

文章编号: 2095-4980(2022)06-0590-05

基于频谱对称性的 GNSS 频率抗干扰算法

房晓丽¹, 吴礼杰^{*2}, 彭 晖¹

(1. 湖南信息学院 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410151; 2. 湖南跨线桥航天科技有限公司, 湖南 长沙 410153)

摘 要: 传统的卫星导航信号频域抗干扰技术在接收信号的频域将干扰信号的谱线进行抑制从而达到抗干扰的目的, 但在抑制干扰的同时抑制了部分信号, 造成信号能量的损失。提出一种利用卫星导航信号频谱对称性的频域抗干扰算法, 该方法利用卫星导航信号在频谱上的冗余性, 在进行干扰谱线抑制的过程中利用与之对称未被干扰的谱线进行恢复, 即可得到完整的信号频谱。分析北斗 B3 频点民码仿真数据表明: 当干扰信号的频谱出现在中心频点的一侧时, 该方法对干扰信号的带宽不敏感, 即使干扰信号的频谱占到了信号频谱的一半, 其输出信号的能量仍能保持稳定; 与传统的方法相比, 在进行干扰谱线抑制的过程中减小了信号能量的损失。仿真实验表明, 在典型场景下, 提出的方法与传统的置零法相比, 载噪比提升约 1 dB。

关键词: 卫星导航; 北斗; 频率抗干扰; 对称性

中图分类号: TN975

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020164

GNSS frequency anti-jamming algorithm based on spectral symmetry

FANG Xiaoli¹, WU Lijie^{*2}, PENG Hui¹

(1.School of Electronic Information, Hunan Institute of Information Technology, Changsha Hunan 410151, China;

2.Hunan Flyover Aerospace Science&Technology Co., Ltd, Changsha Hunan 410153, China)

Abstract: The traditional frequency-domain anti-interference technology of satellite navigation signals is processed in the frequency domain of the received signal, and the spectrum of the interference signal is suppressed to achieve anti-interference. This method suppresses the interference while suppressing part of the signal, resulting in the loss of signal energy. Aiming at this problem, a frequency domain anti-interference algorithm using the spectrum symmetry of satellite navigation signals is proposed. This method utilizes the spectrum redundancy of satellite navigation signals and uses it in the process of interference spectrum suppression. A complete signal spectrum can be obtained by recovering the symmetrical undisturbed lines. The simulation data of Beidou B3 frequency point code shows that when the spectrum of the interference signal appears on one side of the center frequency, the proposed method is not sensitive to the bandwidth of the interference signal, even if the spectrum of the interference signal accounts for half of the signal spectrum, the energy of the output signal remains stable; the loss of signal energy is reduced during the interference line rejection compared to that in conventional methods. Simulation experiments show that in typical scenarios, the proposed method can improve the carrier-to-noise ratio by about 1 dB compared with the traditional zero-setting method.

Keywords: satellite navigation; Beidou; frequency anti-interference; symmetry

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)在最初的设计中并没有考虑日趋复杂的电磁环境, 这使得 GPS 信号被干扰的事件频繁发生。2011 年美国光平方公司的地面基站给相邻频段的 GPS 信号带来严重干扰, 导致美军大量武器装备作战能力降低甚至丧失; 2015 年 1 月中旬大连机场发生一起非法电台干扰飞机导航的事件, 严

收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2020-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41604016); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(18C1583); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(19B395); 2020 年湖南省普通高等学校教学改革研究资助项目(HNJK-2020-1238); 2020 年普通高校校企合作创新创业教育基地-北斗应用创新创业教育基地

*通信作者: 吴礼杰 email:hnwulijie@163.com

重影响了机场的飞行安全。这些无意的干扰给 GPS 的正常使用带来了严重的影响，使得无意干扰的抑制问题日益突出^[1]。无意干扰通常为窄带干扰，根据干扰信号处理域的不同可将窄带干扰抑制技术分为时域和变换域干扰抑制技术^[2-5]。

频域抗干扰技术是变换域干扰抑制技术的一种，主要是利用窄带干扰的功率谱集中在很窄的频带中，表现为脉冲形状的特点。利用离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)可以将干扰映射到很窄的频带内，通过设置门限检测出干扰的位置，然后对相应位置上的谱线进行抑制，从而达到减轻干扰的目的。特别是利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法可以实现快速运算^[6-7]，使频域抗干扰技术在抗窄带干扰上引起学者的广泛关注。文献[8]提出一种抗窄带干扰的方法，利用扩频系统频谱的对称性进行干扰谱线恢复，但没有考虑加窗带来的信噪比损耗；文献[9]分析了频域抗干扰中数据加窗带来的信噪比损耗，研究采用数据重叠后的信号合成输出问题，并提出一种重叠相加的输出方法，能够有效地减小加窗引入的信噪比损耗，但没有对受干扰的频谱部分进行修复。

本文利用导航信号，采用二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制其频谱具有对称性的特点^[10]，提出了一种基于导航信号频谱对称性的频域抗干扰算法。首先对导航信号的频谱对称性进行详细的分析，推导出不同载波情况下的频谱对称性关系，然后提出干扰谱线的修复方法，并对加窗损耗进行补偿，最后对提出的算法进行仿真分析，并与传统的频域抗干扰算法进行对比。

1 导航信号的频谱分析

以北斗 B3 一期民码 PRN=3 为例进行分析，信号模型为：

$$s(t) = s_{\text{PRN}}(t) \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

式中： s 为经过导航接收机模拟下变频后的中频实信号； s_{PRN} 为伪随机码； f 为信号频率。

具有恒定功率的低通信号的自相关函数定义为：

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T s(t)s(t+\tau)dt \quad (2)$$

式中 T 为伪码周期。由于导航信号 PRN 码是完全可预测和可重复产生的，具有与随机二进制码类似的自相关性，式(2)可进一步描述为：

$$R(\tau) = \begin{cases} A^2 \left(1 - \frac{|\tau|}{T_c}\right), & |\tau| \leq T_c \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中： τ 为自相关函数的时延； A^2 为 $s(t)$ 的相关峰值； T_c 为 PRN 码的码元宽度。

$s(t)$ 的功率谱可通过自相关函数表示为：

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4)$$

由式(3)和式(4)，可将功率谱进一步表示为^[10]：

$$S(f) = A^2 T_c \sin^2(\pi f T_c) \quad (5)$$

通过式(5)可知，功率谱 $S(f)$ 具有对称性。式(5)反映的仅仅是功率谱的对称性，在进行频域抗干扰的过程中，若要对被抑制的谱线进行修复，需要分析接收数据进行 FFT 后实部与虚部的对称性。

伪随机码频谱的对称性导致了导航信号频谱的对称性。设数字域的伪随机码为 $s_{\text{PRN}}(n) (n=1, 2, \dots, N)$ ， N 为采样点数，其 DFT 表示为 $S_{\text{PRN}}(k) (k=1, 2, \dots, N)$ ，根据实序列 DFT 的对称性可知， $S_{\text{PRN}}(k)$ 关于 $N/2$ 点共轭对称。将 $s_{\text{PRN}}(n)$ 调制到载波上的信号表示为 $s(n)$ ，其 DFT 为 $S(k)$ ，假设载波频率为 f_c 。根据载波类型的不同， $S(k)$ 具有不同的对称性，下面分析载波为实信号和复信号情况下 $S(k)$ 的对称性：

1) 载波为实信号。实信号载波又分为正弦型和余弦型。对于余弦型实信号载波，余弦信号是一个偶函数，其 DFT 为一个实数序列，且关于中心频点左右对称，因此调制后的 DFT $S(k)$ 保持原有的对称性不变，其对称性可表示为^[11]：

$$S(k) = S^*(m - k) \quad (6)$$

式中 m 为中心频点 f_c 在 $1 \sim N$ 中对应的序列号。

同理，对于正弦型实信号载波， $S(k)$ 的对称性可表示为：

$$S(k) = -\text{real}(S(m - k)) + \text{imag}(S(m - k)) \quad (7)$$

式中 $\text{real}(\cdot)$ ， $\text{imag}(\cdot)$ 分别为信号的实部和虚部。

2) 载波为复信号。PRN 码调制到载波上时，将中心频点由零频搬移至 f_c ，频谱的对称性未受影响，调制后的 DFT $S(k)$ 仍然关于中心频点共轭对称^[11]，对称性如式(6)所示。

以余弦型载波实信号为例， $S(k)$ 的模值(功率谱)、实部、虚部对称性如图 1 所示。

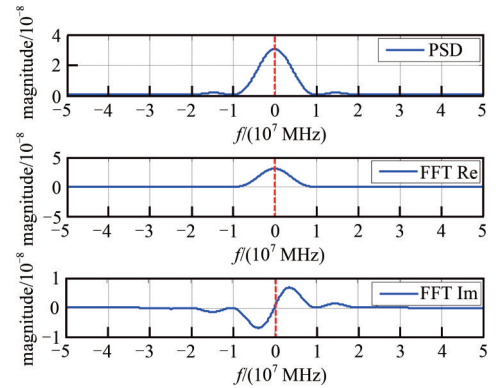


Fig.1 Diagram of DFT symmetry

图 1 DFT 对称性示意图

2 频域抗干扰算法

频率抗干扰算法的原理框图如图 2 所示。为了防止因直接截断而造成的频谱泄露，首先对输入信号进行加窗处理，并进行快速傅里叶变换，将信号从时域变换至频域；然后对频域的谱线进行检测，由于导航信号和噪声信号的谱线比较平稳，窄带干扰信号的谱线幅度较高，且频谱宽度较窄；再通过设置谱线门限的方法来对干扰谱线进行抑制，常用的方法有置零法和限幅法；最后对谱线进行傅里叶逆变换，得到时域的信号，即完成了频域抗干扰的整个过程^[12]。数据加窗可以降低截断引起的频谱泄露，但同样带来了信噪比的损耗，可通过 1/2 重叠相加方法对损耗进行补偿^[8]。

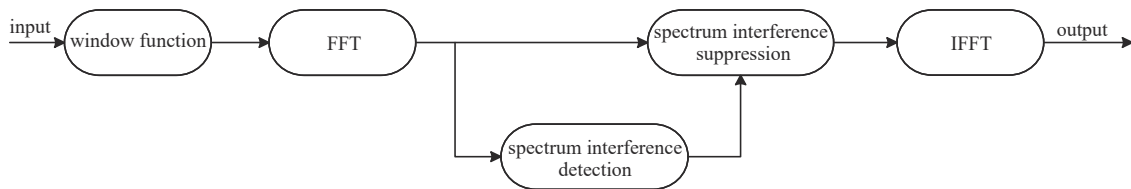


Fig.2 Frequency anti-interference principle

图 2 频率抗干扰原理

若对干扰谱线进行置零，将导致信号的频谱发生改变，使得接收信号损耗了在干扰频段的所有能量，直接导致信号能量的衰减。当窄带干扰的频谱带宽不关于信号的中心频点对称时，可利用导航信号频谱的对称性对受干扰的谱线进行恢复，其原理和处理过程分别如图 3、图 4 所示。

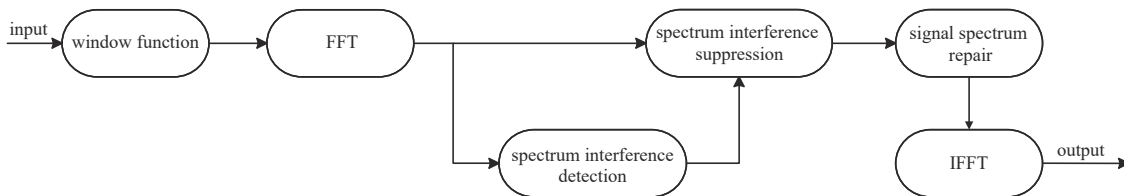


Fig.3 Principle of frequency anti-interference based on spectral line restoration

图 3 基于谱线恢复的频率抗干扰原理

3 性能仿真

为了验证本文算法的性能，用软件接收机进行仿真。首先用 Matlab 仿真软件模拟产生全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 信号、干扰和噪声数据，然后分别用置零法、均值法、白化法、本文的对称法对干扰进行抑制，最后利用软件接收机对抗干扰后的数据进行导航信号的捕获、跟踪处理，并输出载噪比，将输出的载噪比作为评价算法性能的指标。置零法、均值法、白化法分别为对受干扰的谱线进行置零、置均值、白化处理。仿真实验中采用北斗 B3 一期民码作为 GNSS 信号，设置导航信号的载噪比 $CNR_0 = 50$ dBHz。

干扰频率对输出载噪比的影响如图 5 所示，实验中设置干扰带宽 4 MHz，干扰的中心频点为 36~56 MHz 进行遍历，步进 1 MHz。

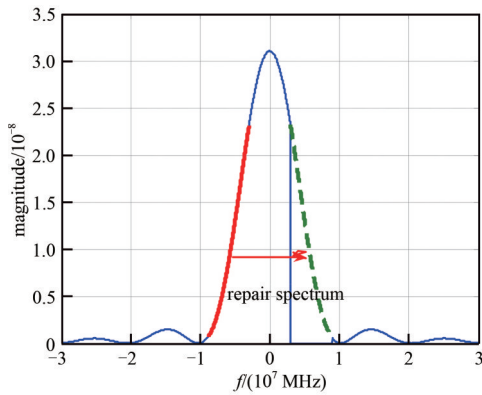


Fig.4 Spectrum repair process
图4 谱线修复过程

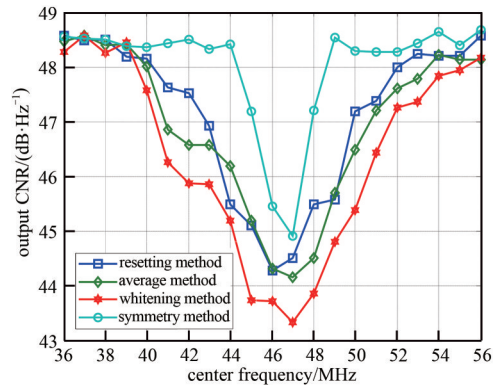


Fig.5 Influence of interference frequency on output carrier-to-noise ratio
图5 干扰频率对输出载噪比的影响

从图5可以看出，4种方法输出的载噪比均呈现一个V字形的形状，干扰频点越靠近信号的中心频点46.52 MHz，其输出的载噪比越小。当干扰信号的频率不包含信号的中心频点时，对称法的优势特别明显，输出载噪比高于其他3种方法，特别是干扰信号的中心频点在44 MHz时，本文方法的结果要高于其他方法至少2 dB，而且输出的载噪比基本稳定不变。同时也反映了本文方法的缺陷，当干扰频率包含中心频点时，本文方法的优势不再明显。

干扰带宽对输出载噪比的影响如图6所示。为了避开导航信号的中心频点46.52 MHz，设置干扰中心频点为52 MHz，干扰带宽1~10 MHz，步进1 MHz。

从图6可以看出，4种方法输出的载噪比均随干扰带宽的增加而呈现下降的趋势，其中本文的方法下降趋势最小，载噪比的损耗值不超过0.5 dB，基本保持稳定，说明本文的方法在特定干扰频点和有限带宽内对干扰带宽不敏感，进一步说明了本文方法的有效性。

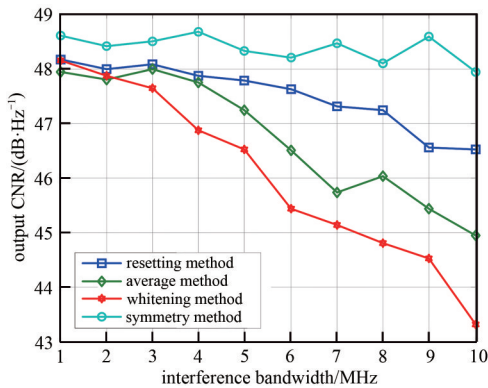


Fig.6 Influence of interference bandwidth on output carrier-to-noise ratio
图6 干扰带宽对输出载噪比的影响

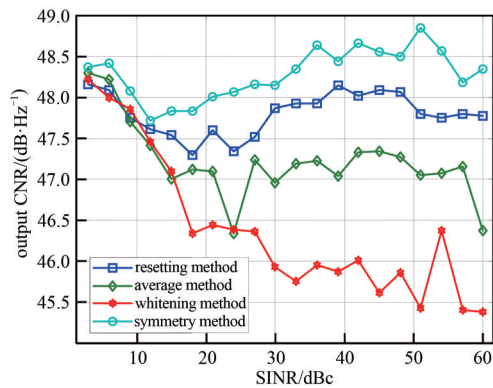


Fig.7 Effect of interfering signal-to-noise ratio on output carrier-to-noise ratio
图7 干噪比对输出载噪比的影响

干扰带宽对输出载噪比的影响如图7所示。设置干扰中心频点为52 MHz，干扰带宽6 MHz，干噪比设置为3~60 dBc，步进3 dBc。

当干扰强度较小时，干扰谱线和噪声谱线(包含信号谱线)的幅度相当，在进行干扰谱线抑制的过程中有可能信号谱线也被抑制，导致在弱干扰的条件下输出载噪比反而比较低，如图7所示。在不同的干扰强度下，本文方法输出的载噪比均高于其他3种方法。

本节分别从干扰频率、干扰带宽、干扰强度对输出载噪比的影响进行了仿真实验，实验表明：本文方法输出的载噪比均高于其他3种方法，充分说明了本文算法的有效性。

4 结论

提出了一种利用导航信号频谱对称性的频率抗干扰方法，通过未受干扰的谱线来修复受到干扰的谱线，最大限度地减小输出载噪比的损耗。仿真实验验证了该方法的稳健性，在特定的频率范围内，基本不受干扰频点、

干扰带宽、干扰强度的影响。在干扰频率不包含信号中心频点时,本文方法对单天线的抗窄带干扰具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] MOSAVI M R, SHAFIEE F. Narrowband interference suppression for GPS navigation using neural networks[J]. GPS Solutions, 2016,20(3):341–351.
- [2] 王剑,解楠,刘友江,等.全双工阵列的数字域联合干扰抑制算法[J].太赫兹科学与电子信息学报,2020,18(2):196–201. (WANG Jian, XIE Nan, LIU Youjiang, et al. Joint design of digital interference suppression for full duplex arrays[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):196–201.)
- [3] GUTSOL D T, CHERENKOV A D, AVRUNIN O G, et al. Analysis of high-power narrowband interference suppression system in radiometric receiver[J]. Telecommunications and Radio Engineering, 2019,78(3):251–260.
- [4] LIU Yongqing, LI Yipin, WANG Xingyuan, et al. Work in progress: iterative threshold setting strategy based on second-order statistics for interference suppression in frequency domain[C]// International Conference on Communications and Networking. Maoming, Guangdong, China: IEEE, 2014:373–376.
- [5] OUYANG Xuemei, MOENESS G A. Short-time Fourier transform receiver for nonstationary interference excision in direct sequence spectrum communications[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011,49(4):851–863.
- [6] MAO Weilung, MA Wannjiun, CHIEN Yingren. New adaptive all-pass based notch filter for narrowband/FM anti-jamming GPS receivers[J]. Circuits System Signal Processing, 2011,30(4):527–542.
- [7] ZHENG Zhou, LI Mengyuan, WANG Weijiang. A high efficient baseband GNSS signal narrow band anti-jamming approach in frequency domain[J]. Advanced Materials Research, 2014,926(5):1857–1860.
- [8] 王明,李长庚.卫星扩频信号抗窄带干扰性能限研究[J].宇航计测技术,2015,35(6):64–67. (WANG Ming, LI Changeng. Research on performance bound against narrowband interference of satellite spread spectrum signal[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2015,35(6):64–67.)
- [9] 曾祥华,李峥嵘,王飞雪.扩频系统频域窄带干扰抑制算法加窗损耗研究[J].电子与信息学报,2004,26(8):1276–1281. (ZENG Xianghua, LI Zhengrong, WANG Feixue. Study on windowing degradation of frequency-domain narrowband interference suppression algorithms in spread spectrum system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004,26(8):1276–1281.)
- [10] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M].北京:电子工业出版社,2012. (XIE Gang. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing: Press of Electronics Industry, 2012.)
- [11] 高西全,丁玉美.数字信号处理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008. (GAO Xiquan, DING Yumei. Digital signal processing[M]. Xi'an, China: Xidian University Press, 2008.)
- [12] 杨帆.北斗卫星导航接收机抗窄带干扰技术研究[D].北京:北京交通大学,2019. (YANG Fan. Research on anti-narrowband interference technology of Beidou satellite navigation receiver[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.)

作者简介:

房晓丽(1985–),女,山东省寿光市人,硕士,副教授,主要研究方向为信号与信息处理、信号抗干扰技术.email:feixuepiaoyi@126.com.

彭晖(1979–),男,湖南省衡阳市人,副教授,主要研究方向为光信息处理、光纤传感.

吴礼杰(1985–),男,湖南省常德市人,工程师,主要研究方向为信息传输与处理、卫星导航.