

窄带抗干扰算法对捕获跟踪的影响

肖进杰, 李金海, 欧松林

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 为了验证窄带抗干扰算法对卫星导航接收机性能的影响, 首先分析了基于卫星导航接收机中窄带干扰抑制原理和基于重叠加窗的干扰抑制方法. 在分析该算法对多种不同干扰抑制能力的基础上, 研究了该算法对捕获跟踪性能的影响. 实际数据仿真结果表明, 该算法能够有效抑制单音、多音及扫频三种不同类型的窄带干扰, 且布莱克曼窗较海明窗具有更高的抗干扰性能. 当干信比为 60 dB 时, 采用该算法后捕获过程的信噪比损失约为 1 dB, 跟踪过程的信噪比损失约为 0.8 dB. 总体来说, 该算法在抑制窄带干扰的同时对捕获和跟踪影响较小.

关键词: 卫星导航; 频域抗干扰; 重叠组合; 加窗; 捕获跟踪

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)09-0101-05

The Impact of Narrow-band Interference Rejection Algorithm on Acquisition and Tracking

XIAO Jin-jie, LI Jin-hai, OU Song-lin

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10029, China)

Abstract: In order to obtain the impact of narrow-band interference rejection algorithm on the performance of satellite navigation receiver, the principle of frequency domain narrow-band interference rejection technique in satellite navigation receiver and the frequency domain narrow-band interference rejection method with overlap windowing are analyzed. The rejection ability of the algorithm for different interference is analyzed. The influence of the algorithm for the performance of acquisition and tracking is researched based on these analyses. Simulations with one or more embodiments of the present disclosure have shown that the algorithm can suppress the single-tone interference, multi-tone interference and sweep interference effectively. The interference rejection performance using Blackman windowing is better than using Hamming windowing. When the jam-to-signal ratio is 60 dB, the SNR losses is about 1 dB in the acquisition part and the SNR losses is about 0.8 dB in the tracking part. As a whole, the algorithm can suppress the narrow-band effectively and has brought little effect on the acquisition and tracking

Key words: satellite navigation; frequency domain anti-jamming; overlap; windowing; acquisition and tracking

1 引言

近年来, 卫星导航系统在国防领域中发挥的作用不可忽视. 抗干扰技术一直以来都是国防技术研究的热点问题. 全球卫星导航系统采用扩频通信技术, 自身具有很好的抗干扰性能, 能够有效地抑制各种环境中产生的干扰. 但是当干扰功率较大时, 干扰无法得到抑制, 导航接收机性能将急剧下降, 甚至无

法工作.

在众多的窄带干扰抑制技术中^[1], 频域窄带抗干扰算法^[2]因其有效性和简单性受到了广泛研究和应用. 文献[3]中提出了一种双门限方法, 提高了信噪比改善量, 但文中只针对干信比为 20 dB 的情况进行了仿真分析. 文献[4]中提出了一种基于反加窗和重叠选择的窄带干扰抑制方法, 能有效降低系统计算量, 但并未定量分析该算法对接收机捕获跟踪

所产生的影响。另外其他文献中一般只是针对单音干扰进行了分析,并未对多音干扰、扫频干扰等不同类型窄带干扰进行分析。

针对上述问题,本文首先阐述了基于重叠加窗 FFT 的频域窄带干扰抑制算法原理,然后在仿真平台中将该算法应用于卫星导航接收机中,对不同干信比的单音干扰、多音干扰及扫频干扰进行了抑制,并详细分析了该算法对卫星导航接收机基带部分捕获及跟踪部分性能的影响,对于窄带抗干扰算法在实际接收机中的应用具有一定的参考意义。

2 频域窄带抗干扰基本原理

卫星导航系统中采用扩频技术,导航信号被湮没在白噪声中,因此卫星导航信号整体上呈高斯白噪声特性,其频谱具有平坦特性,而窄带干扰信号能量集中在少部分频点上,有明显的频谱峰值。利用二者之间的差异性,在频域中很容易区分卫星信号和干扰,然后采用合适的干扰抑制算法进行处理即可达到抗干扰效果。

频谱变换工程上最易实现的是快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)。频域窄带抗干扰算法的基本原理是在傅里叶变换之后对干扰谱线进行抑制,再经过反傅里叶变换恢复时域数据。在实际应用中,由于计算资源与存储空间有限,在 FFT 运算中,其单位时间内只能对点离散信号进行处理,因此必须对序列进行点截断。这种时域序列的截断相当于对数据加了矩形窗,会造成频域的频谱泄漏。为了减少频谱泄漏造成的影响,通常先对输入信号经过时域加窗(非矩形窗)处理,再进行 FFT 运算。加窗处理虽然可以减轻频谱泄漏带来的影响,但是同时也会导致信号失真,这会对信噪比造成一定损耗。所以,频域窄带抗干扰技术中采用重叠处理的方式来补偿加窗所带来的信噪比损耗,一般采用海明窗或布莱克曼窗。图 1 为重叠加窗 FFT 的频域窄带干扰抑制算法原理图。

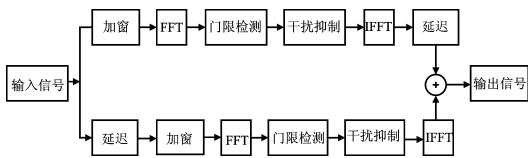


图 1 重叠加窗 FFT 的频域窄带干扰抑制原理图

3 仿真结果

本次仿真采用真实 GPS 中频数据,中心频率为

1 572. 42 MHz,数字基带中频为 4. 092 MHz,采样频率为 16. 368 MHz。在仿真过程中,根据卫星导航接收机的抗干扰性能需求,分别加入不同干信比的单音干扰、多音干扰及 10%带宽扫频干扰这三种不同窄带干扰。根据上述频域窄带干扰抑制方法对干扰进行处理,其中门限检测算法采用基于高斯分布的自适应门限检测方法^[4],干扰抑制算法采用置零法,即直接将所检测到的干扰置为零。整个抗干扰模块分为两路进行处理,每次每路所处理的数据点数为 1 024 点,窗函数选择 1 024 点海明窗和布莱克曼窗两种,同时 FFT 点数也取 1 024 点。在对加入干扰的中频数据进行处理后,转入捕获及跟踪通道,记录实验结果并进行分析。

在采用上述算法对不同干信比及不同类型进行抗干扰处理后,分析干扰抑制后卫星导航信号的频谱。图 2 为当加入干信比为 60 dB 的单音、多音及扫频干扰时,干扰抑制前后 GPS 基带中频信号频谱对比图。

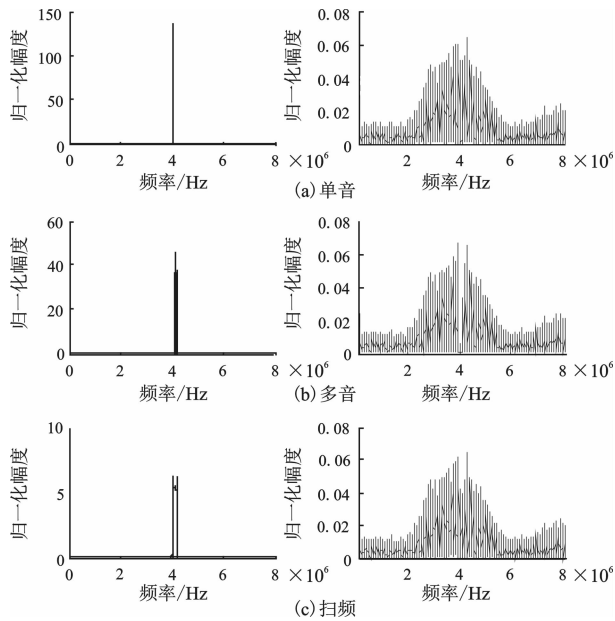


图 2 不同类型干扰抑制前后中频信号频谱图

由图 2 可以看出,加入干扰后,中频信号频谱均存在很明显的谱线峰值,经过抗干扰处理后,三种情况下卫星中频信号谱线中没有明显的频谱峰值,说明三种不同类型干扰均能得到了有效抑制。

4 抗干扰算法对接收机性能影响

4. 1 抗干扰算法对捕获的影响

本部分仿真中,捕获算法采用基于 PMF-FFT 的快速捕获算法,捕获策略采用文献[5]中所提出的

最大值捕获策略,相干积分时间为 1 ms,以 19 号卫星为例对其进行捕获.首先,为了验证该算法在无干扰时的对捕获部分的有效性,分别对未加干扰时,未进行抗干扰处理与进行抗干扰处理后的数据进行捕获,捕获结果如图 3 和图 4 所示.

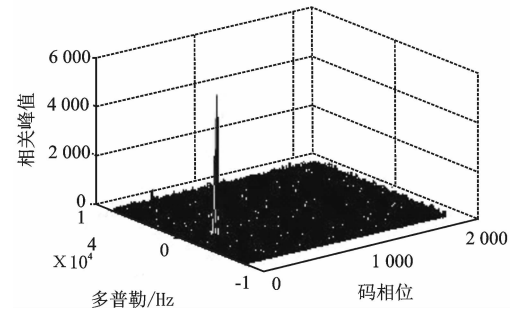


图 3 未加干扰未进行干扰处理卫星捕获图

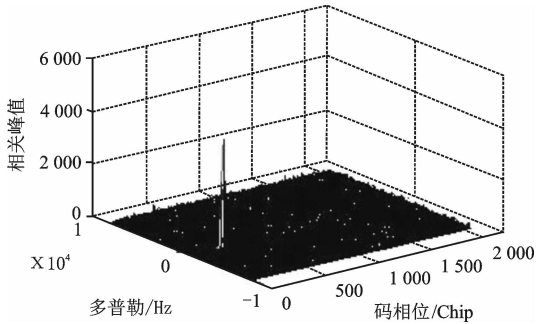


图 4 未加干扰进行干扰处理后卫星捕获图

根据以上捕获结果,两种情况下相关峰的最大值对应的码相位均为 229,在采样率为 16.368 MHz 时 CA 码第一个起始点均在 1 825,捕获结果完全一致,说明该算法在未加干扰时具有有效性.同时我们可以看到,由于进行了抗干扰处理,相关峰值有所下降,同时信号噪底也得到削弱,此时在捕获部分可粗略估计出信噪比损失为 0.20 dB.

接下来针对不同干信比及不同类型的干扰环境,分析频域窄带抗干扰算法对接收机捕获性能的影响,以干信比为 60 dB 的单音干扰为例进行分析,窗函数为布莱克曼窗.图 5 和图 6 给出了当加入干信比为 60 dB 的单音干扰时,干扰抑制前后卫星捕获图.

根据图 5 和图 6 中捕获结果可以得出,干扰抑制前卫星信号不能被正确捕获,干扰抑制后捕获结果正确.捕获结束后,通过比较未加干扰和加干扰处理后的中频信号的信噪比,此时信噪比损失为 0.76 dB.

下面给出在加海明窗和布莱克曼窗两种情况

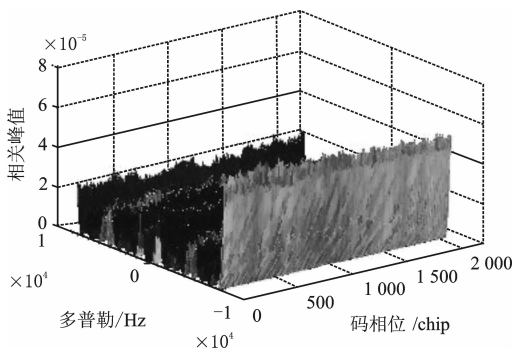


图 5 单音干扰抑制前卫星捕获图

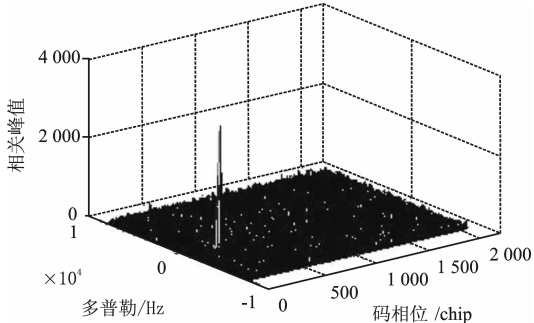


图 6 单音干扰抑制后卫星捕获图

下,对不同干信比的三种不同窄带干扰进行抑制后的捕获结果,并估计其信噪比损失,记录实验结果如表 1 所示.

表 1 不同窗函数、干扰类型及干信比下捕获情况

窗函数	干信比 / dB					50	60	70	80	90
	干扰类型	信噪比损失 / dB								
海明窗	单音干扰	0.26	0.31	0.64	1.03	1.69				
	多音干扰	2.24	5.89	无法捕获	无法捕获	无法捕获				
	扫频干扰	7.58	无法捕获	无法捕获	无法捕获	无法捕获				
布莱克曼窗	单音干扰	0.77	0.76	0.79	0.83	0.92				
	多音干扰	0.92	1.35	2.11	2.34	4.76				
	扫频干扰	0.66	1.21	1.97	3.43	3.73				

根据上表结果,可以得出以下结论.

- (1)总体上看,当窗函数及干扰类型相同时,随着干信比增加,信噪比损失逐渐增大,直至无法捕获.
- (2)当采用海明窗时,在高干信比的情况下无法正确捕获;当采用布莱克曼窗时,均能得到正确捕获结果,说明布莱克曼窗较海明窗具有更高的干扰抑制能力.
- (3)从信噪比损失来看,算法对单音干扰抑制能力最好,多音干扰和扫频干扰次之.

4.2 抗干扰算法对跟踪的影响

本部分仿真中,分别对未加干扰的真实 GPS 数据以及加入干扰并进行抗干扰处理后的数据进行跟踪,从而分析抗干扰算法对跟踪性能的影响. 窗函数采用布莱克曼窗. 载波跟踪环路采用一阶数字锁频环和二阶数字锁相环,采用先锁频后锁相的形式,其中锁频环跟踪时长 500 ms,锁相环跟踪时长 300 ms,锁频环带宽为 18 Hz,锁相环路带宽为 10 Hz. 码环采用经典的迟早环,码环鉴别器采用非相干超前减滞后幅值法进行鉴相.

为了说明本文所述算法在接收机基带跟踪部分同样具有有效性,首先分析其在无干扰情况下对数据进行抗干扰处理后的跟踪情况,并将其与原始 GPS 数据的跟踪情况进行对比,主要从 I、Q 两路电文解调情况进行分析,仿真结果如图 7 和图 8 所示.

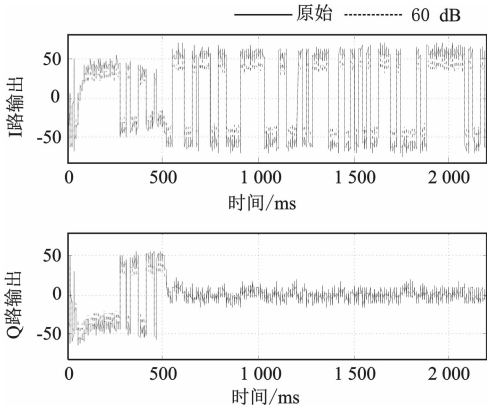


图 7 原始 GPS 数据与处理后数据 I、Q 两路电文解调情况

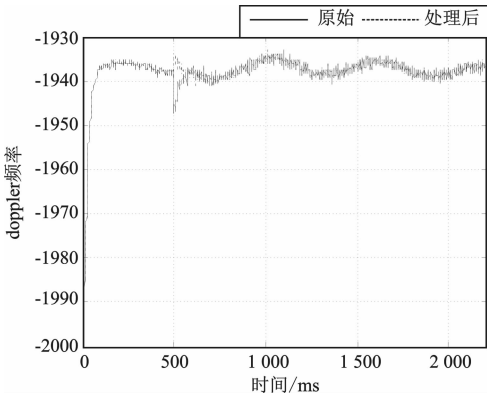


图 8 原始 GPS 数据与处理后多普勒频率锁定图

由以上跟踪结果可以看出,在无干扰情况下对数据进行抗干扰处理后,能够成功完成信号跟踪的牵引过程,跟踪结果与原始 GPS 数据的跟踪结果完全一致,说明该算法具有有效性. 通过载噪比估计算

法可以估算出原始 GPS 中频数据载噪比为 48.03 dB-Hz,多普勒标准差为 1.86 Hz. 经过抗干扰处理后,估算出的信号载噪比为 47.84 dB-Hz,信噪比损失 0.19 dB,多普勒标准差为 1.87 Hz,多普勒标准差增大 0.01 Hz.

接下来针对不同干扰环境下分析频域窄带抗干扰算法对跟踪性能的影响,同样以干信比为 60 dB 的单音干扰为例进行分析. 图 9、图 10 给出当加入干信比为 60 dB 的干扰,对数据进行抗干扰处理后的跟踪结果.

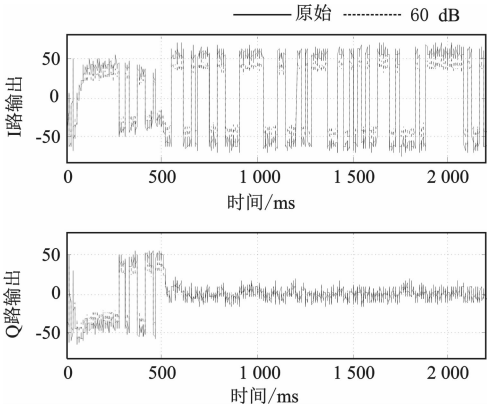


图 9 单音干扰抑制后 I、Q 两路电文解调情况

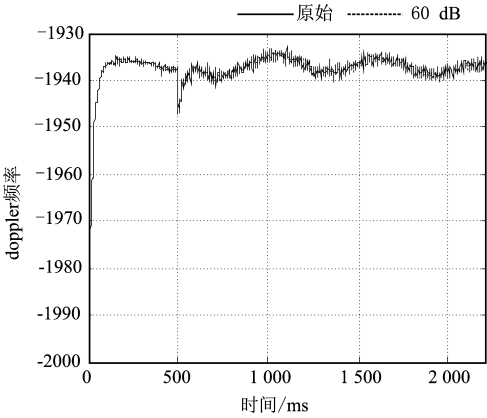


图 10 单音干扰抑制后多普勒频率锁定图

从以上跟踪结果可以看出,当加入干信比为 60 dB 的单音干扰并对其进行处理后,跟踪结果与原始数据跟踪结果完全一致,同时可以看出,经过抗干扰处理后,信号幅度和噪声幅度均有所降低,此时估算出的信号载噪比为 47.59 dB-Hz,信噪比损失 0.44 dB,多普勒标准差为 1.87 Hz,增大 0.01 Hz.

下面在不同干信比情况下进行仿真,记录其信噪比损失以及多普勒标准差的变化情况如表 2 所示.

由表 2 可以得出,在对经过抗干扰算法处理后的中频数据进行跟踪时,总体上看,随着干信比的增

表 2 不同干扰类型及干信比下跟踪情况

数据类型	干信比/ dB	载噪比/ dB-Hz	信噪比损 失/dB	多普勒标 准差/Hz	多普勒标 准差增量 /Hz
原始数据	—	48.03	—	1.86	—
无干扰	—	47.84	0.19	1.87	0.01
单音 干扰	50	47.59	0.44	1.87	0.01
	60	47.59	0.44	1.87	0.01
	70	47.58	0.45	1.87	0.01
	80	47.56	0.47	1.87	0.01
	90	47.42	0.61	1.88	0.02
多音 干扰	50	47.26	0.77	1.88	0.02
	60	47.17	0.86	1.89	0.03
	70	46.41	1.62	1.92	0.06
	80	45.77	2.26	1.94	0.08
	90	44.27	3.76	2.03	0.17
扫频 干扰	50	47.55	0.48	1.88	0.02
	60	47.17	0.86	1.89	0.03
	70	46.28	1.75	1.92	0.06
	80	45.27	2.76	1.97	0.11
	90	43.34	4.69	2.09	0.23

大,信噪比损失和多普勒标准差逐渐增大,导航接收机跟踪性能下降.当干信比一定时,从信噪比损失及多普勒标准差增量来看,与之前所分析的捕获结果一致,该算法对单音干扰抑制能力最好,当干信比为 90 dB 时信噪比损失仍然较小,多音干扰和扫频干扰次之.当干信比为 60 dB 时,三种干扰情况下的信噪比损失均在 1 dB 以内,满足接收机一般需求.

5 结束语

本文研究并分析了基于重叠加窗的频域窄带抗

干扰算法对卫星导航接收机中捕获及跟踪性能的影响,为窄带抗干扰算法在实际接收机中的应用提供了很好的参考价值.仿真结果表明,当不存在干扰时,通过该算法处理后,导航接收机的捕获及跟踪模块均能正常工作,其信噪比损失为 0.2 dB 左右,几乎无影响.当存在干扰时,该算法能够在一定范围内很好的抑制不同的窄带干扰,同时会造成一定的信噪比损失.随着干信比的不断增加,接收机捕获和跟踪的性能也会随之降低,直至无法正常工作.

参考文献:

[1] 张伟,周力. 一种改进的 DSSS 系统自适应干扰抑制技术[J]. 微电子学与计算机, 2009,26(12):75-77.

[2] Milstein L B,Itlis R A. Signal processing for interference rejection in spread spectrum communications[J]. IEEE Assp Magazine, 1986, 3(2):18-31.

[3] 孟博,龚文飞,孙昕. 基于反加窗和重叠选择的窄带干扰抑制方法[J]. 导航定位学报, 2014, 2(2):93-96.

[4] 穆立波,霍志勇. 频域抗干扰中的门限检测和处理[J]. 计算机与网络, 2010, 36(10):46-48.

[5] 欧松林,李金海,袁建国,等. GNSS 系统中检测与判决的研究[J], 计算机工程与设计, 2014, 35(3): 741-745.

作者简介:

肖进杰 男,(1993-),硕士研究生.研究方向为卫星导航抗干扰及基带算法. E-mail:xiaojinjie@ime.ac.cn.

李金海 男,(1978-),博士,副研究员,研究生导师.研究方向为高端卫星导航定位与应用.

欧松林 男,(1987-),硕士,助理研究员.研究方向为 GNSS 卫星导航定位.

作者简介:

马金龙 男,(1982 -),工程师.研究方向为数字集成电路设计和测试. E-mail:njumlma@126.com

吴素贞 女,(1987 -),博士研究生,工程师.研究方向为半导体集成电路工艺开发.

(上接第 100 页)

[6] Wong R, Gordon K. Reliability mechanism of the un-programmed amorphous silicon antifuse [C]// Proceedings of the 32nd Annual IEEE International Reliability Physics Symposium, San Jose, CA, USA: IEEE, 1994: 378-382.

[7] Kittel Z. Introduction to solid state physics [M]. New York: Wiley, 1986.