

高频返回散射系统中一种非长干扰的抑制方法

蔚 娜,李铁成,柳 文,凡俊梅

(中国电波传播研究所,山东青岛 266107)

摘 要: 高频返回散射系统工作在 HF 频段,这一频段电磁环境非常复杂,并且存在各种类型的干扰,这些干扰严重影响了系统的工作性能,必须加以抑制.通过对高频返回散射系统实测数据中存在的干扰进行分析,发现有种干扰在 Doppler 域相邻 Doppler 单元以及相邻距离单元均有较强的相关性.针对这种干扰,提出了一种 Doppler 域基于特征子空间的干扰抑制方法,即在 Doppler 域构造干扰协方差矩阵,进行特征分解得到干扰子空间,然后将待处理单元的回波向干扰子空间的正交补空间投影,从而将干扰滤除.实测数据处理结果证明了该方法的有效性.

关键词: 高频返回散射系统;瞬态干扰;冲击干扰;短干扰;干扰抑制

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 03-0620-06

An Approach of Suppressing Non-Long Interference in HF Backscatter System

WEI Na, LI Tie-cheng, LIU Wen, FAN Jun-mei

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao, Shandong 266107, China)

Abstract: HF band is a severe electromagnetic environment in which HF backscatter system works. All kinds of interference in this band having a strong impact on the system's performance must be suppressed. Through analyzing the interference of the measured data of HF backscatter system, we find that some interference appears strong correlativity between adjacent range units and between adjacent Doppler units, respectively. Aiming at this kind of interference, an interference suppressing method which is based on eigen subspace in Doppler field is proposed. The method is: firstly, interference covariance matrix is constructed in Doppler field, after eigenvalue decomposition of this matrix, the interference subspace is obtained, then the pending units are projected to the orthogonal supplement of the interference subspace, finally, the interference is excised. The results of applying this method to the measured data show the effectivity of the proposed method.

Key words: HF backscatter system; transient interference; impulse interference; short interference; interference suppressing

1 引言

高频(HF)返回散射系统是将电离层、地面和海面作为反射电波的介质,收集基本上按原路返回的电波并从中提取有用信息的系统,该系统工作在 3MHz ~ 30MHz 的 HF 频段.然而这一频段电磁环境比较恶劣,且存在着很强的干扰,工作在这一频段的返回散射系统不可避免地会受到这些干扰的影响,从而使有用信息的提取变得困难或者根本无法提取.因此,如何有效抑制这些干扰,是急需解决的前沿课题之一.外部干扰存在形式多种多样,文献[1]根据干扰存在时间相对于脉冲重复周期(PRI, Pulse Repeat Interval)和相干积累时间(CIT, Coherent Integration Time)的长短,将干扰分为三类:第一

类是只存在于一个脉冲重复周期内的干扰,称为冲击干扰或瞬态干扰;第二类是存在于若干个重复周期但远短于 CIT 的干扰,称为短干扰;第三类是存在时间与 CIT 相当或者更长的干扰,称为长干扰.在本文采用的返回散射系统的实测数据中,常见的是第一、二类干扰,因此本文主要对这两类的干扰抑制进行了研究.

近年来,人们提出了许多干扰检测和抑制的方法:文献[1,2]利用小波变换对干扰进行检测;文献[3]首先对地、海杂波进行抑制,然后对干扰进行检测;文献[4,5]通过无目标距离单元干扰样本值估计出干扰的统计特性,利用特征分解及投影的方法对干扰进行抑制;文献[6]提出了基于矩阵奇异值分解的高频雷达瞬态干扰抑制方法.通过对实测数据中存在的干扰进行分析,发

现常见的第一、二类干扰的特性也不尽相同,其中有种干扰在 Doppler 域相邻 Doppler 单元和相邻距离单元均有较强的相关性,本文对存在这种干扰的实测数据应用上述干扰抑制算法进行干扰抑制,处理结果都不是太好,因此,根据这种干扰的特性,提出了一种 Doppler 域基于特征子空间的干扰抑制方法。

2 已有干扰抑制方法

2.1 基于小波变换的干扰抑制方法

权太范等^[2]通过对信号的分析,发现冲击干扰或短干扰在高频地波雷达接收数据时域表现出区别于目标回波信号的奇异性特征.根据干扰的这一特点,提出了利用小波分析技术检测干扰的方法.文献^[2]指出,在时域干扰的 Lipschitz 指数为负数,而回波信号的 Lipschitz 指数为正数,因此可以检测和判断干扰出现的位置.文献^[2]进行小波变换时采用的是多分辨分析的快速算法^[7],检测出冲击干扰位置后,将其剔除,然后通过建立接收信号的时域短期 AR 预测模型^[8]来产生预测数据,替换受到干扰的信号,达到抑制干扰的目的.该算法有几个关键问题所在:(1)选择什么样的小波基(即滤波器系数);(2)进行几级分解;(3)各级判决门限如何确定;(4)预测模型阶数如何确定.这些参数需要对大量实测数据进行统计才能确定.

文献^[1]也提出了利用小波变换进行干扰抑制的方法,该方法对干扰的检测、剔除以及插值过程都是在小波分解和重构过程中完成的,更易于工程实现,并且采用的是非抽取的小波变换,因此克服了文献^[2]中小波变换在取样过程中漏采干扰奇异点的缺陷.但是该方法也同样存在文献^[2]的方法所面临的前三个问题.

2.2 基于特征子空间的干扰抑制方法

文献^[3]利用干扰远强于目标回波,但比起地、海杂波来并不是很强的特点,提出先将地、海杂波滤除,再用门限检测干扰,从而将其挖除,用 Burg 法预测挖除点.对地杂波背景,先对各个距离单元的回波信号作傅立叶变换,得到各个单元的 Doppler 谱,在 Doppler 域抑制地杂波所占的 Doppler 频谱,再通过逆傅立叶变换返回信号时域,根据一定的门限,检测干扰,在未滤除地杂波的原始回波中挖除存在干扰处的回波,并通过内插补上挖除点的值;对海杂波背景,利用相邻距离单元海杂波相关性较强而干扰相关性较弱,首先根据一些相邻距离单元估计接收信号的短期时变协方差矩阵,对协方差矩阵作特征值分解,将信号向最小特征矢量上投影得到滤除海杂波的信号,然后与给定门限比较,检测干扰并挖除,预测挖除点.但对实测数据的分析发现,在抑制地杂波时,还需要实时估计出地杂波所占的 Doppler 频谱,并且干扰在相邻距离单元也存在较强的

相关性,如果将信号向最小特征矢量上投影,得到的信号不仅滤除了海杂波,同样干扰也被滤除了,另外,还要确切知道地海杂波存在的距离单元才能对地海杂波进行滤除.

文献^[4]利用短波通信干扰对高频地波雷达的探测距离单元均有影响的特点,提出在时域的无地海杂波单元取得短波通信干扰的样本,并由这些样本估计出短波通信干扰所在的干扰子空间,然后将待处理单元的回波向干扰子空间的正交补空间投影,从而将短波通信干扰滤除.但对返回散射系统来说,干扰可能只影响部分探测距离单元(见图 1),就有可能出现取不到无地海杂波只存在短波通信干扰的单元的情况.

2.3 基于 SVD(奇异值分解)的干扰抑制方法

文献^[6]提出了基于矩阵奇异值分解的高频雷达瞬态干扰抑制方法,该方法将高频雷达回波信号分段构造成矩阵并进行奇异值分解,首先根据矩阵有效秩的大小判断雷达回波中是否存在瞬态干扰,然后利用奇异值分解的正交性实现雷达回波的正交分解,使瞬态干扰分离出来,以利于检测,最后对瞬态干扰位置处的回波信号进行恢复.但是,文献^[6]指出,根据矩阵有效秩的大小判断雷达回波中是否存在瞬态干扰,有效秩判断使用的阈值大小在实际应用中仍需要进一步解决.并且如何判断干扰成分与哪个主奇异值相对应也没有具体说明.

3 高频返回散射系统实测数据分析

图 1 和图 2 分别是高频返回散射系统于 2007 年 09 月 21 日 14 时 38 分和 2007 年 09 月 21 日 14 时 23 分录取的数据(分别记为 data1 和 data2)得到的时域图.由图可以看出,这些瞬态干扰或短干扰有的存在于整个探测距离单元,有的存在于近处的探测距离单元.图 3 和图 4 分别是 data1 和 data2 对应的 Doppler 域的图,由图中可以看出,这些干扰在 Doppler 域有很宽的谱,严重影响有用信息的提取.

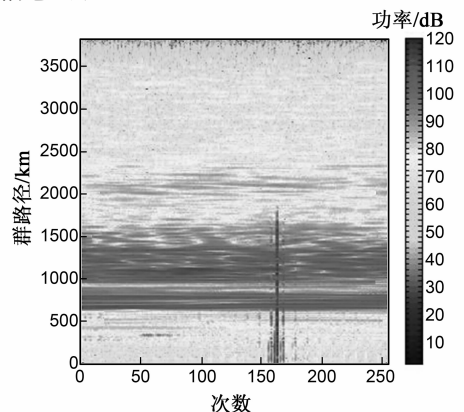


图1 data1数据时域图

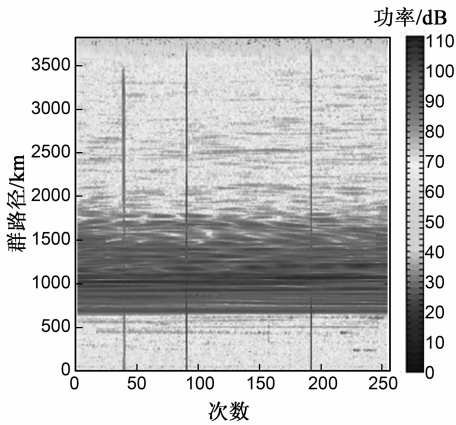


图2 data2数据时域图

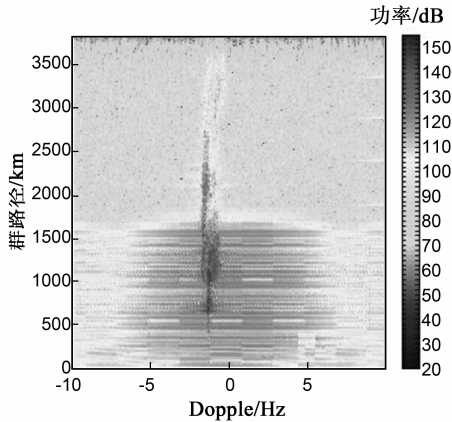


图3 data1数据群路径-Doppler谱图

图5是 data1 数据 500km 单元处回波数据的 Wigner-Ville 时频分布(WVD)图,图6和图7分别是 data2 数据 500km 和 2000km 单元处回波数据的 WVD 图,由图中可见干扰存在于整个 Doppler 域,并且相邻 Doppler 单元具有较强的相关性. data1 和 data2 这两组数据中存在的干扰具有共同的特点,即在 Doppler 域相邻 Doppler 单元和相邻距离单元均有较强的相关性.根据这种干扰的特点,考虑在 Doppler 域进行干扰抑制.

4 Doppler 域基于特征子空间的干扰抑制方法

根据前一节分析的这种干扰的特点,考虑在

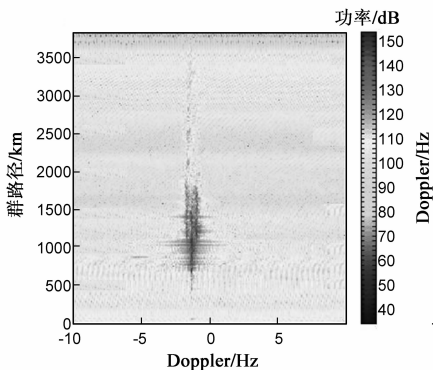


图4 data2数据群路径-Doppler谱图

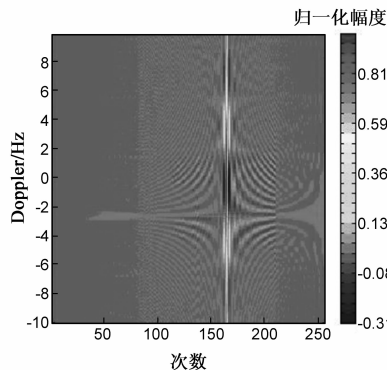


图5 data1中500km处数据时频分析

Doppler 域采用基于特征子空间的方法对干扰进行抑制,基本思路是:首先将脉压后的回波信号变换到 Doppler 域,在 Doppler 域构造干扰协方差矩阵,进行特征分解,得到干扰子空间,然后将待处理单元的回波向干扰子空间的正交补空间投影,从而将干扰滤除.具体算法如下:

(1)将收到的 N 次 M 个距离单元的回波数据变换到 Doppler 域得到一个 $M \times N$ 数据矩阵 X ,其中第 m 行第 n 列的数据 $x_{m,n}$ 表示第 m 个距离单元第 n 个频点的值.

(2)将具有 M 个距离单元的数据矩阵 X 分成 K 个距离块 $X_k (k=1, \dots, K)$,每个距离块内包含 $P = \frac{M}{K}$ 个距离单元,即:

$$X_k = \begin{bmatrix} x_{(k-1)P+1,1} & x_{(k-1)P+1,2} & \cdots & x_{(k-1)P+1,N} \\ x_{(k-1)P+2,1} & x_{(k-1)P+2,2} & \cdots & x_{(k-1)P+2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(k-1)P+P,1} & x_{(k-1)P+P,2} & \cdots & x_{(k-1)P+P,N} \end{bmatrix}$$

(3)取出不含地海杂波的数据,由于地海杂波的主要能量集中在 $\pm 2\text{Hz}$ 范围内,因此设定 $\pm 2\text{Hz}$ 为界限,即对每个距离块取出频点小于 -2Hz 和大于 2Hz 的数据构造协方差矩阵.假设, $-2\text{Hz} \sim 2\text{Hz}$ 对应的点为 $n_1 \sim n_2$,则取出的数据点应为:

$$\bar{X}_k = \begin{bmatrix} x_{(k-1)P+1,1} & \cdots & x_{(k-1)P+1,n_1-1} & \cdots & x_{(k-1)P+1,n_2+1} & \cdots & x_{(k-1)P+1,N} \\ x_{(k-1)P+2,1} & \cdots & x_{(k-1)P+2,n_1-1} & \cdots & x_{(k-1)P+2,n_2+1} & \cdots & x_{(k-1)P+2,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(k-1)P+P,1} & \cdots & x_{(k-1)P+P,n_1-1} & \cdots & x_{(k-1)P+P,n_2+1} & \cdots & x_{(k-1)P+P,N} \end{bmatrix}$$

构造的第 k 个距离块的协方差矩阵为:

$$R_k = \frac{1}{(N - (n_2 - n_1 + 1))} \bar{X}_k \bar{X}_k^H$$

将 R_k 作特征值分解,其中特征值明显大的若干个(设为 r_k 个,一般取 1~3 个)对应的特征向量所张成的空间为干扰子空间,以 $s_{k1}, s_{k2}, \dots, s_{kr_k}$ 表示.对当前距离块

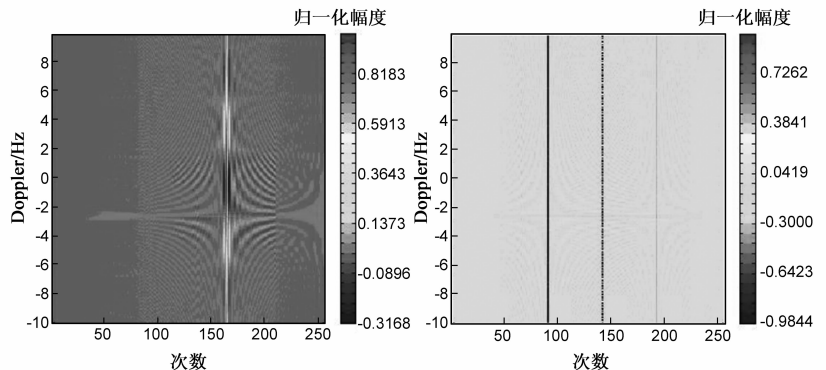


图6 data2中500km处数据时频分析

的第 $n(n=1, \dots, N)$ 个频点的数据矢量向噪声子空间投影, 即:

$$y_{k,n} = x_{k,n} - \sum_{i=1}^{r_k} s_{ki} s_{ki}^H x_{k,n}$$

其中,

$$x_{k,n} = [x_{(k-1)P+1,n} \quad x_{(k-1)P+2,n} \quad \dots \quad x_{(k-1)P+P,n}]^T$$

则 $y_{k,n}$ 就是去除干扰后的 Doppler 域数据矢量.

(4) 依照上述方法对每个距离块分别进行处理.

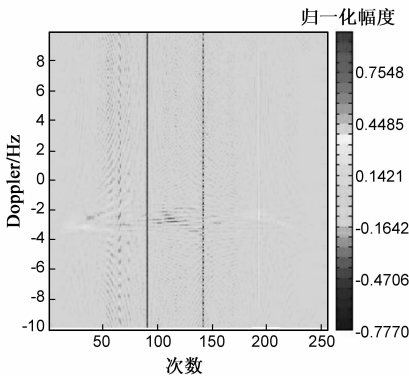


图7 data2中2000km处数据时频分析

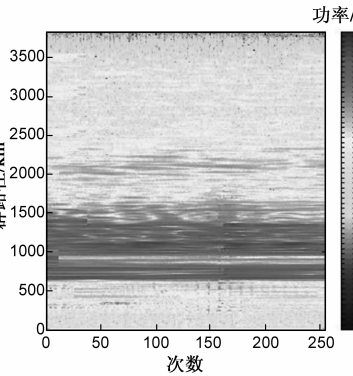


图8 采用文献[2]算法进行干扰抑制后 data1数据时域图

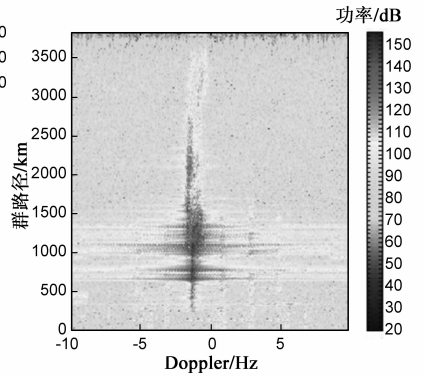


图9 采用文献[2]算法进行干扰抑制后 data1数据群路径-Doppler谱图

5 信号处理结果分析

对实测数据 data1, 分别采用本文提出的方法, 以及文献[1,2]的方法进行了处理, 处理结果如图 8~图 16 所示. 因为 data1 数据远处距离单元不存在干扰, 虽然

近距离单元可以取出只含干扰的数据, 但是考虑到工程应用中究竟要取近处的多少距离单元还要具体计算, 因此 data1 数据未采用文献[4]算法. 对实测数据 data2 分别采用本文算法, 以及文献[1,2,4]的方法进行了处理, 处理结果如图 17~图 27 所示.

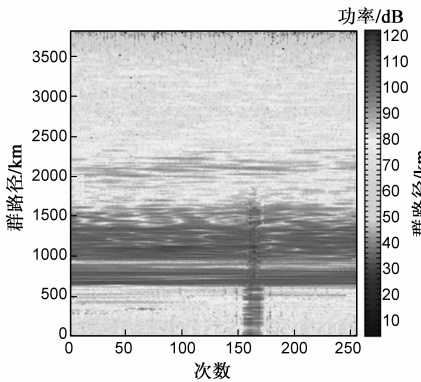


图10 采用文献[1]算法进行干扰抑制后 data1数据时域图

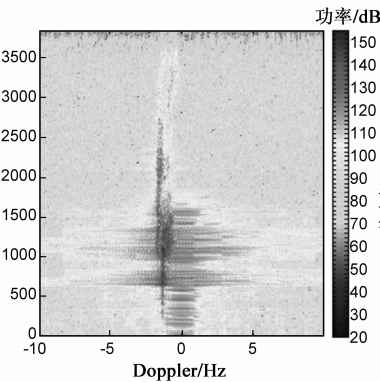


图11 采用文献[1]算法进行干扰抑制后 data1数据群路径-Doppler谱图

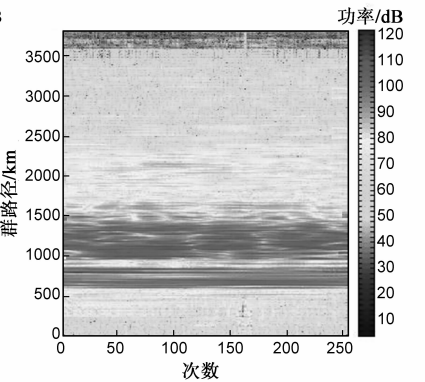


图12 采用本文算法进行干扰抑制后 data1数据时域图

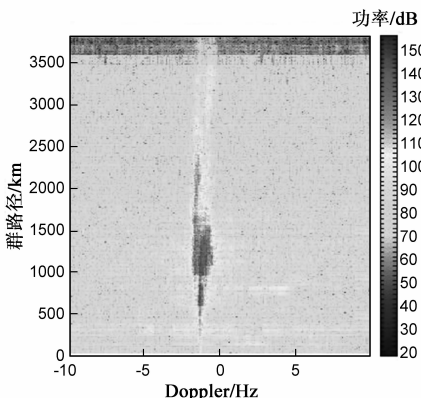


图13 采用本文算法进行干扰抑制后 data1数据群路径-Doppler谱图

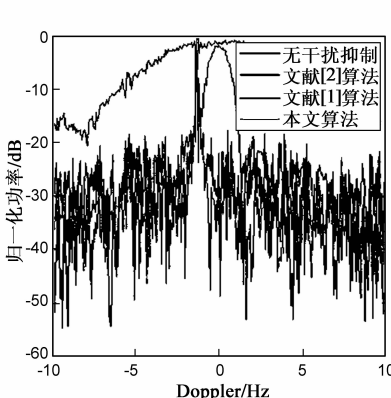


图14 data1数据451.8km处各种干扰抑制算法比较

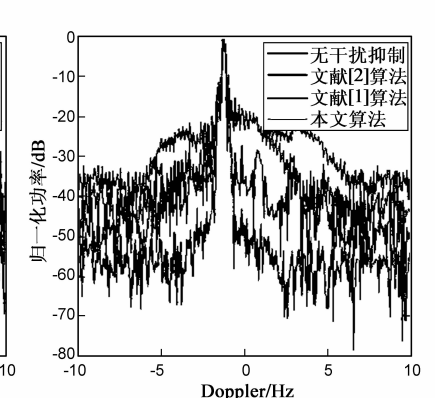


图15 data1数据1001.3km处各种干扰抑制算法比较

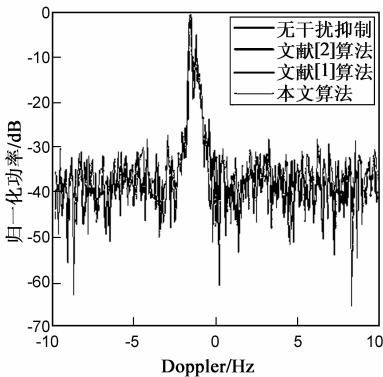


图16 data1数据2000.6km处各种干扰抑制算法比较

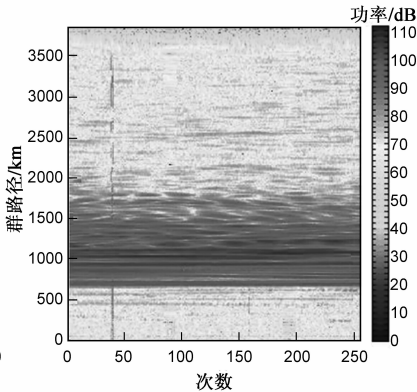


图17 采用文献[2]算法进行干扰抑制后 data2数据时域图

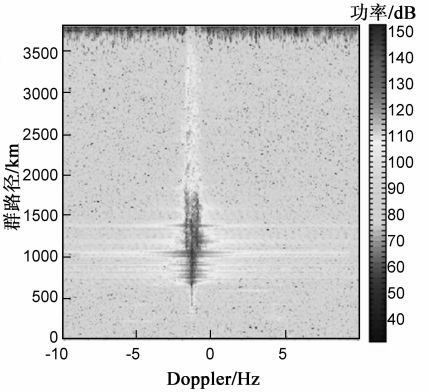


图18 采用文献[2]算法进行干扰抑制后 data2数据群路径-Doppler谱图

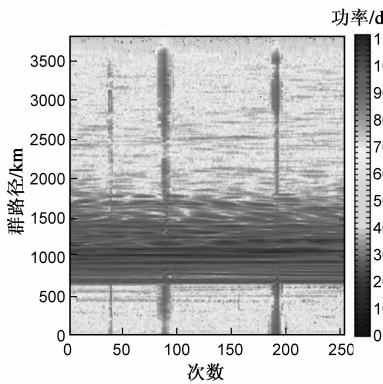


图19 采用文献[1]算法进行干扰抑制后 data2数据时域图

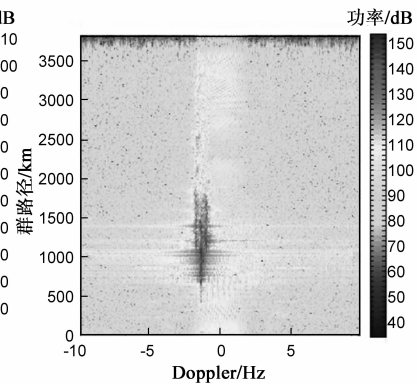


图20 采用文献[1]算法进行干扰抑制后 data2数据群路径-Doppler谱图

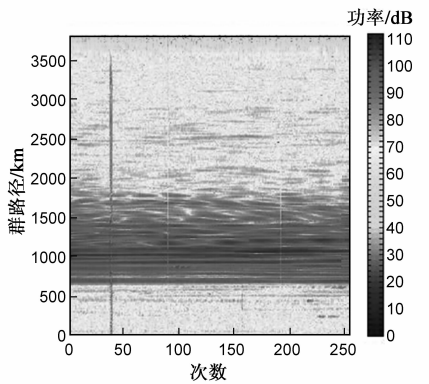


图21 采用文献[4]算法进行干扰抑制后 data2数据时域图

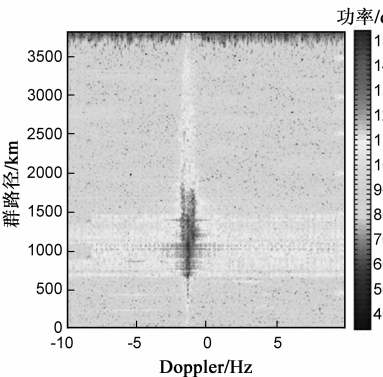


图22 采用文献[4]算法进行干扰抑制后 data2数据群路径-Doppler谱图

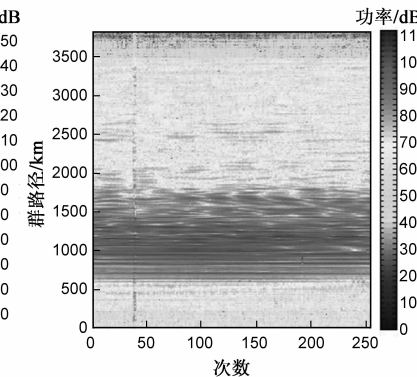


图23 采用本文算法进行干扰抑制后 data2数据时域图

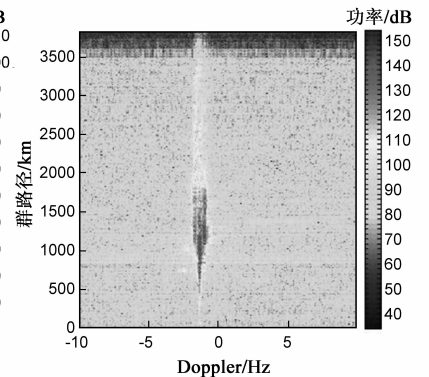


图24 采用本文算法进行干扰抑制后 data2数据群路径-Doppler谱图

通过观察图 8 ~ 图 13,可以看出,对 data1 数据进行干扰抑制后,本文算法的干扰抑制性能相对好一些.图 14 ~ 图 16 分别给出了三种算法不同群距离单元的处理结果,图 14 对应的是群距离为 451.8km 处的处理结果,由图中可以看出,采用干扰抑制算法后,信干比(信号功率与干扰噪声功率的比值)都有所提高,本文算法和文献[2]算法性能接近,文献[1]算法没能完全抑制掉干扰,因此在零频附近出现一个鼓包.图 15 对应的是群距离为 1001.3km 处的处理结果,由图中可以看出,本文

算法信干比比文献[2]算法提高了约 15dB,比文献[1]提高了约 20dB,比无干扰抑制时提高了约 25dB.图 16 对应的是群距离为 2000.6km 处的处理结果,此处不存在干扰,因此图中本文算法、文献[1,2]算法以及无干扰抑制时处理结果基本一致.

从对 data2 数据的处理结果可得到相同结论.通过分析发现,在采用基于小波变化的方法进行干扰检测和抑制时,检测门限的选择比较重要,检测门限过高,干扰不能得到有效抑制,检测门限过低,就会导致有用

回波数据也被当作干扰去掉,从而在谱图中产生镜像.

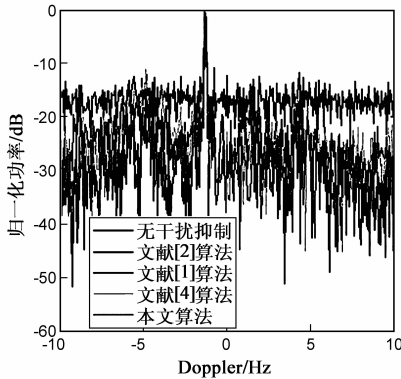


图25 data2数据451.8km处各种干扰抑制算法比较

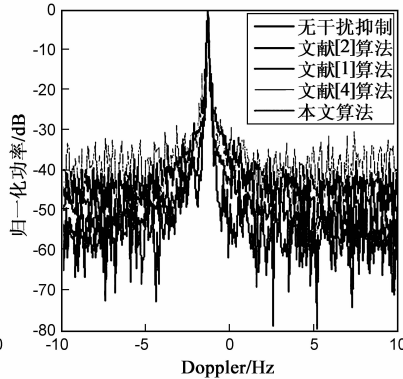


图26 data2数据1001.3km处各种干扰抑制算法比较

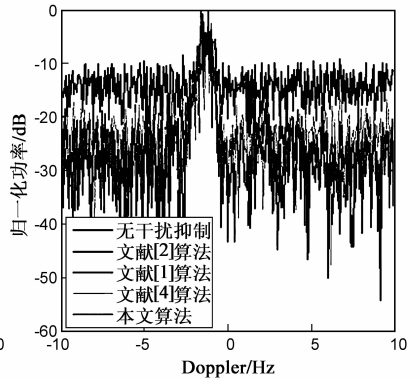


图27 data2数据2000.6km处各种干扰抑制算法比较

6 结论

干扰抑制一直是高频返回散射系统要解决的难题之一.通过对高频返回散射系统的实测数据分析发现,有种干扰在 Doppler 域有比较宽的谱,并且相邻 Doppler 单元以及相邻距离单元的相关性都较强,针对干扰的这一特点,提出了在 Doppler 域基于特征子空间的干扰抑制方法.该方法在 Doppler 域构造干扰协方差矩阵,避免了在时域选取只有干扰而无地海杂波单元构造干扰协方差矩阵.该方法能有效降低由于干扰的存在而抬高的噪声基底,大大改善回波谱图质量.实测数据处理结果表明,该方法具有较好的性能.

参考文献:

- [1] 强勇,侯彪,等.天波超视距雷达抑制流星余迹干扰方法的研究[J].电波科学学报,2003,18(1):23-27.
Qiang yong, Hou Biao, et al. An approach of suppressing meteor trail interference in over-the horizon radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(1): 23-27. (in Chinese)
- [2] 权太范,李健巍,等.高频雷达抑制冲击干扰的研究与实验[J].电子学报,1999,27(12):23-25.
Quan Taifang, Li Jianwei, et al. An approach and experiment of suppressing burst interference in hifg-frequency radar[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(12): 23-25. (in Chinese)
- [3] 邢孟道,保铮,等.天波超视距雷达瞬态干扰抑制[J].电子学报,2002,30(6):823-826.
Xing Mengdao, Bao Zeng, et al. Transient interference excision in OTHR[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 823-826. (in Chinese)
- [4] 苏洪涛,保铮,等.地波超视距雷达高频通信干扰抑制[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2003,30(4):442-445.

- Su Hongtao, Bao Zeng, et al. HF-communication interference mitigation in HF-GWR[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(4): 442-445. (in Chinese)
- [5] 张雅斌,陈伯孝,等.舰载无源综合脉冲孔径雷达射频干扰抑制[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2007,34(4):514-517.
Zhang Yabin, Chen boxiao, et al. Cochanel interference suppression for the ship-based passive synthetic impulse and aperture radar[J]. Journal of Xidian University, 2007, 34(4): 514-517. (in Chinese)
- [6] 陈希信,黄银河.基于矩阵奇异值分解的高频雷达瞬态干扰抑制[J].电子与信息学报,2005,27(12):1879-1882.
Chen Xixin, Huang Yinhe. A SVD-based approach of suppressing transient interference in high-frequency radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(12): 1879-1882. (in Chinese)
- [7] Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1989, 11(7): 674-693.
- [8] R H Kahn. Ocean clutter model for high-frequency radar[J]. IEEE J Oceanic Eng, 1991, 16(2): 181-188.

作者简介:

蔚 娜 女,1981 出生,山东人,博士.目前主要研究方向为雷达信号处理. E-mail: lenghanbingxue@sina.com

李铁成 男,1963 出生,河南人,高级工程师.曾获国家科技进步二等奖一项,目前主要研究方向为雷达总体设计.

柳 文 男,1973 出生,湖南人,高级工程师、博士.目前主要研究方向为电离层物理及电波传播.

凡俊梅 女,1964 出生,河南人,研究员、博士.曾获国家科技进步二等奖一项和部科技进步一等奖一项,目前主要研究方向为天波超视距雷达、电波传播和信号处理.