

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.03.010

## 脉冲干扰对软件接收机的影响分析

丁梦羽<sup>1</sup>, 许睿<sup>1</sup>, 刘建业<sup>1</sup>, 熊智<sup>1</sup>, 郁丰<sup>2</sup>, 戴伟昊<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学导航研究中心, 南京 211100; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016)

**摘要:** 卫星信号经过长距离传播, 信号能量损耗严重, 到达地面的功率很弱, 容易受到各种干扰的影响。脉冲干扰为常见的干扰类型, 所以针对不同功率、不同周期, 以及不同占空比的脉冲干扰信号, 通过接收前端采集受脉冲干扰的 GPS L1 信号, 利用软件接收机及多相关器生成技术, 详细分析了脉冲干扰对接收机信号捕获与跟踪性能的影响。分析结果表明, 周期为 1ms 的脉冲干扰信号, 能对接收机产生强烈的干扰效果, 捕获图中的噪声明显增大; 跟踪过程中, 载噪比和相关值突发性减小, 造成跟踪数据异常。而长周期的脉冲信号仅在脉冲到达时影响接收机的捕获和跟踪, 但由于信号跟踪不能连续进行, 导致伪距观测量的不连续与导航数据不能正常解码, 从而干扰接收机。

**关键词:** 卫星导航; 多相关器; 捕获; 跟踪; 脉冲干扰

**中图分类号:** TN967.1; TN97      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-8110(2017)03-0058-08

## Analysis of Pulse Interference Effects on the Software Receiver

DING Meng-yu<sup>1</sup>, XU Rui<sup>1</sup>, LIU Jian-ye<sup>1</sup>, XIONG Zhi<sup>1</sup>, YU Feng<sup>2</sup>, DAI Wei-hao<sup>1</sup>

(1. Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China;  
2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;)

**Abstract:** After long distance transmission, the power of satellite signals reaching the ground experiences serious loss and is very weak. Thus, the signals can easily be affected by various kinds of interference. As pulse interference is a typical interference, the effects of the periodic pulse interference with different power, period and duty cycle on the GPS L1 signals are analyzed in the paper. Firstly, the interfered GPS L1 signals are collected by a GNSS Front End and analyzed in a software receiver. Then, we focused on the pulse interference effects on the acquisition and tracking processes of the receiver and multi-correlators are used to generate the auto-correlation function. Finally, the test results show that the pulse interference with a short period (1ms) degrades the receiver performance significantly. In acquisition process, the noise level increases and the peak value referring to the satellite signal reduces correspondingly. The values of the correlation and  $C/N_0$  decrease suddenly during tracking process. However, the pulse interference with a long period affects the receiver only when the pulse arrives. The discrete signal tracking leads to discontinuous pseudorange measurements and abnormal navigation data, hence the receiver is interfered.

**Key words:** Satellite navigation; Multi-correlator; Acquisition; Tracking; Pulse interference

收稿日期: 2016-10-20; 修订日期: 2017-02-06

基金项目: 科研基地(理工类)创新基金(XCA16028)

作者简介: 丁梦羽(1994-), 女, 硕士, 主要从事 GNSS 软件接收机应用与 GNSS 抗干扰技术的研究。

E-mail: mengyuding@nuaa.edu.cn

## 0 引言

目前,全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)已被广泛地应用于生产生活的众多方面。然而,信号从卫星到达地面接收机,经过了约2万km的传播,到达地面时,信号功率损耗至约-130dBm<sup>[1]</sup>,很容易受到故意或无意的无线电干扰。这些干扰降低了接收机的捕获能力,增加了跟踪环路误差,造成环路失锁、丢星,最终降低接收机定位的精度、连续性和可靠性<sup>[2-3]</sup>。因此,通过干扰检测与抑制等手段,提高GNSS系统抗干扰能力就显得尤为重要。而GNSS接收机在不同干扰影响下所表现出的特点,则是GNSS抗干扰技术研究的前提,能够为干扰信号的检测与抑制算法研究提供必要的理论基础。

近年来,已有许多分析干扰对接收机影响的方法,如基于接收机前端AGC输出变化的分析方法<sup>[4-5]</sup>、基于捕获环节二维捕获图的方法<sup>[6-7]</sup>等。而分析干扰对跟踪环路的影响却相对较少。在跟踪环路中,利用多相关器技术可获得接收信号的自相关函数,其优点是通过对相关曲线更大程度地复现信号的特征,也是目前研究的热点,并多用于多径信号的研究<sup>[8]</sup>,本文将此方法应用于分析脉冲干扰对GNSS接收机捕获与跟踪性能的影响。目前,针对脉冲干扰特性的相关研究,大多关注周期在 $10^{-6}$ s数量级的短时脉冲对接收机的影响<sup>[9-10]</sup>。由于短时脉冲周期与C/A码周期相当,容易影响C/A码解扩过程中的相干积分结果,导致跟踪误差增加,甚至信号失锁等问题,降低接收机的可靠性。然而,短时脉冲的实现功耗大、成本高<sup>[11]</sup>,因此,本文针对能耗与成本均较低的长周期脉冲干扰,即脉冲周期大于 $10^{-3}$ s的脉冲干扰,研究具有不同功率、占空比的脉冲干扰对接收机捕获与跟踪性能的影响。

## 1 脉冲干扰

脉冲干扰信号在时域上,具有周期性 with 间断性的特点,可表示为

$$f(t) = A[\epsilon(t + nT) - \epsilon(t + nT + T_c)] \quad (1)$$

其中, $\epsilon(t)$ 为阶跃信号, $A$ 为脉冲幅度, $T_c$ 为脉冲宽度, $T$ 为脉冲周期。 $T_c$ 与 $T$ 的比值 $T_c/T$ 被定义为占空比,记作 $DC$ 。脉冲干扰信号在频域上,表现出明显的脉冲对称性,且中心频率处的谱值最大。

通常,脉冲干扰的产生具有突发性,会突然影

响接收机的捕获、跟踪和定位结果<sup>[12]</sup>。

## 2 信号捕获和跟踪算法

接收机中,信号捕获是为了获得所接收信号的近似载波多普勒频率与C/A码相位。本文采用并行码相位一串行多普勒搜索方法,若频率搜索步长为150Hz,搜索范围(-4950Hz,4950Hz),搜索次数则为67次。

跟踪环路是接收机中最为关键的模块之一,能够精确确定信号的载波多普勒频率和C/A码相位,从而测量输出卫星信号的各种测量值。码跟踪环路主要依据伪码的自相关性工作,具体的自相关函数可表示为

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau)dt \quad (2)$$

自相关函数值在 $\tau=0$ 时达到最大,表示进行相关的2个信号完全一致,即时间同步。接收机利用该特性,一方面可以得到接收信号的码相位,用以获得伪距观测量,进而解算接收机位置;另一方面可以剥离接收信号的伪码,实现解扩,从而得到导航电文。一般而言,接收机利用超前、即时、滞后3路相关器,即可实现卫星信号的跟踪。通常超前-滞后相关器间隔1chip,为得到更精确的伪距观测量来提高定位精度,可采用较小间隔的相关器进行跟踪,如0.2chip<sup>[13]</sup>。

多相关器则利用多个小间隔相关器对自相关函数进行采样,相关器的间隔越小,得到的相关曲线准确度越高。图1所示为基于多相关器的跟踪环路结构。输入信号与本地生成的载波相乘,得到剥离载波的同相 $I$ 和正交 $Q$ 两路信号。 $I$ 、 $Q$ 两路信号再分别与一组具有不同延时的本地码相关,得到同相相关值 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 和正交相关值 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 。

自相关曲线由一系列同相相关值 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 拟合获得,在拟合前每个相关值顺序经过相干积分器和非相干积分器,以达到减少噪声的目的。噪声信号是非相干信号,经过相干积分后得到有效抑制。但受导航数据的长度限制,相干积分时间有限。而非相干积分不受导航数据位翻转影响,但积分中噪声也被累加,产生平方损耗<sup>[14]</sup>。所以采用图2所示的相干积分和非相干积分组合方式来减小相关值噪声。

其中,第 $k$ 通道的相干积分值 $I_{\text{coh}}^k = \sum_{n=1}^{T_{\text{coh}}} I_{t_i}^k$ ,第 $k$ 通道的非相干积分值 $I_{\text{NC}}^k = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_{\text{NC}}} (I_{\text{coh}}^k)^2}$ 。 $I_{t_i}^k$ 表示第 $k$ 通道时间为 $t_i$ 的1ms相关器输出。针对不

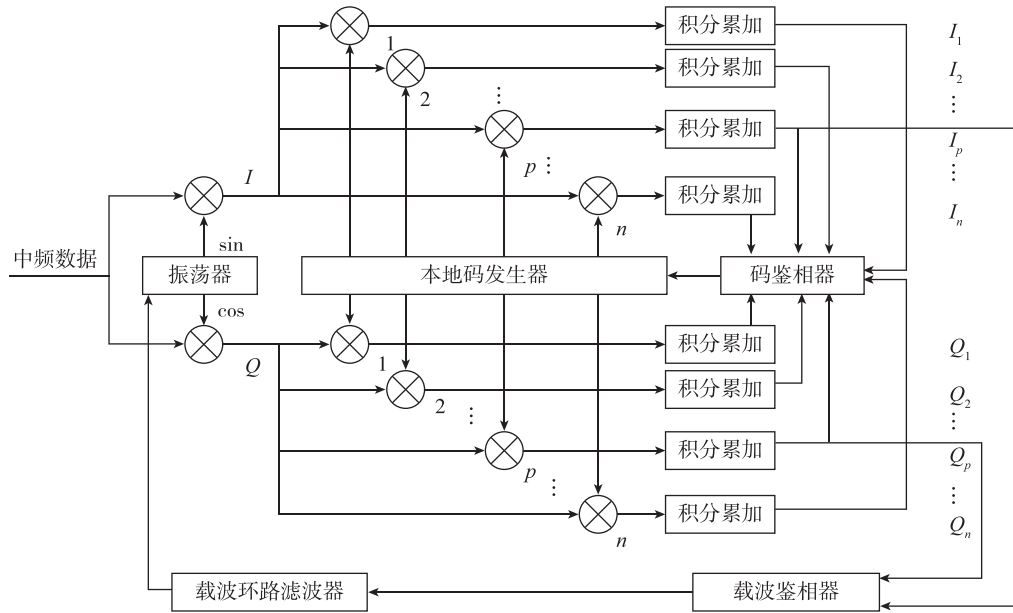


图 1 基于多相关器的跟踪环框图

Fig. 1 Tracking loop diagram with multi-correlators

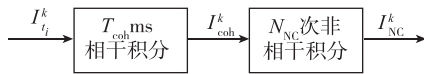


图 2 相干积分与非相干积分组合图

Fig. 2 Combination of coherent and incoherent integration

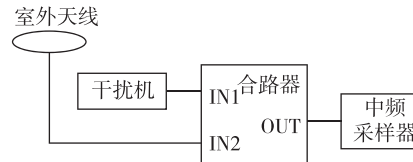


图 3 数据采集结构图

Fig. 3 Data acquisition

同干扰,选择不同相干积分时间  $T_{coh}$  和非相干次数  $N_{NC}$  组合处理得到各通道  $I_{NC}^k$  值进行曲线拟合。

### 3 仿真与分析

为研究脉冲干扰对 GNSS 接收机的影响情况,本文利用干扰器与软件接收机搭建干扰信号的采集与测试系统,分析研究脉冲式干扰对 GNSS 接收机捕获与跟踪性能的影响。

#### 3.1 仿真环境

图 3 所示为本文所采用的干扰信号采集系统结构图。

图 3 中,室外天线 ( $31^{\circ}56'20.44''N, 118^{\circ}47'33.49''E, 35.44m$ ) 用于接收真实 GPS 信号,所接收的 GPS 信号与干扰器生成的脉冲干扰信号经合路器混合,模拟脉冲干扰对 GNSS 信号的干扰场景。混合后的信号由接收前端(东方联星 NewStar210M 中频采样器)采集并存储,最后利用本文所设计的多相关器接收机进行数据解算与分析。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

接收前端		跟踪环路		脉冲干扰	
采样率	16.367667MHz	$T_{coh}/N_{NC}$	$T_{coh}=2.5ms/N_{NC}=5, 10, 20$ 次	周期 $T/ms$	1, 10, 200, 1000
中频	4.123968MHz	DLL 带宽/PLL 带宽	1Hz/10Hz	占空比 $DC$	0.3, 0.5, 0.7
带宽	2MHz	多相关器间隔	0.0625chip	输出功率 $P$	-60dBm~0dBm

#### 3.2 脉冲干扰在捕获环节的影响

图 4 所示为脉冲干扰影响下的捕获结果 (PRN12)。其中  $T=10ms$  和  $200ms$  的捕获图与

$T=1s$  特征类似,取脉冲干扰周期为 1s 的影响结果作为代表分析;图 4(a)为正常信号的捕获结果,有明显的相关峰;脉冲周期为 1ms 的捕获结果如图 4

(b)所示,噪声在相隔 1000Hz 的多普勒频率处明显增大。而图 4(c)(d)为脉冲干扰周期为 1s 时的捕获情况,由于脉冲干扰周期长,捕获结果呈现两种形式:(c)为脉冲未到达时,噪声很弱,有明显相关峰;而(d)时,脉冲到达,信号完全被脉冲干扰淹没,接收机很难捕获到卫星。

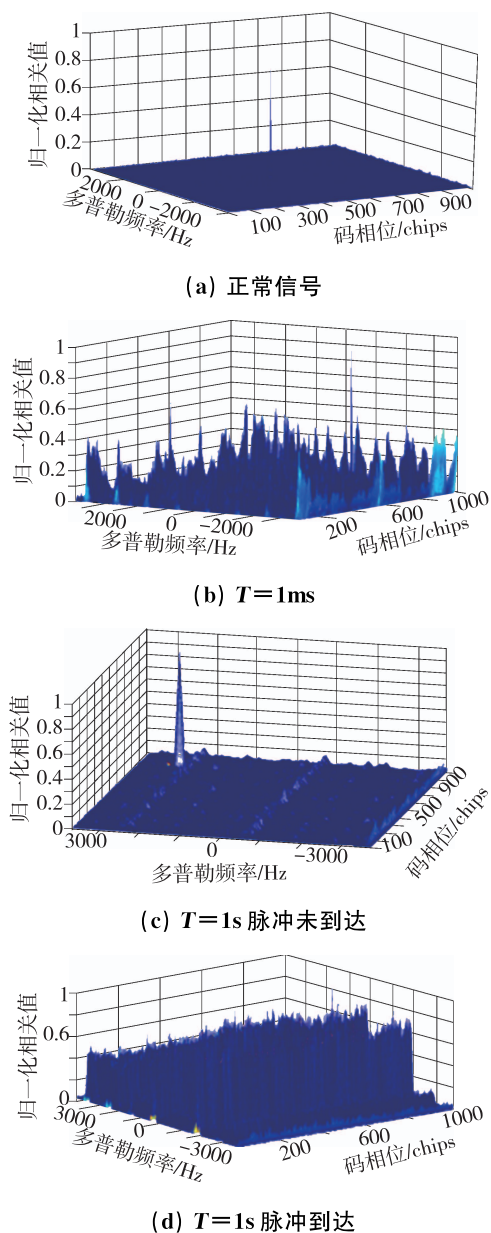


图 4 脉冲干扰下接收机捕获结果 ( $DC=0.3, P=-60\text{dBm}$ )  
Fig. 4 Acquisition results with pulse interference

可见,从 1ms 到 1s,脉冲干扰周期变长,对比 (c)(d)可以看出,脉冲干扰未作用时,基底噪声很小,当脉冲到达时,基底噪声变大。而(b)在周期为 1ms 的脉冲信号干扰下,基底噪声始终很大,说明小周期的脉冲干扰持续影响信号的捕获,而长周期

的脉冲干扰只在脉冲存在时对信号产生影响。

同功率、同周期,不同占空比的脉冲干扰下可捕获的数据分析结果与  $DC=0.3$  时仿真分析结果相似,但  $DC=0.7$  和  $DC=0.5$  时,周期为 1ms 的脉冲干扰将卫星信号完全淹没,无法捕获该卫星信号;而在相同占空比和周期的干扰下,结果表明随功率的增大,信号的干扰和噪声基底的幅值增大,捕获概率随之变小。

由于卫星信号中 C/A 码周期是 1ms,而脉冲干扰的实际作用时间为  $T \times DC$ ,当  $T$  为 1ms 时,脉冲干扰持续影响接收机每一毫秒的相干积分结果,严重降低捕获性能。而当  $T \gg 1\text{ms}$  时,脉冲持续时间大于 1ms,会影响相干积分结果,造成捕获性能下降,但在脉冲消失阶段时,接收机则可能捕获上卫星信号。

### 3.3 脉冲干扰在跟踪环节的影响

#### 1) 载噪比变化

在接收机的软硬件参数不变的情况下,载噪密度(Carrier to Noise Density ratio,  $C/N_0$ , 本文简称载噪比)受接收到信号的信噪比影响,可以反映信号信噪比的变化情况。图 5 所示为不同功率的脉冲干扰下,  $C/N_0$  的变化情况。  $C/N_0$  由相关器输出值 ( $I_p, Q_p$ ) 根据 PRM 估计算法<sup>[15-16]</sup> (Power Ratio Method) 获得。仿真中,从 10s 开始加入  $DC=0.3, T=200\text{ms}$  的脉冲干扰,干扰信号功率从  $-60\text{dBm}$ , 每经过 30s 增加 10dB, 直至  $-10\text{dBm}$ 。图 5 中,  $C/N_0$  在 0~10s 未受干扰期间,维持在  $44\text{dB} \cdot \text{Hz}$ ; 受脉冲干扰后,  $C/N_0$  出现周期性的衰减,该周期与脉冲干扰周期一致,而衰减时间与脉冲持续时间一致;脉冲干扰的功率增大到  $0\text{dBm}$ ,  $C/N_0$  值减小到  $23\text{dB} \cdot \text{Hz}$ , 持续低于跟踪门限 ( $25\text{dB} \cdot \text{Hz}$ )。整体上,脉冲干扰功率增大会压制信号的功率。

图 6 所示为  $DC=0.3, P=-60\text{dBm}$  时,不同

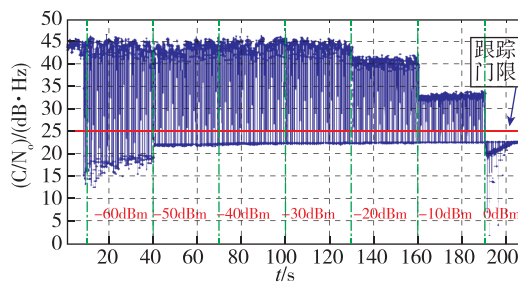


图 5 不同功率脉冲干扰的信号  $C/N_0$  变化情况  
Fig. 5 The  $C/N_0$  of signal with different power pulse interference

周期的脉冲干扰对载噪比的影响情况。 $T=1\text{ms}$  和  $10\text{ms}$  时,信号受干扰压制, $C/N_0$ 下降  $10\text{dB}\cdot\text{Hz}$ 。由于脉冲干扰的频率高,所以载噪比剧烈振荡,振荡范围约  $15\text{dB}\cdot\text{Hz}$ ;而  $T=200\text{ms}$  和  $1\text{s}$  时, $C/N_0$  出现周期性跳变,与图 5 所示情况类似,其变化和脉冲出现频率一致,脉冲到达, $C/N_0$ 就突然大幅下降,脉冲消失,其恢复到较高水平。

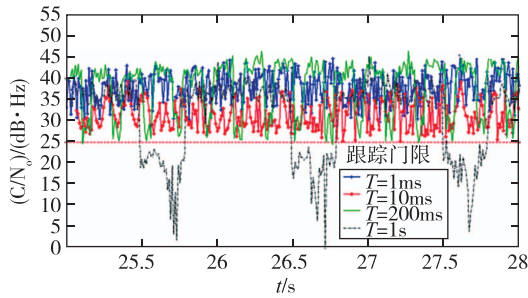


图 6 不同周期脉冲干扰下  $C/N_0$  变化情况

Fig. 6 The  $C/N_0$  of pulse interfered signal with different periods

仿真还分析了  $T=10\text{ms}$ ,不同占空比干扰影响的载噪比变化,其中  $DC=0.7$  时,接收机无法跟踪信号,无有效  $C/N_0$  值; $DC=0.5$  时, $C/N_0$  持续振荡,与  $DC=0.3$  的变化类似。而  $T=200\text{ms}$  的干扰下不同占空比的载噪比变化情况如图 7 所示,随占空比增大, $C/N_0$  在低值范围的保持时间变长,与脉冲时间一致,在脉冲消失后, $C/N_0$  仍能恢复到较高水平。周期为  $1\text{s}$  的不同占空比干扰下的  $C/N_0$  变化情况与周期为  $200\text{ms}$  一致。

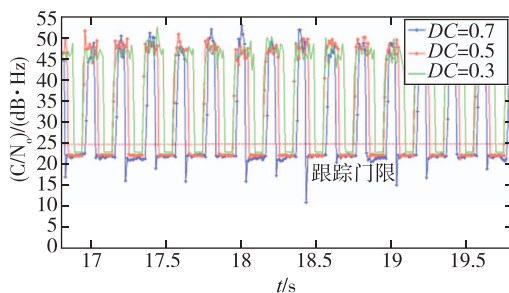


图 7 不同占空比的脉冲干扰下  $C/N_0$  变化情况

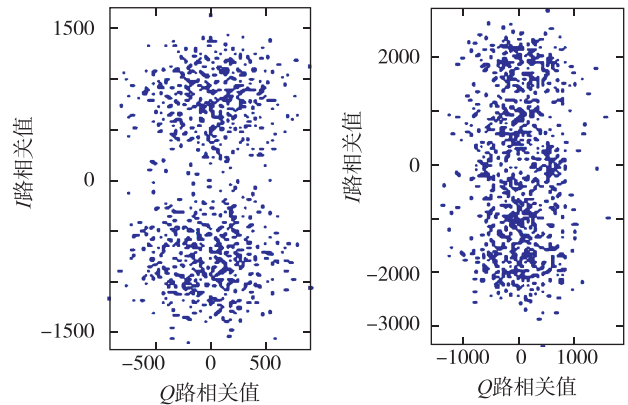
Fig. 7 The  $C/N_0$  of pulse interfered signal with different duty cycles

综上,周期为  $1\text{ms}$  和  $10\text{ms}$  的脉冲干扰下, $C/N_0$  衰减后的值依旧在跟踪门限上,而周期  $200\text{ms}$  和  $1\text{s}$  的脉冲干扰下, $C/N_0$  衰减后的值接近或远低于跟踪门限,因此需结合跟踪结果判断信号是否失锁。

## 2) 相关值变化

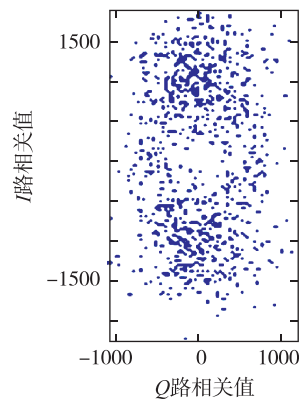
图 8 所示为  $P=-60\text{dBm}$ ,不同周期和占空比

的脉冲干扰下的即时相关值散点( $I-Q$  散点)图。无干扰时, $I-Q$  散点图聚集度高,呈现出对称的 2 个圆形<sup>[13]</sup>。而在脉冲干扰下的散点图表现有所不同,如图 8 所示:加入脉冲干扰后散点图的离散程度变大。相同周期的脉冲干扰下,占空比增大,导致信号被干扰影响的时间变长,失锁时间变长,所以  $I-Q$  在 原点处集中度变高。



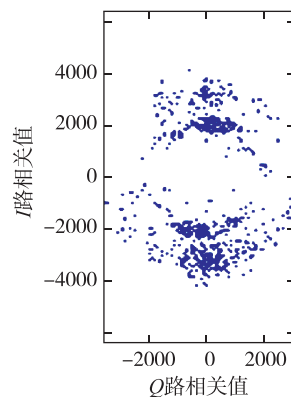
(a)  $T=1\text{ms}, DC=0.3$

(b)  $T=10\text{ms}, DC=0.3$



(c)  $T=1\text{s}, DC=0.3$

(d)  $T=200\text{ms}, DC=0.3$



(e)  $T=200\text{ms}, DC=0.5$

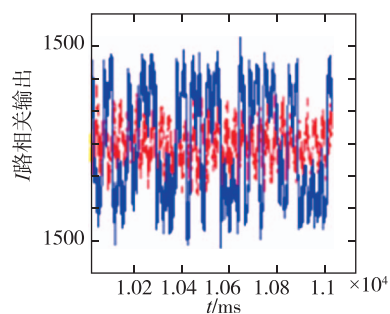
(f)  $T=200\text{ms}, DC=0.7$

图 8 不同脉冲干扰下的即时散点图

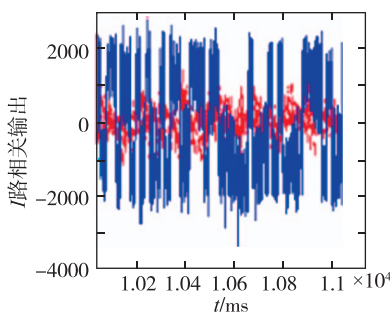
Fig. 8 Present correlation's scatter plot under different pulse interference



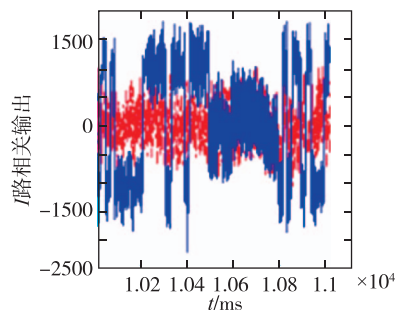
图 9 所示为  $P = -60\text{dBm}$ , 不同周期和占空比脉冲干扰影响下, 即时相关值随时间变化情况。蓝色实线为同相支路的即时相关值, 红色点划线为噪声测量误差等引起的正交支路即时相关值。在  $DC = 0.3$  的情况下: (a) 为  $T = 1\text{ms}$  的脉冲干扰下的跟踪结果, 由于导航数据比特率为  $50\text{bit/s}$ , 跟踪模块采样频率为  $1000\text{sps}$ , 所以 20 个跟踪值替换为 1 个导航数据值, 但是由于即时相关值波动很大, 导致很多即时相关值不能保持  $20\text{ms}$  就发生反相, 这种状况会导致导航数据的错误解码或缺失, 定位结果有误差或不能定位; (b) 为  $T = 10\text{ms}$  的脉冲干扰下的跟踪结果, 相关值抖动频率与脉冲频率一致, 但由于相关值抖动范围大, 结合散点图可知信号离散度大, 接近失锁, 接收机很难定位; (c) 为  $T = 200\text{ms}$  和  $1\text{s}$  的脉冲干扰下的跟踪结果, 失锁每  $200\text{ms}$  和  $1\text{s}$  出现一次, 每次持续  $60\text{ms}$  和  $300\text{ms}$ , 其余时刻保持跟踪, 这与预设脉冲参数吻合, 由于失锁导致导航数据断续, 因此不能得到稳定的定位结果。在  $T = 200\text{ms}$  的情况下: 图 9(d)(e)(f) 是占空比分别为  $0.3$ 、 $0.5$  和  $0.7$  的干扰下的跟踪结果, 失锁每  $200\text{ms}$  出现一次, 每次持续时长分别是  $60\text{ms}$ 、 $100\text{ms}$  和  $140\text{ms}$ , 其余时刻保持跟踪状态, 与预设脉冲参数一致。仿真还分析了周期为  $10\text{ms}$  和  $1\text{s}$  的不同占空比下的干扰情况, 其中周期  $10\text{ms}$  的



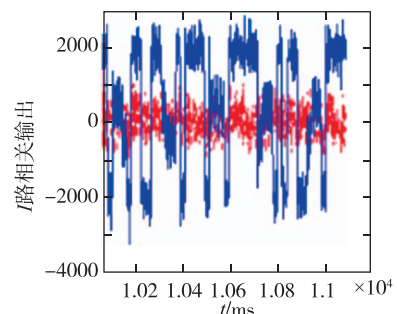
(a)  $T = 1\text{ms}, DC = 0.3$



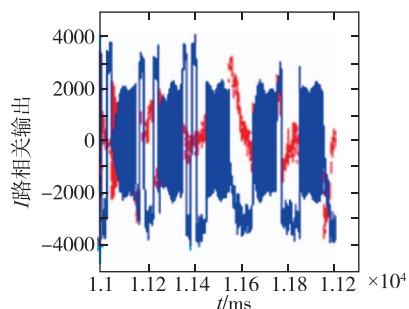
(b)  $T = 10\text{ms}, DC = 0.3$



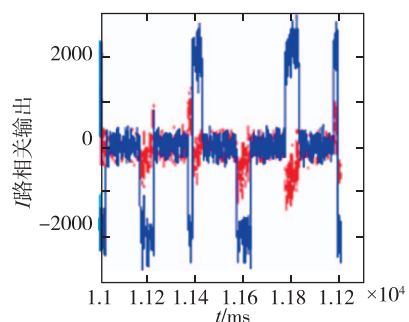
(c)  $T = 1\text{s}, DC = 0.3$



(d)  $T = 200\text{ms}, DC = 0.3$



(e)  $T = 200\text{ms}, DC = 0.5$



(f)  $T = 200\text{ms}, DC = 0.7$

图 9 不同脉冲干扰下的即时相关值

Fig. 9 Present correlation under different pulse interference

干扰下, 随占空比增大, 跟踪效果变差, 部分环路完全失锁。而对于周期为  $1\text{s}$  的不同占空比下, 信号失锁长度也随占空比的变大而变长。

对比分析可知:  $T = 1\text{ms}$  及以下的脉冲干扰能够对接收机的跟踪产生连续性的影响, 造成导航数据的错误甚至完全失锁, 影响定位结果; 当周期增

大时,脉冲干扰压制信号并造成相关值振荡,导致接收机受到断续的干扰,解调出的导航数据不连续,接收机不能持续稳定输出跟踪结果,而当  $T$  和  $DC$  使得接收机不受脉冲干扰的时间足够大时,接收机能根据断续的跟踪结果进行定位,这种情况时干扰意义不大。

### 3) 相关曲线变化

不同状态下的相关曲线特性不同,综合分析各项数据,正常信号相关曲线图与  $T=200\text{ms}$ ,  $DC=0.3$ ,  $P=-60\text{dBm}$  脉冲干扰未到达的曲线特征相似,各参数下脉冲干扰到达时的相关曲线表现特点也类似,所以截取了  $200\text{ms}$  的相关曲线变化分析。

图 10 所示为  $T=200\text{ms}$ ,  $DC=0.3$ ,  $P=-60\text{dBm}$  的脉冲干扰下,相关值经过相干积分和非相干积分消噪处理并归一化后拟合的相关曲线图。图 10(a) 为脉冲信号未到达时正常数据的相关曲线图,理想相关曲线是关于 0 时间轴左右对称的三角形<sup>[13]</sup>,此时的相关曲线图与理想相关曲线的趋势类似,左右接近对称,在 0 码片处有明显的相关峰。图

10(b) 为有脉冲干扰和正常信号混合的相关曲线图。可以看出,增大  $T_{\text{coh}}$  和  $N_{\text{NC}}$  能够很好地改善相关曲线的平滑性和对称性。但在  $-1.5\text{chip}$  的相位处,曲线出现上翘。是由于图 10(b) 是脉冲出现但还没有完全淹没信号的情况,所以信号存在畸变,但还有明显相关峰;而图 10(c) 时,截取了一段脉冲强度增大到完全淹没信号,可以看出  $T_{\text{coh}}=2\text{ms}$ ,  $N_{\text{NC}}=5$  次的相关曲线变形严重,没有相关峰出现。增大相干积分时间和非相干积分次数后,1 码片外的相关值依旧很大,均在 0.5 以上,这时脉冲干扰存在造成的曲线与正常相关曲线仍有较大差别,相关器输出结果不理想。同时也说明了相干积分与非相干积分结合处理相关值的方法不能很好地改善脉冲干扰对卫星数据的影响。

图 10(c) 中当积分次数增到 20 次以上,相关曲线的 0 码片处出现小峰值,是由于积分时间变长,参与拟合的数据变长,大于脉冲干扰作用的  $60\text{ms}$ ,包含了部分未受脉冲干扰影响信号的相关值,因此有峰值出现。

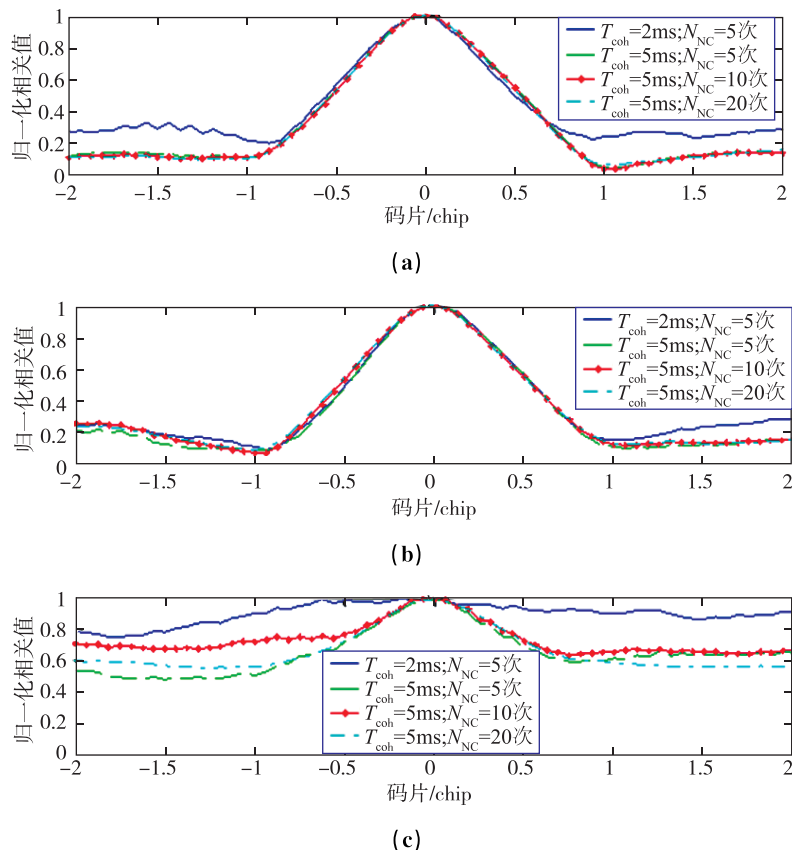


图 10 相关曲线图

Fig. 10 Correlation curve

## 4 结论

本文针对不同功率、不同周期和不同占空比的脉冲干扰对 GNSS 接收机的捕获和跟踪的影响进行分析,研究发现:

接收机性能随干扰功率的增大而变差。而在干扰功率一定,周期为 1ms 的脉冲干扰作用时,信号捕获图中多普勒每 1000Hz 处噪声明显增加,当干扰功率或占空比增大时,甚至导致不能捕获信号;跟踪过程中载噪比和即时相关值波动剧烈,接收机受到连续影响,导航数据波动剧烈,定位可靠性低。周期大于 1ms 的脉冲干扰作用时,信号仅在脉冲到达时受影响。在跟踪过程中,脉冲到达,环路失锁,脉冲消失,环路恢复跟踪。随着脉冲占空比越大,脉冲作用时间变长,环路失锁时间越长,缺失的导航数据越多。因此脉冲干扰周期大于 1ms 时,对接收机的影响是断续的,而当脉冲干扰周期小于或等于 1ms 时,接收机的捕获和跟踪性能都持续受到严重影响。所以后者在今后的仿真 GNSS 信号干扰和研究抗干扰上有更实际的应用。

在相关曲线辅助脉冲干扰的研究中,相干积分和非相干积分能削弱噪声的影响,而当信号中存在脉冲干扰时,干扰导致的曲线畸变却不能由这种方法完全消除。这一现象为干扰检测提供一种新方向,但是针对干扰作用的时间,合理的积分时间和次数配置方案是需要进一步探索的。

### 参考文献

- [1] 董李梅. 带波束指向的 GPS 抗干扰技术研究[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(2):53-58.
- [2] 武成锋, 彭元, 何子君, 等. 卫星导航干扰与抗干扰技术综述[J]. 导航定位与授时, 2014, 1(2):59-63.
- [3] 范广伟, 晁磊, 刘莉. 卫星导航干扰监测技术[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(6):125-128.
- [4] Ndili A, Enge P. GPS receiver autonomous interference detection [C]//Position Location and Navigation Symposium, IEEE. 1998:123-130.
- [5] 尚晓辉, 宋晓辉, 张玉. 阵列抗干扰射频接收机设计[J]. 无线电工程, 2015(5):43-45.
- [6] 马经纬, 王延东, 江晟. 一种改进的 GPS 接收机弱信号捕获算法[J]. 四川兵工学报, 2015(10):111-115.
- [7] Deshpande S M. Study of interference effects on GPS signal acquisition [D]. Calgary : University of Calgary, 2004.
- [8] 陈轲, 归庆明, 岳利群. 一种基于多相关器的 GPS 多径估计方法[J]. 宇航学报, 2012, 33(9):1241-1247.
- [9] 曾祥华, 周益, 李峥嵘, 等. 卫星导航接收机中短时脉冲干扰抑制方法[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(1):77-81.
- [10] 张智香, 刘小龙, 陈锦, 等. 高重复超宽谱短电磁脉冲对 GPS 接收机干扰[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(3):171-176.
- [11] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用:(7)主要技术问题和未来发展趋势[J]. 强激光与粒子束, 2015(1):8-12.
- [12] 李流丽, 王文益, 卢丹, 等. 基于改进的功率倒置法在 GNSS 中抑制 DME 脉冲干扰[C]//中国卫星导航学术年会. 2015.
- [13] Kaplan E D, Hegarty C. Understanding GPS : principles and applications [M]. Boston: Artech House, 2006.
- [14] 杨东凯, 张其善. GNSS 反射信号处理基础与实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [15] Pini M, Falletti E, Fantino M. Performance Evaluation of  $C/N_0$  Estimators Using a Real Time GNSS Software Receiver [C]//International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. IEEE, 2008:28-31.
- [16] Sharawi M S, Akos D M, Aloï D N. GPS  $C/N_0$  estimation in the presence of interference and limited quantization levels [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2007, 43(1):227-238.