

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902573

GNSS 接收机抗干扰性能关键指标测试方法的研究与实现*

朱江森 高秀娜 黄艳 马培香 乔孟元

(1.北京工业大学 信息学部 北京 100124;2.北京市计量检测科学研究院 北京 100029)

摘要:抗干扰性能测试是评价导航接收机性能的重要内容,对其中两个关键指标——干扰抑制度和干扰恢复时间进行了研究。首先构建了基于导航信号模拟器的接收机抗干扰测试系统,合理地确定接收机的约束条件,通过调节干扰信号观察接收机定位性能到达约束条件,测试接收机的干扰抑制度;通过控制干扰信号输出时间,测试接收机在干扰信号过后能够恢复正常定位的延时,从而测出接收机的干扰恢复时间;最后分别对两个不同型号的接收机进行真实测试,两台接收机的性能都因干扰信号威胁而降低,干扰抑制度和干扰恢复时间的测试结果与各自整体性能水平匹配,说明该测试方法能正确评估接收机抗干扰性能。

关键词: GNSS 接收机;导航信号模拟器;抗干扰性能;干扰抑制度;干扰恢复时间

中图分类号: TN967.1;P228.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Research and implementation of testing method for key anti-interference performance of GNSS receiver

Zhu Jiangmiao Gao Xiuna Huang Yan Ma Peixiang Qiao Mengyuan

(1.Faculty of Information Technology of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Anti-interference performance test is an important part of evaluating the performance of satellite navigation receiver. This paper focuses on two key indicators, interference rejection and interference recovery time, have been studied. Firstly, the receiver anti-interference test system based on navigation signal simulator is constructed. Reasonably determine the constraints of the receiver, by adjusting the interference signal to observe the positioning performance of the receiver to reach the constraint condition, to test the interference rejection of the receiver. By controlling the output time of the interference signal, to test the receiver's delay time of restore normal positioning after interference signals, Then the interference recovery time of the receiver is measured. At last, two different types of receivers are tested in this paper. The performance of both receivers is degraded by the threat of interference signals, the test results of interference rejection and interference recovery time matched with their respective overall performance levels. It indicates that the test method in this paper can correctly evaluate the anti-interference performance of the receiver.

Keywords: GNSS receiver; navigation signal simulator; anti-interference performance; interference rejection level; interference recovery time

0 引言

近年来,随着导航系统的逐步完善,导航接收机的应用也越来越广泛,接收机的性能及可靠性成了用户关注的焦点。而导航接收机接收到的卫星信号十分微弱且非常容易受到各种干扰信号的影响,以至于无法进行精确

的定位。因此,对导航接收机进行抗干扰性能的测试是至关重要的。

王和等^[1]和郝燕玲等^[2]提到了抗干扰灵敏度和干扰抑制度两项导航接收机抗干扰性能测试指标,对于干扰抑制度的定义,文献^[2-4]只是将定义的约束条件用“无法定位”来表示,这种说法不仅缺乏严谨性,并且没有考虑在强干扰下虽然能定位但定位误差极大的接收机,因

此这种定义方法还缺乏普遍性。这种定义上的缺陷将导致抗干扰性能评价的不准确性,因此对接收机工作原理进行研究^[5],发现不同类型的接收机的定位性能都与输出信噪比相关,所以本文将输出信噪比作为约束,从而统一定义,并根据定义研究详细的测试方法。抗干扰灵敏度也是一项关键测试指标,是指在一定干扰下测试接收机的灵敏度,其约束条件与干扰抑制制度相同,并且无干扰下接收机灵敏度测试方法已经成熟,抗干扰灵敏度的测试过程与其相似,因此本文不再深入研究。

瞿智等^[6]和丁梦羽^[7]通过观察软件接收机研究了干扰信号对导航接收机信号的影响,虽然可以方便观察信号变化,了解性能变化原因,但是市场的导航接收机都是封装的硬件接收机,无法轻易的获取内部信号。所以本文研究的测试方法都是以导航模拟器为基础的黑盒测试,具有很强的实用性。

欧盟的 Horizon2020 研究的项目 STRIKE3 开发了一套典型的真实干扰/干扰威胁基准^[8],还进行了 GNSS 威胁报告和接收机测试标准化草案的研究。这个草案提到的接收机抗干扰性能测试指标为 Sensitivity Test 和 TTRP,其中 Sensitivity Test 与干扰抑制制度相似,但是 TTRP,即干扰恢复时间,在此草案中对它的测试方法没有详细的说明,并且国内外研究也不够深入^[9]。所以本文对导航接收机的干扰恢复时间指标进行详细的研究。

综上所述,本文构建了一套完整的基于信号模拟器的导航接收机抗干扰测试系统,并对系统构建方案详细说明。选择将干扰抑制制度和干扰恢复时间作为重点研究指标,分别对两项指标的定义和测试方法进行详细的研究,最后对两台不同型号的接收机针对两项指标进行实验观察,测试结果具有明显差别,并且符合两类接收机性能水平。

1 关键指标测试方法的研究

1.1 测试系统的构建

对导航接收机进行测试的方法主要分为 3 类,户外实际导航信号测试,利用导航信号采集回放仪在实验室测试和利用导航信号模拟器仿真信号在实验室测试^[10]。前两种方法接收到的导航信号更加真实,但是导航信号中掺杂了多种干扰信号,无法将导航信号和干扰信号分开来专门观察干扰信号对接收机的影响。所以本文选择用导航信号模拟器来仿真信号在实验室进行测试的方法,用导航信号模拟器仿真导航信号,再用信号发生器产生干扰信号,最后用合路器将干扰信号添加到导航信号上,不仅实现了对导航信号与干扰信号的分别控制,而且模拟出来的信号更加标准,测试结果更加准确。测试系统的构建方法如图 1 所示。

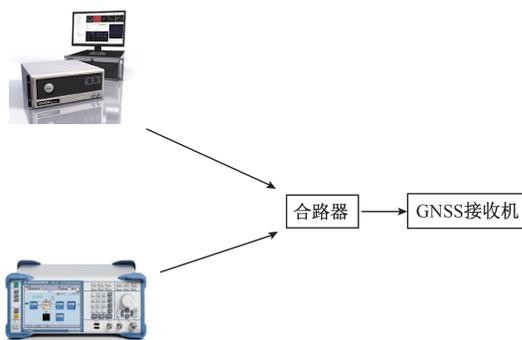


图 1 接收机抗干扰测试系统构建方法

Fig.1 Construction method of receiver anti-interference test system

导航信号模拟器选用的是英国思博伦公司最新的 GSS9000 多星座导航信号模拟器,利用信号模拟器的上位机软件 SimGEN 分别设置卫星环境参数,大气环境参数,载体场景参数产生导航模拟信号。在本文测试中,电离层和对流层分别用 Klobuchar 和 STANAG 模型,接收器配置为静态模式,模拟器各项配置概述如表 1 所示。

表 1 导航信号模拟器配置

Table 1 Navigation signal simulator configuration

项目	配置
导航系统	GPS
卫星数量	10
启动模式	冷启动
中心频率/MHz	1575.42
电离层模型	Klobuchar(默认参数)
对流层模型	STANAG(默认参数)
开始时间	2019.05.23-04:00:00
持续时间/min	干扰恢复时间约为 14
GNSS 信号功率/dBm	-130
接收机位置(Lat / Long / Alt)	40°N/116°E/100 m

干扰信号的类型多种多样,但是单频干扰是生活中最常见的^[11-12],并且单频干扰具有唯一变量信号功率,更有利于测试进行,导航信号的中心频率为 1 575.42 MHz,所以本文采用 1 575.42 MHz 单频干扰信号对接收机进行测试,产生干扰信号的信号发生器选用的是罗德与施瓦茨公司的 SMBV100 A 矢量信号发生器。信号发生器相关配置如表 2 所示。

表 2 信号发生器配置

Table 2 Signal generator configuration

项目	配置
干扰信号频率/MHz	1 575.42
干扰恢复时间测试方法的干扰功率电平/dBm	-30
干扰抑制制度测试方法的干扰功率范围/dBm	≥ -90

1.2 接收机干扰抑制制度测试方法

干扰抑制制度是测试接收机在满足性能条件下,能承受的最高干扰信号强度,因此为了测试接收机的干扰抑制制度,需要确定接收机能正常工作的最低限制条件。但是不同的导航接收机能够输出定位结果的条件是不同的。有的接收机是结算定位结果不满足系统设置要求时,自动不显示定位信息,此时可以直接以接收机能显示定位结果作为约束条件。而有的接收机则是不管定位精度多差都会显示定位结果^[13],此时就需要测试完后处理数据,计算接收机定位精度满足要求时的情况作为约束条件。但是为了测试方法的规范与统一,必须取一个各类接收机都存在的指标作为约束条件。干扰信号对接收机产生影响的过程模型^[14],如下所示:

$$C/N_0 = P + G - 10\lg(kT_0) - N - L \quad (1)$$

式中: P 为接收到的导航信号功率; G 为天线增益; $10\lg(kT_0)$ 为接收机热噪声密度,一般取

-204 (dBw/Hz); N 是天线和电缆损耗; L 为处理器损耗。当受到干扰后,等效信噪比为:

$$[C/N_0]_{eq} = -10\lg\left[10^{(C/N_0)/10} + \frac{10^{(J/S)/10}}{Qf_e}\right] \quad (2)$$

式中: f_e 为伪随机码的码速率; Q 是扩频处理因子。

导航接收机的伪距跟踪误差为:

$$\sigma_{\mu}^2 = \Delta^2 [B_{DLL} 4d^2 (1-d)] / (C/N_0) \quad (3)$$

式中: B_{DLL} 是 DLL 噪声带宽; d 为前相差器和即时相差器之间的距离 (1/16~1/2 码片,单码片 E-L 相关器的 $d = 1/2$), C/N_0 为信噪比 (受扰情况下,取等效信噪比)。由式(3)可知, σ_{μ}^2 是 C/N_0 的函数,而伪距跟踪误差是影响接收机定位效果的关键因素^[15],因此可以通过接收机的输出 C/N_0 来表征接收机的定位性能。

利用点频法测试一个接收机在不同干扰频率下能承受的最高干扰功率和最小输出信噪比如图 2 所示。

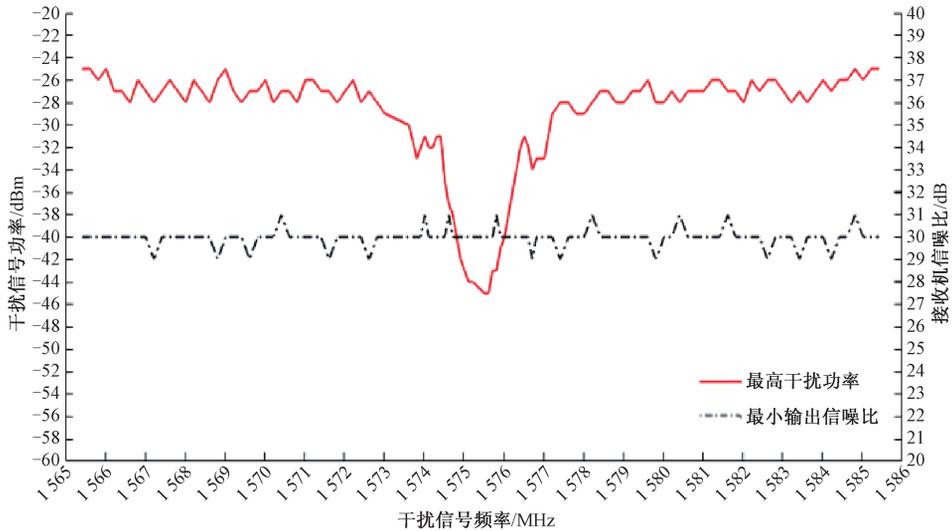


图2 接收机在不同干扰频率下能承受的最高干扰功率和最小输出信噪比

Fig.2 The maximum interference power and the minimum output signal-to-noise ratio that the receiver can bear at different interference frequencies

由图 2 可以看出,在导航信号频带范围内多个频点上添加干扰信号,导航接收机的最小输出信噪比都在 30 dB 左右,是一个确定值。所以可以将导航接收机满足性能要求时的最低输出信噪比 $[C/N_0]_{\min}$ 作为测试接收机干扰抑制制度的限制条件。

因此对导航接收机干扰抑制制度的定义为在一定的信号环境下(接收机输入端导航信号信噪比或信号强度固定),调整接收机输入端的干扰信号的功率,当接收机的输出信噪比等于接收机所能承受的最小信噪比 $[C/N_0]_{\min}$ 时所对应的接收机输入端的干信比作为导航接收机的干扰抑制制度。

对导航接收机干扰抑制制度测试的方法如下。

1) 可以自动限制定位精度的接收机:设置信号发生器参数产生 1 575.42 MHz 的干扰信号,将干扰信号与导航信号通过合路器传给导航接收机。从 -90 dBm 开始以 1 dBm 为步进值增大干扰信号的功率,直到接收机无法显示定位结果时,关闭信号发生器停止产生干扰信号,将导航接收机最后一次能显示定位结果时的输出信噪比作为 $[C/N_0]_{\min}$,并计算此时接收机输入信号干信比作为接收机的干扰抑制制度。

2) 没有限制不断输出定位结果的接收机:同样使信号发生器参数产生 1 575.42 MHz 的干扰信号,将干扰信号与导航信号通过合路器传给导航接收机。从 -90 dBm 开始以 1 dBm 为步进值增大干扰信号的功率,直到接收

机无法结算位置时,取出全过程的导航接收机的 NMEA 数据,从 NMEA 数据中筛选出接收机的定位信息,找到此接收机的定位精度最后一次能够满足要求时的接收机的输出信噪比作为 $[C/N_0]_{\min}$,并计算此时接收机输入信号干信比作为接收机的干扰抑制制度。

1.3 接收机干扰恢复时间测试方法

干扰抑制制度研究的是多大的干扰信号会使接收机失锁,但是当接收机面对干扰无法定位之后需要多长时间才能再一次解算出精确的定位结果的研究却很少。

由于接收机的信号捕获时延,位置结算时延等原因,对接收机撤掉干扰后,接收机无法马上得出定位结果,而这个受到干扰的恢复时间则会使接收机损失部分的定位路径,当在直道时利用算法拟合可以描绘大致的路线,但是在现实生活中,面对复杂多变的地形路况,如果接收机的干扰恢复时间较慢,将会给接收机的定位导航性能带

来更大的影响。因此本文对导航接收机进行干扰恢复时间的测试具有重要的意义。

首先按照 1.1 节所述构建完整的导航接收机测试系统,调整导航信号模拟器参数,设置静态测试场景,设置矢量信号发生器的参数产生干扰信号。对导航接收机进行一次干扰恢复时间的测试方法如下。

1) 开启测试系统,此时信号发生器关闭,使接收机在无干扰的情况下定位 5 min。

2) 5 min 后打开信号发生器给接收机施加功率为 -30dBm 的干扰信号,施加时间为 2 min。

3) 施加 2 min 干扰信号后,马上关闭干扰信号的输出,计算从干扰信号撤销到接收机的上位机软件可以显示正常定位结果的准确时间。

概要测试过程如图 3 所示。

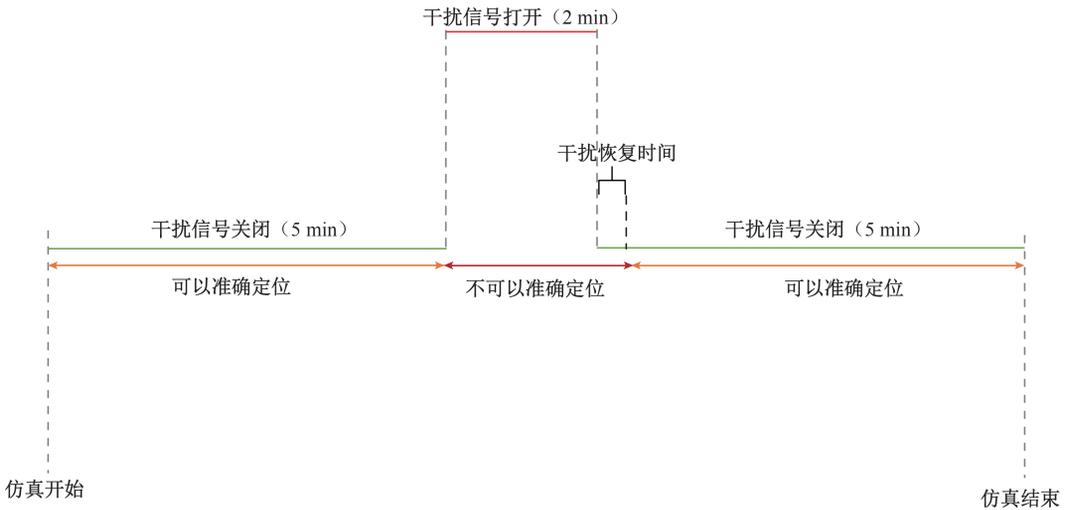


图 3 接收机干扰恢复时间测试方法

Fig.3 Receiver interference recovery time test method

重复以上过程 20 次,得到 20 组接收机干扰恢复时间数据。在测试过程中难免会有因为仪器或者测试者的失误带来的一些不准确的测试结果,所以需要对这 20 组数据剔除粗大误差。剔除粗大误差的常用方法主要有莱以特准则,格拉布斯准则,罗曼诺夫斯基准则和狄克逊准则,其中格拉布斯准则不仅适合测试数据较少的情况,而且在这种情况下还能够保持很高的精度^[16],所以选用格拉布斯准则对干扰恢复时间的 20 组数据剔除粗大误差。

剔除完粗大误差之后,计算剩余数据的算术平均值作为导航接收机的干扰恢复时间。

2 干扰抑制制度和干扰恢复时间测试结果

本文分别对 JAVAD 公司生产的 SIGMA 接收机和司

南卫星导航公司生产的 M300 接收机进行干扰抑制制度和干扰恢复时间测试。

2.1 接收机干扰抑制制度测试结果

现实中的导航信号的功率一般为 -130 dBm,但是综合考虑模拟器的线缆和集线器损耗等因素,需要将导航信号模拟器输出的导航信号的功率设为 -120 dBm,此时接收机输入的导航信号的功率水平测量值则为 -130 dBm。

M300 接收机是一台多频点专业接收机,随着干扰信号强度增强,各个卫星的信噪比减小,定位精度会变差,其可以自动判断定位精度到达临界值时,不再输出定位结果。所以直接将 M300 接收机能够显示定位结果时的最小信噪比作为测试干扰抑制制度的 $[C/N_0]_{\min}$ 。

为了更加清晰的对接收机定位效果进行观测,利用

式(4)计算接收机的 3D 定位偏差 Δ 。

$$\Delta = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (4)$$

其中, (x_0, y_0, z_0) 为导航信号模拟器仿真的标准位

置坐标; (x, y, z) 为接收机结算出来的位置坐标。通过 Δ 来观察不同干扰信号功率下接收机的定位误差,更直观的观测接收机受干扰情况下的定位效果。M300 接收机的测试结果如图 4 所示。

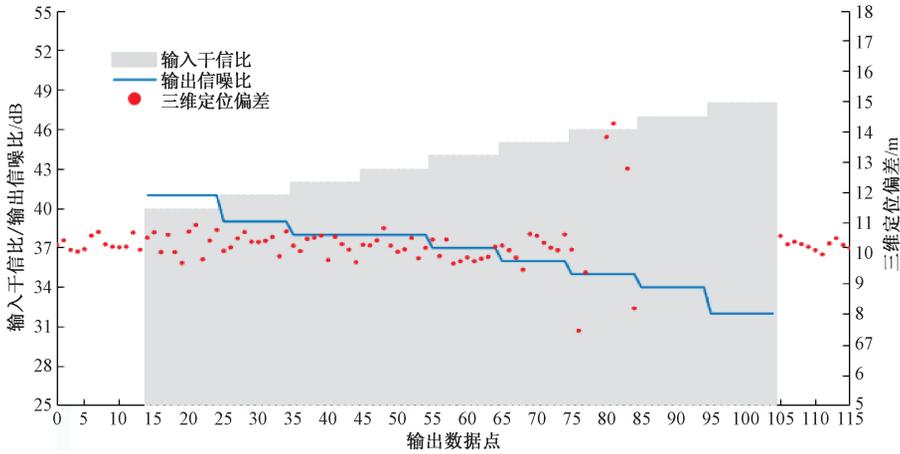


图 4 M300 接收机干扰抑制制度测试结果

Fig.4 Receiver M300 interference rejection level test results

由测试结果可以看出,随着干扰信号功率的变大,M300 接收机输出信噪比减小,3D 定位精度也有明显变化。当输入信号干信比 $J/S < 45$ dB 时,接收机的 3D 定位偏差基本稳定在(9.6,10.9),与没添加干扰信号时的定位精度大致相同。当输入信号干信比 $J/S \geq 45$ dB 时,接收机的 3D 定位偏差会出现明显的跳动,甚至出现无法定位的情况。

M300 接收机最后一次能显示定位结果时的输出信噪比为 35 dB,所以 M300 接收机的 $[C/N_0]_{\min} = 35$ dB,而此时接收机的输入干信比 $J/S = 46$ dB,因此 M300 接收机的干扰抑制制度为 46 dB。

SIGMA 接收机也是随着干扰信号强度的变大,各个卫星的信噪比减小,和 M300 接收机相同,SIGMA 接收机也可以自动限制定位精度,所以直接将 SIGMA 接收机能够显示定位结果时的最小信噪比作为测干扰抑制制度的 $[C/N_0]_{\min}$ 。同样用式(4)观察定位效果。

对 SIGMA 接收机进行干扰抑制制度测试结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,SIGMA 接收机在干扰信号功率 $J/S < 82$ dB 时,接收机的 3D 定位偏差基本稳定在(0.48, 0.78)。当干扰信号功率 $J/S \geq 82$ dB 时,接收机的 3D 定位偏差也会出现明显的跳动,直到完全的失锁。

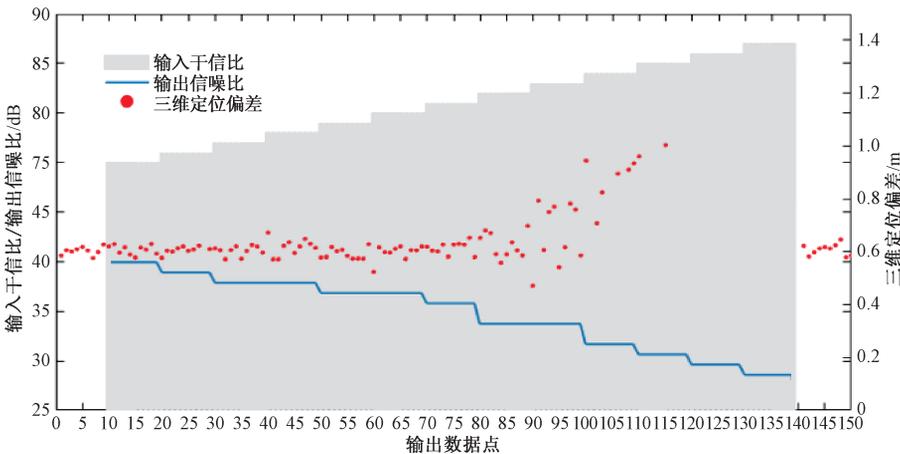


图 5 SIGMA 接收机干扰抑制制度测试结果

Fig.5 Receiver SIGMA interference rejection level test result

SIGMA 接收机最后一次能显示定位结果时的输出信噪比为 31 dB,所以 SIGMA 接收机的 $[C/N_0]_{\min} =$

31 dB,此时 SIGMA 接收机的输入干信比 $J/S = 85$ dB,因此 SIGMA 接收机的干扰抑制制度为 85 dB。

从测试结果可以看出, M300 接收机和 SIGMA 接收机都是随着干扰信号变强输出信噪比越来越小, 定位效果也会越来越差拥有一样的发展趋势, 但是两台接收机的测试结果明显不同, SIGMA 接收机能抑制更高强度的干扰信号, 这也符合两台接收机性能水平的差距。

2.2 接收机干扰恢复时间测试结果

分别对 M300 接收机和 SIGMA 接收机进行干扰恢复时间测试, 测试两台接收机的干扰信号功率都设为 -30 dBm。

对 M300 接收机进行 20 次的干扰恢复时间测试, 对每次测试结果排序, 如表 3 所示。

表 3 M300 接收机干扰恢复时间测试结果

Table 3 Receiver M300 interference recovery time test results

测试序号	干扰恢复时间/s	测试序号	干扰恢复时间/s
1	7.01	11	6.70
2	6.07	12	7.62
3	5.65	13	5.22
4	6.04	14	7.10
5	6.17	15	5.99
6	6.47	16	7.18
7	5.38	17	6.09
8	5.30	18	8.22
9	5.62	19	5.68
10	5.94	20	6.33

利用格拉布斯准则计算出 M300 接收机测试结果没有需要剔除的数值, 计算 20 组测试数据的算数平均值为 6.289 s, 因此用本文的方法测出的 M300 接收机的干扰恢复时间为 6.289 s。

也对 SIGMA 接收机进行了 20 次的干扰恢复时间测试, 对每次测试结果进行排序, 如表 4 所示。

表 4 SIGMA 接收机干扰恢复时间测试结果

Table 4 Receiver SIGMA interference recovery time test results

测试序号	干扰恢复时间/s	测试序号	干扰恢复时间/s
1	3.44	11	2.94
2	4.43	12	2.17
3	2.98	13	3.17
4	3.12	14	2.36
5	2.43	15	4.42
6	3.24	16	2.94
7	3.00	17	5.87
8	2.94	18	3.26
9	3.76	19	3.48
10	3.01	20	2.88

利用格拉布斯准则计算出 5.87 为需要剔除的数值, 计算出剩下 19 组数据的算数平均值为 3.156, 因此用本文的方法测出的 SIGMA 接收机的干扰恢复时间为

3.156 s。

两个接收机的多组测试结果虽然会有少量的粗大误差, 但大多数数据值都基本稳定, 说明接收机的干扰恢复时间的测试具有统一性。并且两个接收机的测试结果具有明显差异, SIGMA 接收机受到干扰后信号处理速度要快于 M300 接收机, 对比两台接收机的厂家性能说明书, 也确实表明 SIGMA 接收机的信号处理速度明显高于 M300 接收机, 证实了本文的测试方法没有问题。

3 结 论

通过对两台不同的接收机的测试结果来看, 两台接收机都是随着输入信号干信比变大, 输出信噪比越来越小, 定位效果也会越来越差。但 SIGMA 接收机的干扰抑制制度明显高于 M300 接收机, 说明 SIGMA 接收机能抑制更高强度的干扰信号, 通过对接收机干扰抑制制度的测试能寻找出接收机对干扰信号灵敏度的差别。在对两台接收机进行干扰恢复时间的测试时, 两台接收机的测试结果虽然会有少量的粗大误差但大多数测试数据都稳定在一个范围内, SIGMA 接收机的干扰恢复时间也明显少于 M300 接收机。两台接收机两项指标的差异与两台接收机的整体性能水平相符, 说明本文测试方法能正确评估接收机抗干扰性能。总的来说, 不同接收机测试结果具有明显差异, 两项指标可以反映不同接收机的性能差距, 对接收机的评定具有重要意义。

本文对接收机进行抗干扰性能测试时, 主要是利用单频干扰信号进行测试, 自然界中的干扰信号多种多样, 在以后的测试中可以模拟更多种类的干扰信号对接收机进行测试。

参考文献

- [1] 王和, 刘光斌, 程俊仁, 等. 卫星导航接收机抗干扰测试评估方法研究[J]. 无线电工程, 2014, 44(3): 5-7.
WANG H, LIU G B, CHENG J R, et al. Research on anti-jamming test and evaluation method of satellite navigation receiver[J]. Radio Engineering, 2014, 44(3): 5-7.
- [2] 郝燕玲, 梁宏, 周广涛. 基于信号模拟器的接收机抗干扰测试方法研究[J]. 全球定位系统, 2014, 39(1): 13-18.
HE Y L, LIANG H, ZHOU G T. Research on receiver anti-interference testing method based on signal simulator[J]. GNSS World of China, 2014, 39(1): 13-18.
- [3] 卢欢. GNSS 抗干扰测试技术研究[J]. 遥测遥控, 2017, 38(4): 43-52.
LU H. Research on anti-interference testing technology of GNSS [J]. Journal of Telemetry, Tracking and

- Command, 2017, 38(4):43-52.
- [4] 熊涛. GNSS接收机抗干扰性能评估方法研究[D].成都:电子科技大学,2014.
XIONG T. Research on anti-jamming performance evaluation of GNSS receiver[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [5] 陈勛,李尔园.GPS接收机工作原理及发展现状[J].全球定位系统,2010,35(6):51-55.
CHEN X, LI E Y. Working principle and development status of GPS receiver [J]. Gns World of China, 2010, 35(6):51-55.
- [6] 瞿智,杨俊,杨建伟.大误差条件下单频干扰引起的伪码跟踪误差研究[J].电子与信息学报,2016,38(1):222-228.
QU ZH, YANG J, YANG J W. Study on tracking error caused by large error condition with single frequency interference [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016,38(1):222-228.
- [7] 丁梦羽. GNSS干扰信号对接收机的影响分析[C].第八届中国卫星导航学术,2017:5.
DING M Y. Analysis of the influence of GNSS interference signals on the receiver[C]. Proceedings of the 8th China Satellite Navigation Academic Annual Conference, 2017:5.
- [8] BHUIYAN M Z H, FERRARA N G, HASHEMI A, et al. Impact analysis of standardized gnss receiver testing against real-world interferences detected at live monitoring sites [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019,19(6):1276.
- [9] IDRIS A N, SATHYAMOORTHY D, SULDI A M, et al. Effect of radio frequency interference (RFI) on the precision of GPS relative positioning[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014.
- [10] 杨博. 基于大型微波暗室的卫星导航接收机测试[C]. 第一届中国卫星导航学术年会, 2010:6.
YANG B. Satellite navigation receiver test based on large microwave anechoic chamber [C]. Proceedings of The First China Satellite Navigation Academic Annual Conference (middle), 2010:6.
- [11] 李顺,张新豪.存在主动干扰窃听方时的物理层安全性分析[J].电子测量与仪器学报,2018,32(9):102-107.
LI SH, ZHANG X H. Physical layer security analysis in case of active interference [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32 (9): 102-107.
- [12] 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.
WU CH F, PENG Y, HE Z J, et al. Summary of satellite navigation jamming and anti-jamming technology [J]. Navigation Positioning and Timing, 2014, 1(2):59-63.
- [13] ZHU J M, GAO X N, HUANG Y. Research and implementation on entry fence detection algorithm of satellite positioning terminal[C]. ICEMI, 2019
- [14] 付晓.复杂信道环境对伪码测距精度的影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
FU X. Research on the influence of complex channel environment on pseudo-code ranging accuracy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [15] 倪育德,马圆晨,张心一,等.基于模拟信号源的机载BDS接收机性能测试[J].中国测试,2019,45(4):21-28.
NI Y D, MA Y C, ZHANG X Y, et al. Performance test of airborne BDS receiver based on analog signal source [J]. China Measurement & Test, 2019,45(4):21-28.
- [16] 熊艳艳,吴先球.粗大误差四种判别准则的比较和应用[J].大学物理实验,2010,23(1):66-68.
XIONG Y Y, WU X Q. Comparison and application of four criteria for gross error [J]. Physical Experiment of College, 2010,23(1):66-68.

作者简介



朱江淼,北京工业大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为数字信号处理、现代测量、时域测量和数字去卷积应用。
E-mail: zhujiangmiao@bjut.edu.cn

Zhu Jiangmiao is currently an associate professor and M. Sc. supervisor at Beijing University of Technology. Her main research interests include digital signal processing, modern measurement, time domain measurement.



高秀娜,现为北京工业大学硕士研究生,主要研究方向为GNSS导航接收机的测试、数据处理。
E-mail: gaoxiuna61@163.com

Gao Xiuna now she is a M.Sc. candidate at Beijing University of Technology. Her main research interest is anti-jamming capability test of navigation receiver.