰为有源干扰,不是回波信号,与雷达的发射信号不相关,经过距离变换后,闪电干扰出现在所有距离元。流星余迹回波和突发通信干扰与发射信号相关,经过解距离后,出现在某个或某几个距离元。

为了提高雷达回波信号的信噪比,高频地波雷达一般采用 10 分钟左右的相干积累时间。与之相比,瞬态干扰持续时间非常短,并且与有用信号独立不相关,因

此将其近似为相干积累时间内回波信号中的冲击函数或 Sinc 函数。经过第二次 FFT 即多普勒变换后,干扰的能量扩散到几乎所有或大部分多普勒单元上。由于干扰能量较强,造成回波多普勒噪声基底被大幅抬高。考虑到闪电干扰与流星余迹、突发通信影响的距离元不同,在后续的处理中,需要对所有距离元单独进行瞬态干扰抑制。

在高频地波雷达回波信号中,有用信号包括海洋回波信号和海面舰船回波信号。在时域上,有用信号是各自连续相关的。在多普勒频域上,一阶海洋回波信号表现为两个正负理论布拉格频率附近的尖峰(即一阶峰),二阶海洋回波信号能量较弱,出现在一阶峰附近,舰船回波信号出现在那些与其径向速度对应的多普勒频点上。与上述有用信号相比,瞬态干扰具有持续时间短、多普勒频率扩展性强的特点,在时域、多普勒域都表现出了完全不同的特征。因此,通过 S 变换得到雷达回波信号的能量时频二维分布,能够较为容易的在时频域实现瞬态干扰的检测。

3 基于 S 变换的瞬态干扰抑制算法

在高频地波雷达回波信号中,海洋回波信号为主要成分。基于前述干扰与有用信号的不同时频特征,这里提出一种利用 S 变换结合 BP 神经网络的瞬态干扰抑制方法。

3.1 S 变换

给定一个离散时间序列 $h(n)$, 其 S 变换为:

$$S(p, n) = \begin{cases} \sum_{m=0}^{N-1} H[m+n] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi mp}{N}}, & n \neq 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h(m), & n = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, p 为多普勒频率序号, n 为时间序号, $H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-\frac{2\pi^2 kn}{N}}$ 为离散傅立叶变换。在计算中采用快速傅立叶变换 FFT 可以大幅降低 S 变换的计算量。

3.2 基于 S 变换的瞬态干扰检测

对于给定阵元和距离元的回波信号 $x(n)$, 通过 S 变换将其映射到时频二维平面上:

$$X(p, n) = ST(x(n)) \quad (2)$$

根据海洋回波的特点,容易按照多普勒频率将时频二维平面分为四个区域:零频区域、一阶散射区域、二阶谱区域以及高阶散射和高斯噪声区域。海上舰船等目标信号根据其速度与多普勒频率的关系分布在这四个区域上。

瞬态干扰只出现在二维平面的某些时刻,在其出现的时刻,多普勒频率横跨上述四个区域,表现出很强

的多普勒频率扩展性. 一阶散射区域和零频区能量较强, 影响干扰的检测, 但其边界较为明显, 因此将除此两个区域以外的时频平面沿多普勒频率积分, 得到新的时间序列:

$$\mathbf{x}_1(n) = [x_1(1), \dots, x_1(i), \dots, x_1(N)]^T \quad (3)$$

其中, N 为扫频周期数.

在 i 时刻, 若无干扰, 则 $x_1(i)$ 中包括海洋回波二阶、高阶散射信号和高斯噪声, 但其能量较弱; 若存在干扰, 除了海洋回波二阶散射信号、目标和噪声外, $x_1(i)$ 还包括能量扩展到在大多数多普勒频率上的瞬态干扰, 且积分后瞬态干扰能量聚集. 因此, 将干扰的检测转化为二元检测问题:

$$\begin{cases} x_1(i) \geq T, & \text{存在干扰} \\ x_1(i) < T, & \text{无干扰} \end{cases} \quad (4)$$

其中, T 为阈值, 设置方法如下:

(1) 对序列 $\mathbf{x}_1(n)$ 进行从小到大的排序;

(2) 选取前 $1/2$ 长度的子序列 (即选取未被干扰影响的信号), 计算均值 u 和方差 σ ;

(3) 计算阈值: $T = u + \alpha * \sigma$, 其中 α 为调节因子, 取值为 $2 \sim 4$.

通过此方法可以检测到瞬态干扰出现的时刻, 将此时刻的采样信号置零, 即可实现干扰的抑制.

3.3 信号恢复

干扰被抑制的同时, 有用信号的连续性和相干性也受到了破坏, 因此需要对回波信号进行恢复.

Haykin 等通过试验证明了海洋回波为混沌信号^[9], 具有部分确定性信号的特征, 因此在较短的时间尺度内可以通过人工神经网络对其进行建模. BP (反向传播) 神经网络是 1986 年由 Rumelhart 和 McClelland 为首的科学家小组提出, 是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络, 是目前应用最广泛的神经网络模型之一, 非常适用于非线性预测问题^[10]. 因此, 本文采用 BP 神经网络对雷达信号进行恢复.

本文选择的 BP 神经网络为 3 层结构, 包括输入层、隐含层、输出层. 给定一个长度为 N 的回波信号 $\mathbf{x}(n)$, 其中任意一点 $x(n)$ 可以通过非线性方程 $f(x)$ 得到, 方程的输入为该点之前的 M 个采样点 $[x(n-M+1), \dots, x(n-1)]$.

M 为 BP 神经网络的输入神经元个数, 与海洋回波信号的相关时间有关. 经过测试, 输入神经元数小于 24 (约为 15s) 时预测误差保持稳定, 幅度绝对误差小于 2.7×10^{-3} , 这与海洋回波信号相关时间一致. 选取输入神经元数为 24, 输出神经元个数为 1. 隐含层神经元数根据经验公式 $L = \sqrt{M+d} + \lambda$ 进行设计, 其中 L 为隐含层神经元数, $M = 24$ 为输入神经元数, $d = 1$ 为输出神

经元数, λ 为 $1 \sim 10$ 的常数, 由此计算得 $L = 15$. 考虑到训练样本中包含了正、负数, 所以最后采用正切函数形式的 Sigmoid 函数作为隐含层神经元的激活函数.

采用 BP 神经网络进行雷达回波信号恢复的具体流程如下:

(1) 使用前文所述的干扰检测方法确定瞬态干扰出现的时刻, 将该时刻的采样值置零;

(2) 确定 BP 神经网络的参数;

(3) 将采样序列分为 $N-M$ 个长度为 $M+1$ 的子序列, 将其中包含 0 值的子序列剔除, 将剩余的子序列作为样本代入网络进行训练, 其中前 M 个采样为网络输入值, 第 $M+1$ 个采样为网络输出值;

(4) 依次将干扰时刻的前 M 个采样作为输入代入训练好的网络, 输出即为经过网络恢复的雷达信号.

4 实测数据处理结果

利用上述方法对位于福建龙海的中程高频地波雷达 OSMAR071 实测数据进行处理. OSMAR071 是武汉大学电波传播实验室研制的阵列式高频地波雷达 OSMAR 系列的定型产品, 主要用于海洋表面状态参数探测. 其主要参数如表 1 所示:

表 1 OSMAR071 参数表

工作频率	7.5MHz	扫频带宽	30kHz
扫频周期	0.6528s	相干积累时间	$1024 * 0.6528s$
距离分辨率	5km	多普勒分辨率	0.0015Hz
最大探测距离	250km	平均发射功率	200W

雷达站所在地福建龙海位于热带边缘地区, 8 月份处于闪电易发季节, 气象活动较为活跃, 因此瞬态干扰对雷达探测影响较大. 选取 2008 年 8 月 2 日 5:30 的雷达回波数据, 图 2 为实测数据的距离-多普勒谱, 从图中可以看出几乎所有距离元都受到瞬态干扰的影响, 造成整个距离-多普勒谱都被瞬态干扰污染. 在雷达回波中, 远距离元处雷达回波能量较弱, 可以在时域直接检测瞬态干扰, 而近距离元处于干扰与雷达回波信号能量相当, 难以在时域进行干扰检测.

通过干扰抑制算法对每个距离元的回波信号进行处理. 图 3 为其中第 10 个距离元回波的时频分布谱图, 从图中可以看出位于 ± 1 归一化多普勒频率处的一阶峰. 瞬态干扰为沿多普勒频率分布的竖直亮条带, 出现在第 600、800 附近的时刻, 从时频图中可以清晰的看出瞬态干扰具有的持续时间短、多普勒扩展强的特点. 按照前述方法对一阶峰和零频之外的能量进行积分, 瞬态干扰扩散到多普勒单元的能量聚集起来, 计算阈值后, 通过二值检测实现干扰的抑制.

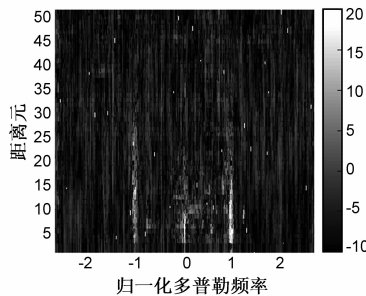


图2 OSMAR071回波距离-多普勒谱

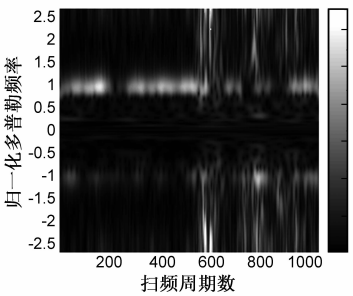


图3 第10个距离元回波的时-频谱

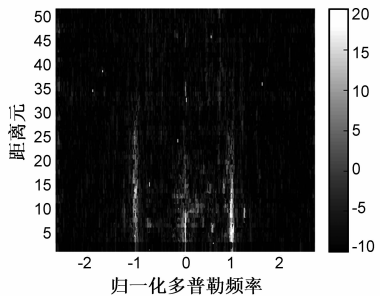


图4 对图2回波数据处理后距离-多普勒谱

图 4 为经过干扰抑制和信号恢复后的回波谱图.其中.与图 2 处理前的谱图进行对比,噪声基底大幅降低,一阶峰更加清晰可见.

为进一步验证方法的有效性,图 5 给出通过本文方法与经典“小波分解-时域挖除-AR 恢复”方法抑制前后的多普勒谱对比.经典方法中采用 Hankel 矩阵进行海杂波抑制,三层小波分解检测干扰,48 阶 AR 模型实现信号恢复.图 5(a)、图 5(b)分别为第 10、20 个距离元的多普勒谱,点线为处理前的回波多普勒谱,点划线和实线分别为经典方法与本文方法的处理结果.从图中看出,处理前噪声基底较高,部分多普勒频点的能量甚至与一阶峰相当.经过处理后,瞬态干扰被有效抑制,多普勒谱中的噪声基底大幅下降,布拉格谐振峰的 SNR 被有效提高,其中经典方法上升约 5dB,本文方法 SNR 被提高超过 10dB.处理后一阶峰的能量有 3 ~ 5dB 的损

失,这是因为经过干扰抑制后,扩散到一阶峰的干扰能量也被有效抑制.因此,本文方法在有效抑制抑制干扰的同时,实现了海洋回波信号的恢复.

5 结论

本文提出了一种基于 S 变换的高频地波雷达瞬态干扰抑制方法,该方法充分利用瞬态干扰持续时间短、多普勒扩展强的特点,通过时频分析和设置自适应权值进行干扰检测和抑制;并利用 BP 神经网络实现海洋回波的预测与恢复.该方法避免了海洋回波抑制,具有计算量小、信号损失小的优点.该方法已经应用于 OSMAR071 系统的实时信号处理中.通过实测数据处理对比,证明了该方法的有效性,处理后多普勒信噪比改善约 10dB.

参考文献

[1] 李伦,吴雄斌,龙超,等.基于正则化方法的高频地波雷达海浪方向谱反演[J].地球物理学报,2013,56(1):219 – 229.
Li Lun,Wu Xiong bin,Long Chao,et al.Regularization inversion method for extracting ocean wave spectra from HFSWR sea echo[J].Chinese Journal Geophysics,2013,56(1):219 – 229.(in Chinese)
[2] Turley M.Impulsive noise rejection in HF radar using a linear prediction technique[A].Radar Conference[C]Huntsville,Alabama,USA:IEEE,2003.358 – 362.
[3] 黄亮,文必洋,邓巍.高频地波雷达抑制瞬态干扰研究[J].电波科学学报,2004,19(2):166 – 170.
Huang Liang,Wen Bi-Yang,Deng Wei.Suppressing instantaneous interference of high frequency ground wave radar[J].Chinese Journal of Radio Science,2004,19(2):166 – 17.(in Chinese)
[4] 周忠根,水鹏朗.基于复数据经验模式分解的天波超视距雷达瞬态干扰抑制[J].电子与信息学报,2011,33(12):2831 – 2836.
Zhou Zhong-gen,Shui Peng-lang.Transient interference suppression based on complex empirical mode decomposition in

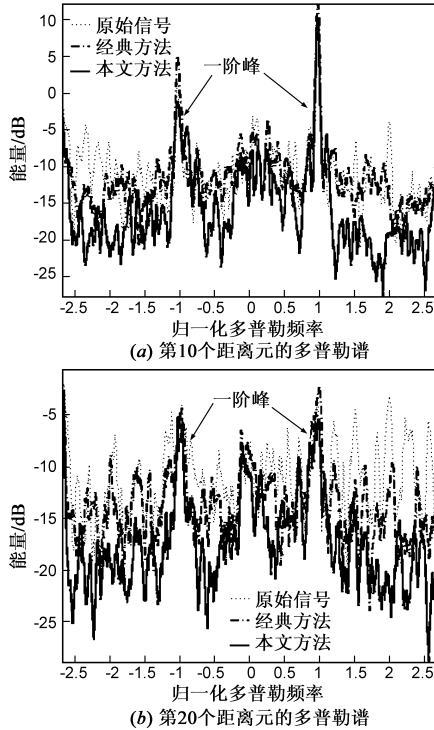


图5 处理前后的10、20距离元的多普勒谱

- over-the-horizon radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(12): 2831 – 2836. (in Chinese)
- [5] Xin G, Hongbo S, Tat S Y. Transient interference excision in over-the-horizon radar using adaptive time-frequency analysis [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2005, 43(4): 722 – 735.
- [6] 王阶, 刘涛, 陈晓旭, 等. 天波超视距雷达流星余迹瞬态干扰抑制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(10): 67 – 72.
- Wang Jie, Liu Tao, et al. Method of meteor trail impulsive interference suppression in OTHR[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(10): 67 – 72. (in Chinese)
- [7] Quan Y H, Xing M D, Zhang L, et al. Transient interference excision and spectrum reconstruction for OTHR[J]. Electronics Letters, 2012, 48(1): 42 – 44.
- [8] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 1996, 44(4): 998 – 1001.
- [9] Haykin S, Bakker R, Currie B W. Uncovering nonlinear dynamics-the case study of sea clutter[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(5): 860 – 881.
- [10] 鲁智勇, 张权, 张希, 等. 等效分组级联 BP 网络模型及其应用[J]. 电子学报, 2010, 38(06): 1349 – 1354.
- LU Zhiyong, ZHANG Quan, et al. Equivalent grouping cascaded BP network model and its applications[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(06): 1349 – 1354. (in Chinese)

作者简介



徐兴安 男, 1987 年生于新疆拜城, 武汉大学电子信息学院在读博士研究生. 主要研究方向为高频超视距雷达信号处理.

E-mail: iamxxa@whu.edu.cn



陈晓锋 男, 1897 年生于湖北黄石. 武汉大学电子信息学院在读博士研究生.



吴雄斌 男, 1968 年生于湖北大冶, 博士, 武汉大学电子信息学院空间物理系主任, 教授, 博士生导师. 主要研究方向为无线电波传播、无线电海洋遥感.

E-mail: xbwu@whu.edu.cn



沈志奔 男, 1986 年生于湖北襄阳. 武汉大学电子信息学院在读博士研究生.