

脉冲和窄带混合干扰对卫星导航终端抗干扰的影响分析

郭海玉 刘小汇 鲁祖坤 刘 哲 庄钊文
(国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 卫星导航终端面临着严重的干扰问题,虽然单一的脉冲或窄带干扰很难对具有抗干扰功能的卫星导航终端产生影响,但是现有的抗干扰结构很难抑制脉冲与窄带的混合干扰。为了分析混合干扰对卫星导航终端抗干扰的影响,给出了脉冲与窄带及其混合干扰的数学模型,介绍了优先抑制窄带干扰和优先抑制脉冲干扰两种顺序抗干扰结构,基于该模型分析了不同脉冲干扰占空比下混合干扰对抗干扰后载噪比的影响。根据仿真实验,当两个干扰的干噪比均为 30dB 时,混合干扰造成抗干扰后载噪比下降约 5 dB。研究表明,在采用传统抗干扰结构的情况下,脉冲与窄带混合干扰对卫星导航终端抗干扰性能影响较大,其影响大于单一脉冲或窄带干扰影响的简单叠加,不同脉冲干扰占空比组成的混合干扰造成的载噪比损耗大于 5 dB,影响卫星导航信号捕获跟踪性能。

关键词: 卫星导航终端; 混合干扰; 抗干扰; 占空比; 载噪比

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2022.06.015

引用格式: 郭海玉,刘小汇,鲁祖坤,等. 脉冲和窄带混合干扰对卫星导航终端抗干扰的影响分析[J]. 信号处理, 2022, 38(6): 1284-1292. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2022.06.015.

Reference format: GUO Haiyu, LIU Xiaohui, LU Zukun, et al. Analysis of the influence of pulse and narrowband mixed interference on the anti-jamming of satellite navigation terminal [J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(6): 1284-1292. DOI:10.16798/j.issn.1003-0530.2022.06.015.

Analysis of the Influence of Pulse and Narrowband Mixed Interference on the Anti-jamming of Satellite Navigation Terminal

GUO Haiyu LIU Xiaohui LU Zukun LIU Zhe ZHUANG Zhaowen

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Satellite navigation terminals are faced with serious interference problems. Although single pulse or narrowband interference is difficult to affect the satellite navigation terminals with anti-jamming function, the mixed interference of pulse and narrowband can still play the role. In order to analyze the influence of the mixed interference of pulse and narrowband on the anti-jamming of satellite navigation terminal, this paper presents the mathematical model of the mixed interference, and analyzes two traditional sequential anti-jamming structures of priority suppression of narrowband interference and priority suppression of pulse interference. Based on the model, the influence of mixed interference with different parameter settings on the anti-jamming of satellite navigation terminal is analyzed. According to the theoretical analysis and simulation, when the interference to noise ratio is 30 dB, the mixed interference causes the carrier-to-noise ratio to decrease by 5 dB. The results show that when the traditional sequential anti-jamming structure is adopted, the mixed interference of pulse and narrowband has a big influence on the anti-jamming performance of satellite navigation terminal, which is greater than the summation of single pulse or narrowband interference. The loss of carrier-to-noise ratio caused by different duty ratio of pulse

interference reaches 5 dB, which plays a bad role in the processing of acquisition and tracking.

Key words: satellite navigation terminal; mixed interference; anti-jamming; duty cycle; carrier-to-noise ratio

1 引言

2020年7月,我国北斗三号组网成功并宣布开通全球服务,北斗导航定位系统在农业、林业、远海作业、航空航天、边境巡逻以及各种武器装备均已有了广泛的应用。然而在日益复杂的电磁环境下,各种有意、无意的干扰样式层出不穷、混杂交错,北斗系统的安全性和完好性又面临着巨大挑战。确保卫星导航终端在受到干扰的情况下仍能正常工作,提升卫星导航终端抗干扰能力成为当下重要的研究课题。根据目前收集的信息,无意干扰对卫星导航终端性能造成较大影响的压制干扰样式主要是频域上的窄带干扰和时域上的脉冲干扰^[1]。抑制窄带干扰的技术主要有抗干扰天线^[2]、自适应包络限幅^[3]以及自适应滤波^[4]等。脉冲干扰具有强度大、持续时间短、所占频带宽和随机发生的特点^[5],利用信号平稳性的干扰抑制算法失效,脉冲干扰的抑制方法主要有限幅法、熄灭法、对消法^[6-8]以及改进自动增益控制模块^[9-12]等。目前,窄带或脉冲单一干扰的抑制技术已经十分成熟。

随着电磁环境的恶化和人为干扰的增多,卫星导航终端仅受单一干扰的情况越来越少,实际情况通常都是受到窄带和脉冲两种干扰样式的混合干扰。近年以来,卫星导航终端受到压制干扰的事例层出不穷:2016年初开始,克里姆林宫安装强力干扰器,可以干扰民用甚至军用GPS信号^[13-14];2018年5月,西安上空无人机表演,在恶意干扰下,无人机群完全失去定位能力;2020年初,长沙黄花机场检测到不同强度和频点的窄带和脉冲干扰。窄带和脉冲干扰的来源有很多:汽车发动机点火系统、飞机中继器会产生较强的电磁脉冲干扰^[15-18];雷达、微波通信以及广播电视等其他系统^[19-23]也会产生不成程度的混合干扰;人为的恶意干扰^[17]也可以方便的产生脉冲与窄带的混合干扰。

混合干扰时域特征和频域特征随参数设置会产生巨大的变化,卫星导航终端现有的抗干扰措施抑制效果不佳。目前,导航终端采用的抗混合干扰措施的核心思想是时域和频域过门限置零^[24],主要有两种结构:一是先抑制脉冲再抑制窄带的顺序结构;另一个是先抑制窄带再抑制脉冲的顺序结构^[25-29]。文献^[30]分别分析了脉冲干扰对卫星导航接收机的

影响,并做了仿真实验验证,但并没有分析混合干扰对卫星导航终端的影响^[30]。文献^[31]从理论上分析了两种结构的差别,指出了其中可能存在的不足,但是没有系统完整进行验证,缺乏具体的结论^[31]。

基于目前混合干扰对导航终端影响分析不足的现状,本文在当前常用的两种脉冲与窄带混合干扰抑制结构的基础上,通过估计抗干扰后信号的载噪比,分析不同参数设置的混合干扰对卫星导航终端抗干扰的影响。围绕混合干扰的影响这一主题,第2节介绍了窄带和脉冲的干扰与抑制模型,生成信号并分析了干扰的特点;第3节通过MATLAB平台仿真混合干扰时域波形图和频谱图,从理论上分析混合干扰对两种顺序结构的影响;第4节仿真验证,仿真产生的不同占空比的混合干扰信号,估计两种结构抗干扰后的载噪比;第5节给出结论。

2 数学模型

2.1 窄带干扰与抑制模型

窄带干扰是目前卫星导航终端受到的最为常见的干扰类型之一,其明显的特点是能量集中在频谱上相对信号带宽很窄的范围内,频域特征十分突出,窄带干扰以时域模型表示为:

$$J_1[n] = A_1 \cdot G[n] * Sa[n] \quad (1)$$

式中, $J_1[n]$ 表示采样后的窄带干扰信号; A_1 表示窄带干扰的幅度; $G[n]$ 表示归一化的高斯白噪声序列; $Sa[n]$ 表示抽样函数,频域为一定带宽的门函数,其带宽等于窄带干扰的带宽。中心频率为2 MHz、带宽为1 M、干噪比为30 dB的窄带干扰的频谱图如图1所示。

窄带干扰抑制技术目前已经非常成熟,无论是单天线还是阵列天线的抗干扰技术都对窄带干扰具有良好的抑制效果。窄带干扰抑制常用的方法为频域过门限置零法。其流程可以分为三步:一是对信号做傅里叶变换;二是选取门限,在频域上对窄带干扰做置零处理;三是做傅里叶逆变换。频域置零法的数学模型可表示如下图2。

上述模型是实际中常用的频域过门限置零法,对窄带干扰有很好的抑制效果,方法实现简单,在各种设备中有广泛应用,该模型核心的部分是干扰抑制门限的设置,门限的大小决定了频域置零的带宽,进而决定着窄带干扰抑制的效能,研究和经验

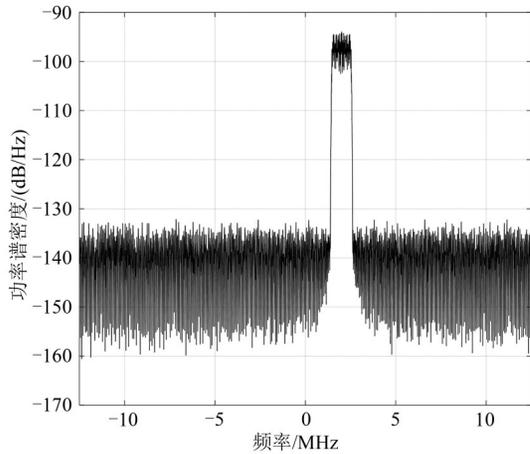


图1 窄带干扰频谱图

Fig. 1 Narrowband interference spectrum

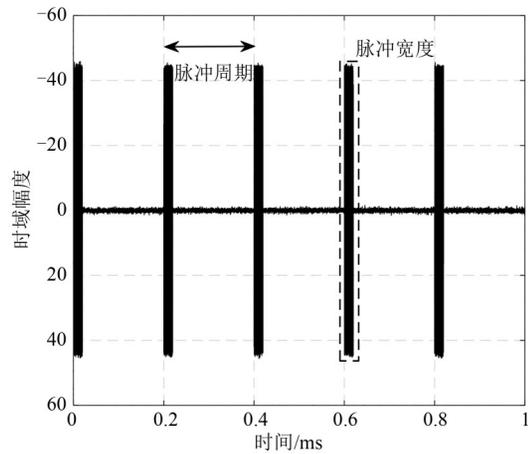


图3 脉冲干扰时域波形图

Fig. 3 Time domain waveform of pulse interference

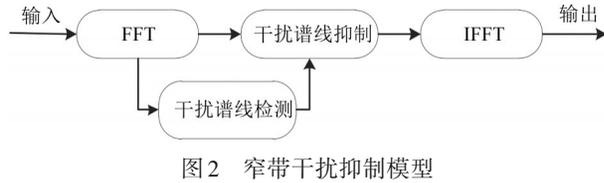


图2 窄带干扰抑制模型

Fig. 2 Narrowband interference suppression model

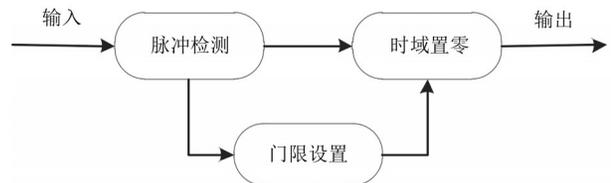


图4 脉冲干扰抑制模型

Fig. 4 Pulse interference suppression model

表明,一般情况下,门限置零算法的门限一般高于噪声水平3~5 dB。

2.2 脉冲干扰与抑制模型

本文研究的脉冲干扰指的是在时域上呈现周期性的脉冲信号,脉冲干扰在时域上具有突发的特点。常见的脉冲干扰一般建模为在时域上具有一定占空比和周期的矩形脉冲,其时域数字信号模型表达式如下:

$$J_2[n] = \begin{cases} A_2 & kT \leq n \leq kT + \tau \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $k = 0, 1, 2, \dots$; $J_2[n]$ 表示采样后的脉冲干扰信号; A_2 为脉冲干扰幅度; T 表示脉冲干扰周期; τ 表示一个周期内脉冲干扰的宽度,占空比指的是脉冲宽度与脉冲周期之比。中心频率为 2 MHz、脉冲周期为 200 us、占空比为 10%、干噪比为 30 dB 的脉冲干扰的时域波形图如图 3 所示。

脉冲干扰也是一种常见的干扰,其抑制技术也已经比较成熟,由上图可以看出,脉冲干扰在时域上具有明显的特征,其常见的抑制方法为时域消隐法。时域消隐法就是在时域上选取门限,对超过门限的采样点进行置零处理。

图 4 表示的是脉冲干扰时域消隐法的算法框图,该方法将高于检测门限的采样信号视为脉冲干

扰信号并置零,实现简单,在民用和军用领域有广泛应用。时域消隐法的核心问题同样是如何确定置零门限,特别的,当脉冲干扰和窄带干扰混合在一起后,在时域上很难确定噪声水平,若门限值过小,会造成导航信号的严重失真,一般情况下,可以采用处理信号各个采样点的平均能量大小作为时域消隐法的置零门限。本文中研究脉冲干扰占空比小于 20%,占空比的大小对门限选取的影响可以忽略,避免了上述问题。

3 理论分析

窄带干扰和脉冲干扰都是日常中很常见的干扰样式,单干扰的抑制技术已经十分成熟并广泛应用。但是,在当下日趋复杂的电磁环境下,卫星导航终端同时受到两种干扰的可能性增大,对导航终端的抗干扰性能带来更加严峻的考验。设计人员虽然也考虑到这种风险,目前设计的抗干扰措施不再是单一干扰抑制方法,而是采用脉冲和窄带干扰先后抑制的顺序结构,这种结构对于某些混合干扰具有良好的抑制效果,但在大多数混合干扰的情况下,两种干扰会相互影响,导致该结构并不能产生

很好的抑制效果,本节将进行具体分析。

3.1 混合干扰频谱分析

本文中混合干扰指的是不同参数的脉冲干扰和窄带干扰混合而成的复合干扰样式,随着窄带干扰的干噪比和带宽以及脉冲干扰的脉冲周期和占空比的不同,混合干扰在时域和频域上会表现出较大差异。

窄带干扰在频域上可近似表示为:

$$J_1(f) = \frac{A_1^2}{2B_1} [u(f_1 - B_1/2) - u(f_1 + B_1/2)] \quad (3)$$

式中, $J_1(f)$ 表示窄带干扰的频谱包络; B_1 为窄带干扰的带宽; f_1 为干扰中心频率; u 表示阶跃函数。

脉冲干扰经过傅里叶变换后的频域表达式:

$$J_2(f) = \tau A_2 \text{Sa}[\pi(f - f_2)\tau] \cdot e^{j\pi f \tau} \quad (4)$$

式中, $J_2(f)$ 表示脉冲干扰的频谱包络,脉冲干扰的中心频率为 f_2 ; Sa 表示抽样函数。脉冲干扰有效带

宽为 $1/\tau$,但频谱在幅度较小处相对离散。脉冲干扰和窄带干扰时域与频域存在线性关系,混合干扰的频谱包络 $J(f)$ 可表示为各干扰包络的和:

$$J(f) = J_1(f) + J_2(f) \quad (5)$$

本文重点分析在相同强度的脉冲与窄带干扰情况下,脉冲干扰占空比对混合干扰的影响,分别对脉冲干扰占空比为 10% 和 20% 两种条件下的混合干扰信号做了仿真分析,窄带干扰与脉冲干扰的干噪比均为 30 dB、窄带干扰带宽为 1 M、脉冲干扰周期为 200 μs 。

10% 占空比的混合干扰仿真波形图如图 5 所示。

由图 5,当脉冲干扰占空比为 10% 时:时域上,脉冲特征明显,存在脉冲干扰的位置幅度大;频域上,脉冲干扰带宽大,窄带干扰的有效带宽被展宽。

20% 占空比的混合干扰仿真波形图如图 6 所示。

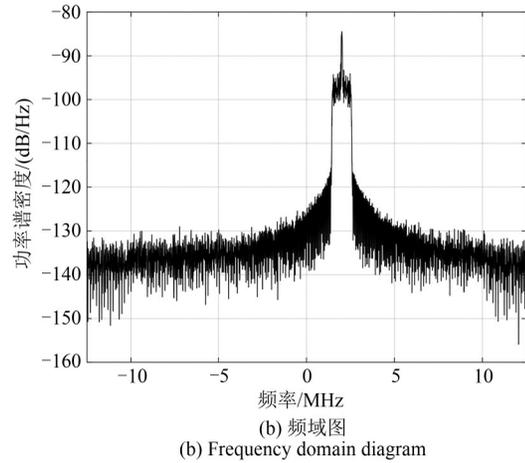
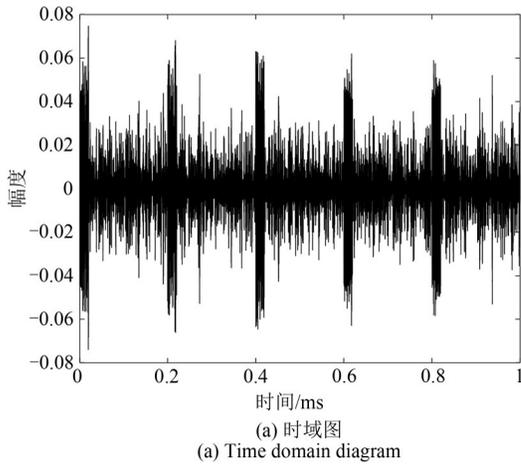


图 5 占空比为 10% 的混合干扰

Fig. 5 Mixed interference with 10% duty cycle

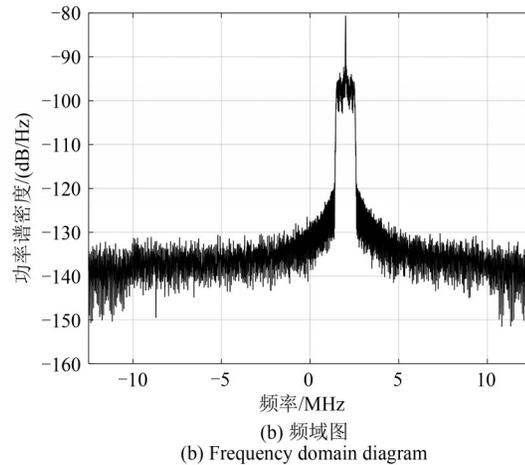
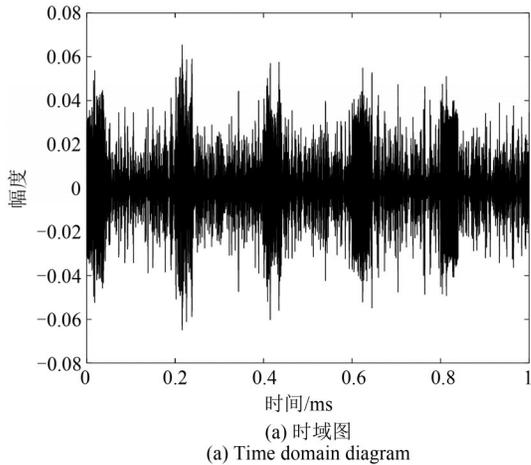


图 6 占空比为 20% 的混合干扰

Fig. 6 Mixed interference with 20% duty cycle

对比图5、图6,当脉冲干扰占空比为20%时,在时域上脉冲干扰和窄带干扰幅度相近,难以划分门限;在频域上,脉冲干扰有效带宽变小,混合干扰的能量更集中。

3.2 脉冲干扰抑制优先的分析

脉冲干扰抑制优先的顺序抗干扰结构是指先在时域上采取过门限置零法抑制脉冲干扰,然后在频域上采用过门限置零法抑制窄带干扰,最后输出抗干扰结果。脉冲干扰抑制优先的结构图如下图7。

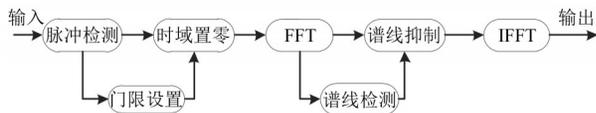


图7 脉冲干扰抑制优先结构图

Fig. 7 Structure of priority of pulse interference suppression

混合干扰 $J[n]$ 在时域上可表示为:

$$J[n] = J_1[n] + J_2[n] \quad (6)$$

对混合干扰进行时域置零处理相当于在时域上乘一个矩形脉冲,该矩形脉冲的周期和脉冲干扰周期相同,占空比和脉冲干扰占空比的和为1。经过时域置零处理后的干扰信号可表示为:

$$J'[n] = (J_1[n] + J_2[n]) \cdot p[n] = J_1[n] \cdot p[n] \quad (7)$$

式中 $p[n]$ 表示占空比为 $1 - \tau/T$ 的矩形脉冲; $J'[n]$ 表示抗脉冲干扰后的信号。时域相乘等效为频域卷积,进行窄带干扰抑制前的干扰信号频谱可表示为:

$$J'(f) = \frac{1}{2\pi} J_1(f) * p(f) \quad (8)$$

式中, $J'(f)$ 、 $J_1(f)$ 、 $p(f)$ 分别为 $J'[n]$ 、 $J_1[n]$ 、 $p[n]$ 的频谱, $p(f)$ 为 Sa 函数。从上式可以分析,将窄带干扰在频域上和 Sa 函数做卷积,相当于展宽了窄带干扰的带宽,使其离散变大,继续进行窄带干扰抑制不可避免会造成干扰残余。

该方法难以确定置零门限,脉冲干扰占空比较大时,窄带和脉冲干扰在时域上混杂在一起,混合干扰时域特征不明显,时域置零门限无法确定。若门限较高,则脉冲干扰抑制不完全;若门限设置值较低,则会导致脉冲与窄带干扰在时域上同时置零,会造成卫星导航信号的过量损耗。

3.3 窄带干扰抑制优先的分析

窄带干扰抑制优先的顺序抗混合干扰结构是指先在频域上抑制窄带干扰,之后在时域上抑制脉冲干扰,最后输出抗干扰结果。窄带干扰抑制优先的结构图如下图8。

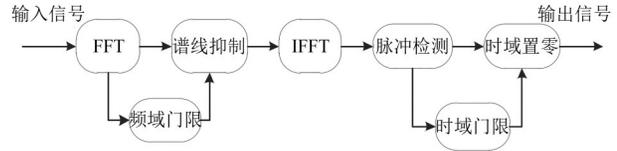


图8 窄带干扰抑制优先结构图

Fig. 8 Structure of priority of narrowband interference suppression

类似的,该方法同样难以确定置零门限,脉冲干扰的存在会影响窄带干扰频谱形状,造成混合干扰有效干扰带宽展宽,脉冲干扰的占空比越小,其带宽越宽,混合干扰信号杂散就会增大。若门限设置过高,则会导致干扰抑制不完全,若门限设置过低,则会增大滤波带宽,造成导航信号的损耗。

4 仿真实验验证

本文在卫星导航接收机软件平台的基础上进行仿真实验,对卫星导航信号从接收、射频前端处理、数字信号处理、抗干扰到载噪比估计进行了整体仿真测试,其结构框图如图9所示。

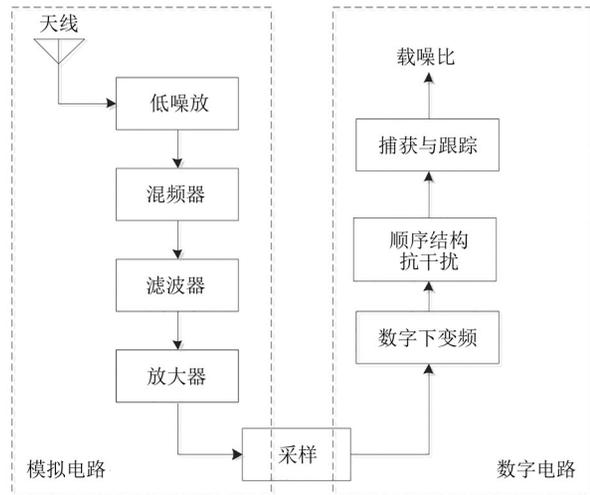


图9 接收机仿真结构图

Fig. 9 Structure of receiver simulation

本文以抗干扰后载噪比的大小评估混合干扰对卫星导航信号的影响,仿真两种顺序抗干扰结构在脉冲与窄带的混合干扰情况下的抗干扰效果,验证理论分析的正确性。

4.1 顺序结构抑制单一干扰

假设干扰只存在窄带干扰,采样率为20 MHz;窄带干扰带宽为1 M;噪声功率谱密度为-145 dBW/Hz;干噪比为30 dB;载噪比初始值为45 dB·Hz;窄带干

扰频域置零门限设置为 0.2,时域置零门限设置为 0.0015。两种顺序抗干扰结构结果基本一样,抗干扰前后的频谱图如图 10 所示。

图 10 中(a)表示卫星导航信号只受到窄带干扰时的频谱图,频域特点十分突出,门限选取方便准确;图(b)展示的是顺序结构抗干扰后的频谱图,干扰抑制比较彻底。通过仿真计算,当干扰比设置为 30 dB 时,抗干扰后的载噪比为 44.23 dB·Hz。

当干扰设置为只存在脉冲干扰时,所有仿真保持脉冲干扰周期 200 us 不变,脉冲干扰占空比分别为 10% 和 20%,干扰比为 30 dB,窄带干扰频域置零门限设置为 1,时域置零门限设置为 0.0015,两种顺序抗干扰结构结果基本一样,卫星导航信号抗干扰前后的频谱图如图 11 所示。

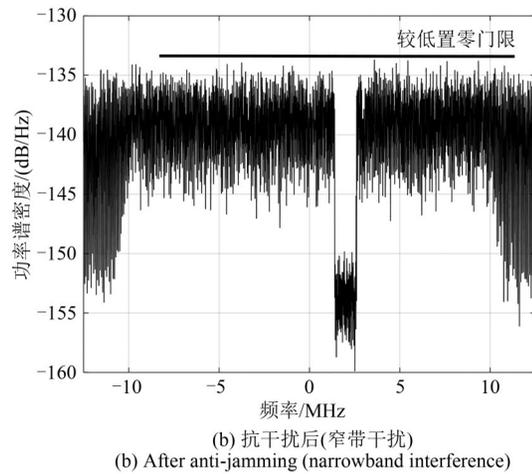
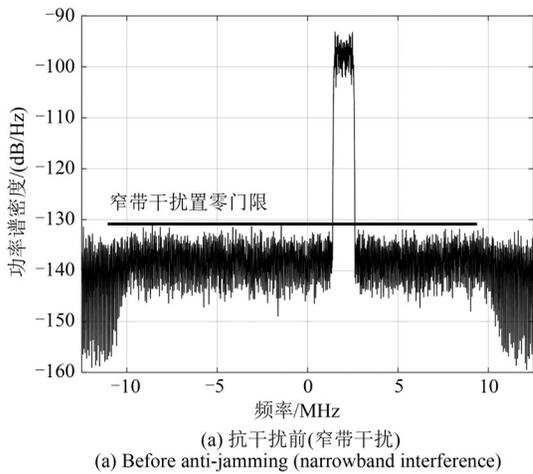


图 10 顺序结构抑制窄带干扰结果图

Fig. 10 Suppression effect of sequence structure on narrowband interference

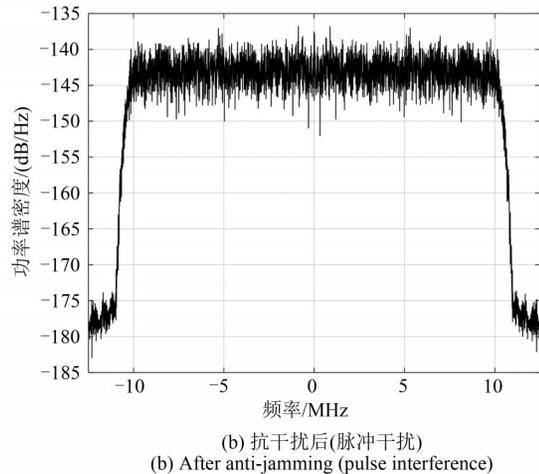
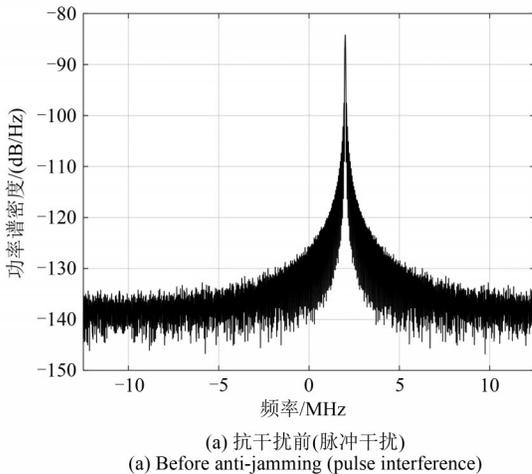


图 11 顺序结构抑制脉冲干扰结果图

Fig. 11 Suppression effect of sequence structure on pulse interference

图 11 中(a)表示卫星导航信号只受到脉冲干扰时的频谱图;图(b)展示的是顺序结构抗干扰后的频谱图,干扰抑制比较彻底。通过仿真计算,当占空比为 10% 和 20% 时,卫星导航信号抗干扰后的载噪比分别为 44.5 dB·Hz 和 43.98 dB·Hz,单一干扰抑制效果良好且载噪比损耗约为 1 dB。

4.2 顺序结构抑制混合干扰

初始载噪比为 45 dB·Hz,脉冲干扰占空比设置为 10%,其余条件不变。为了寻找抗混合干扰的最佳结果,若门限设置过低,导致采样点置零过多或频谱缺失,会损坏卫星导航信号结构,因此限制两个门限的最小值大于噪声幅度。在此基础上遍历窄带干扰抑制门限和脉冲干扰抑制门限,可得两个门限的选取与抗干扰后载噪比的关系图。

图 12(a)是选取优先抑制窄带干扰的顺序结构

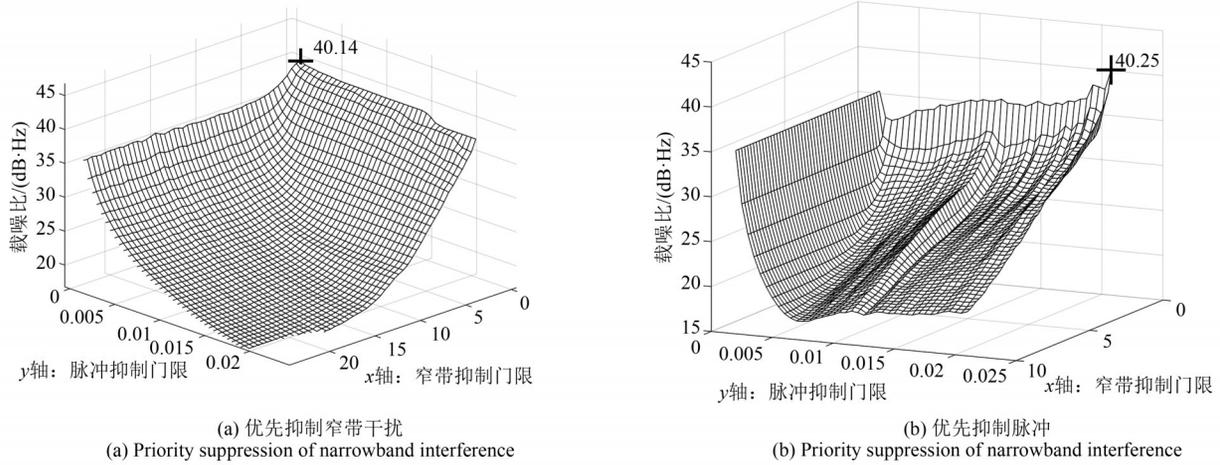


图 12 顺序结构抑制脉冲干扰结果图

Fig. 12 Suppression effect of sequence structure on pulse interference

遍历门限的抗干扰结果。从图中可以看出,在该结构下,抗干扰后载噪比最大为 40.14 dB·Hz,且随着脉冲抑制门限和窄带抑制门限的减小,载噪比不断减小。图 12(b)是选取优先抑制脉冲干扰的顺序结构遍历门限的抗干扰结果,抗干扰后最大载噪比为 40.25 dB·Hz。

根据上述仿真方法和实际情况,设置脉冲干扰占空比范围为 2% 到 20%,以 2% 的间隔遍历,其余参数保持不变。搭建半实物测试平台,以两台安捷伦 E4438C 作为干扰源产生脉冲干扰信号和窄带干扰信号,通过监测接收机采集干扰信号和模拟信号源产生的卫星导航信号,并将数据发送到电脑终端处理。结合上述仿真和实测场景得抗干扰后的载噪比损耗如图 13 所示。

从上面的仿真和实测结果可以看出,单一的脉

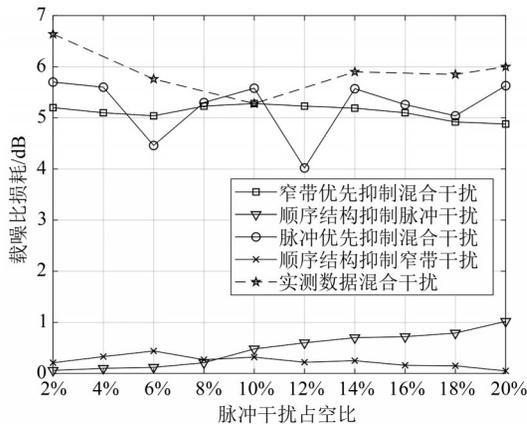


图 13 不同脉冲干扰占空比下的载噪比损耗

Fig. 13 The loss of carrier-to-noise ratio under different duty cycle of pulse interference

冲或窄带干扰造成的载噪比损耗约为 1 dB,混合干扰下,无论是优先抑制窄带干扰还是优先抑制脉冲干扰,抗干扰后载噪比损耗均约为 5 dB。

5 结论

混合干扰对卫星导航接收机的影响与单一干扰不同,本文分析了窄带与脉冲混合干扰的时频域特征,在相同干噪比下,脉冲干扰占空比影响混合干扰的时频域幅值和干扰有效带宽。优先抑制窄带干扰和优先抑制脉冲干扰的顺序结构可以抑制混合干扰,干扰抑制效果无明显差异。

通过本文仿真分析,单一干扰下,抗干扰后载噪比损耗约为 1 dB;混合干扰的影响大于单一脉冲或窄带干扰的和,抗干扰损耗约为 5 dB。本文的影响分析对卫星导航终端抗干扰性能评估提供了理论方法,支撑了北斗三号地面运控系统某分系统卫星导航接收终端的研制。

研究表明:窄带干扰和脉冲干扰信号的时频域特征会相互影响,传统抗干扰结构在按顺序抑制混合干扰时效果较差,所以可以采取以下方法进行改进:通过检测和识别脉冲干扰参数,改变 FFT 的步进长度,跳过脉冲存在的数据段,先抑制窄带干扰,再抑制脉冲干扰。

参考文献

[1] 毛虎,吴德伟,卢虎.对 GPS 接收机多音干扰参数优化设置及效能分析[J].系统工程与电子技术,2019,41(8): 1699-1704.
MAO Hu, WU Dewei, LU Hu. Parameters configuration

- and effectiveness analysis of multiple-tone jamming to GPS receiver [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(8): 1699-1704. (in Chinese)
- [2] 林汝景. 北斗卫星导航接收机抗窄带干扰技术研究[J]. *电子测试*, 2020(2): 40-42, 65.
LIN Rujing. Research on anti_narrowband interference technology of Beidou satellite navigation receiver [J]. *Electronic Test*, 2020(2): 40-42, 65. (in Chinese)
- [3] LU Zukun, NIE Junwei, WAN Youda, et al. Optimal reference element for interference suppression in GNSS antenna arrays under channel mismatch [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(7): 1161-1169.
- [4] LV Q, QIN Honglei. General method to mitigate the continuous wave interference and narrowband interference for GNSS receivers [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(9): 1430-1435.
- [5] WENG Jun, LIU Jianning, JIAO Mingxing, et al. Analysis and on-line compensation of gravity disturbance in a high-precision inertial navigation system [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 1-8.
- [6] 张家连, 郎荣玲, 赵辰乾, 等. GNSS中的脉冲干扰自适应空域抑制算法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2020, 18(1): 43-49.
ZHANG Jialian, LANG Rongling, ZHAO Chenqian, et al. Pulsed interference adaptive spatial processing algorithm in GNSS [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2020, 18(1): 43-49. (in Chinese)
- [7] 何瑞珠, 刘彦明. 通用导航接收机的脉冲干扰评估方法[J]. *移动通信*, 2017, 41(11): 40-43, 51.
HE Ruizhu, LIU Yanming. A method of pulse interference evaluation for common navigation receiver [J]. *Mobile Communications*, 2017, 41(11): 40-43, 51. (in Chinese)
- [8] SHAKHOVOY R, SHAROGLAZOVA V, UDALTSOV A, et al. Influence of chirp, jitter, and relaxation oscillations on probabilistic properties of laser pulse interference [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, 57(2): 1-7.
- [9] 王彬, 王海旺, 李勇斌. 脉冲噪声环境下的水声通信信号调制识别方法[J]. *信号处理*, 2020, 36(12): 2107-2115.
WANG Bin, WANG Haiwang, LI Yongbin. Modulation recognition method of underwater acoustic communication signal in impulsive noise environment [J]. *Journal of Signal Processing*, 2020, 36(12): 2107-2115. (in Chinese)
- [10] 白杨柳, 张天骐, 冯嘉欣, 等. 改进K-means算法对AltBOC信号组合码序列的盲估计[J]. *信号处理*, 2020, 36(5): 695-702.
BAI Yangliu, ZHANG Tianqi, FENG Jiabin, et al. Blind estimation of AltBOC signal sequence using improved K-means algorithm [J]. *Journal of Signal Processing*, 2020, 36(5): 695-702. (in Chinese)
- [11] 刘佳敏, 赵知劲, 曹越飞, 等. 基于时频分析的多跳频信号盲检测[J]. *信号处理*, 2021, 37(5): 763-771.
LIU Jiamin, ZHAO Zhijin, CAO Yuefei, et al. Blind detection of multiple frequency hopping signals based on time-frequency analysis [J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(5): 763-771. (in Chinese)
- [12] 李文吉, 任丽香, 范花玉, 等. 低信噪比下脉冲重复周期渐变波形的相推测速实现[J]. *信号处理*, 2021, 37(2): 159-166.
LI Wenji, REN Lixiang, FAN Huayu, et al. Phase estimation of pulse repetition period gradual waveform at low SNR [J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(2): 159-166. (in Chinese)
- [13] ZHANG Dongxiao, ZHOU Xing, CHENG Erwei, et al. Investigation on effects of HPM pulse on UAV's datalink [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, 62(3): 829-839.
- [14] PURIČER P, KOVÁŘ P, MIKEŠ J. New accuracy testing of the lightning VHF interferometer by an artificial intercloud pulse generator [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, 62(5): 2128-2136.
- [15] ŠTUMPF M. Pulsed EM plane-wave coupling to a transmission line over orthogonal ground planes: An analytical model based on EM reciprocity [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(1): 324-327.
- [16] 郭海玉, 鲁祖坤, 陈飞强, 等. 窄带与脉冲干扰对卫星导航信号载噪比的影响[J]. *全球定位系统*, 2021, 46(1): 50-56.
GUO Haiyu, LU Zukun, CHEN Feiqiang, et al. Effects of narrowband and pulse interference on the carrier-to-noise ratio of satellite navigation signals [J]. *GNSS World of China*, 2021, 46(1): 50-56. (in Chinese)
- [17] 梁欣萌. 北斗民用信号干扰检测与识别技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
LIANG Xinmeng. Research on interference detection and identification technology of Beidou civil signal [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [18] WU Qiang, ZHENG Jiansheng, DONG Zhicheng, et al. Interference detection algorithm based on adaptive subspace tracking and RAIM for GNSS receiver [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(9): 1028-1037.
- [19] DAI Xinshi, NIE Junwei, CHEN Feiqiang, et al. Distortionless space-time adaptive processor based on MVDR beamformer for GNSS receiver [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(10): 1488-1494.
- [20] 张爱勇. 民用航空测距信号对北斗导航信号的干扰研

- 究[J].移动通信, 2016, 40(9):81-84.
ZHANG Aiyong. Research on civilian aeronautical distance measurement signal interference on BeiDou navigation system[J]. Mobile Communications, 2016, 40(9): 81-84.(in Chinese)
- [21] LU Zukun, CHEN Huaming, CHEN Feiqiang, et al. Blind adaptive channel mismatch equalisation method for GNSS antenna arrays[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(4): 383-389.
- [22] HUR J, BYUN G, CHOO H. Design of parabola-shaped planar lossy magnetic surface for improved isolation characteristic between GPS array elements with circular polarization property[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(1): 139-142.
- [23] LI Qiang, WANG Wei, XU Dingjie, et al. A robust anti-jamming navigation receiver with antenna array and GPS/SINS[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(3): 467-470.
- [24] WANG Li, LI Zhen, LI Ming, et al. Self-powered filterless narrow-band p-n heterojunction photodetector for low background limited near-infrared image sensor application [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(19): 21845-21853.
- [25] JOVITH A A, RAJA S V K, SULTHANA A R. Interference mitigation and optimal hop distance measurement in distributed homogenous nodes over wireless sensor network [J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2020, 13(4): 1109-1119.
- [26] PENG Yanfeng, CHEN Junhang, LUO Ruiqiong, et al. Complementary ensemble adaptive sparsest narrow-band decomposition method and its applications to the gear crack fault diagnosis[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(3): 168781402091053.
- [27] BEK M K, SHAHEEN E M, ELGAMEL S A. Mathematical analyses of pulse interference signal on post-correlation carrier-to-noise ratio for the global positioning system receivers[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9(3): 266-275.
- [28] LU Zukun, NIE Junwei, CHEN Feiqiang, et al. Adaptive time taps of STAP under channel mismatch for GNSS antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(11): 2813-2824.
- [29] FERRARA N G, BHUIYAN M Z H, SÖDERHOLM S, et al. A new implementation of narrowband interference detection, characterization, and mitigation technique for a software-defined multi-GNSS receiver [J]. GPS Solutions, 2018, 22(4): 1-15.
- [30] 丁梦羽,许睿,刘建业,等.脉冲干扰对软件接收机的影响分析[J].导航定位与授时, 2017, 4(3):58-65.
DING Mengyu, XU Rui, LIU Jianye, et al. Analysis of pulse interference effects on the software receiver [J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(3): 58-65. (in Chinese)
- [31] 霍树民. 脉冲与窄带及其复合干扰检测与抑制技术[D].长沙:国防科学技术大学, 2015.
HUO Shumin. Detection and mitigation techniques of pulsed interference and narrowband interference, and the compound [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)

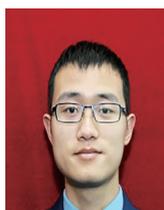
作者简介



郭海玉 男,1997年生,山东潍坊人。国防科技大学电子科学学院硕士研究生,主要研究方向为导航与时空技术、干扰与抗干扰。
E-mail: 3282745059@qq.com



刘小汇 女,1976年生,湖南长沙人。国防科技大学电子科学学院研究员,博士,主要研究方向为星基导航与定位技术、卫星导航抗干扰技术。
E-mail: lululiu_nudt@sina.com



鲁祖坤 男,1989年生,湖南长沙人。国防科技大学电子科学学院讲师,博士,主要研究方向为星基导航与定位技术、卫星导航抗干扰技术。
E-mail: luzukun@nudt.edu.cn



刘哲 男,1988年生,湖南长沙人。国防科技大学电子科学学院讲师,博士,主要研究方向为星基导航与定位技术。
E-mail: 15274999913@163.com



庄钊文(通信作者) 男,1958年生,湖南长沙人。国防科技大学电子科学学院教授,博士,主要研究方向为目标识别、卫星导航定位等。
E-mail: zwzhuang@nudt.edu.cn