



DS/FH 测控系统测试指标分析

席有猷,郝建华,程乃平,刘茂国

(中国人民解放军装备学院 北京 101416)

摘 要:针对测控新体制在运行中出现的新问题,本文提出利用跳频图案稳定性及跳频增益稳定性两项新指标来完善现有测控系统测试体系;分析了两项指标在测控系统测试中的新颖性及重要性;从定性与定量两方面定义了指标的含义;研究了指标的测试方法,并针对跳频图案稳定性测试结果出现的误差提出了修正算法;最后研究了测试结果的多种可视化显示技术。分析及仿真结果表明,测试指标有效地表征了测控新体制运行中出现的新现象,测试方法能准确完成指标的测试,可视化方案可以多角度直观地显示测试结果。

关键词:混合扩频测控系统;测试方法;稳定性

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.02.010

Analysis of the Indicators Based on the DS/FH TT&C System

Xi Youyou, Hao Jianhua, Cheng Naiping, Liu Maoguo

(The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to solve the unprecedented issues during the TT&C system running, two fresh indicators named the stability of the hopping pattern and the stability of frequency hopping gain were presented. The indicators can improve the test system of TT&C. The novelty and importance in testing of TT&C were analyzed; the meaning of the indicators from both qualitative and quantitative aspects was defined; the test method of the indicators was provided, and a new algorithm used to correct the test error about the stability of the hopping pattern was proposed. At last, a variety of visualization technologies were studied. The analysis and simulation results show that the indicators can describe the phenomenon effectively in the system, the methods can accurately complete the test and the visualization scheme can show the test results from different visions.

Key words: hybrid spreading spectrum TT&C system, test method, stability

1 引言

随着测控技术的进步,测控系统已经从微波统一测控、扩频统一测控,逐步发展到混合扩频测控等测控新体制^[1]。DS/FH 混合扩频测控系统结合了直接序列扩频和跳频的优点,具备更好的隐蔽性和抗干扰性,拥有广泛的应用前景。目前对于 DS/FH 的研究多针对通信系统,主要集中在多用户检测、捕获以及系统抗干扰特性分析等方面^[2-5],对 DS/FH 测控系统的研究还处于起步阶段,多集中在系统的

测量性能^[6,7]、捕获性能^[8,9]等方面。DS/FH 测控系统在带来优良抗干扰性能的同时,也导致系统测试复杂化,传统的单一扩频信号处理方法在分析混合扩频信号时也变得束手无策。目前,对 DS/FH 测控系统测试方法的研究十分有限,主要针对 DS/FH 系统跳频跳速、跳频频率、跳频图案等基本参数展开分析^[10-15]。

在测控系统运行中,要求系统具有优异的稳定性及抗干扰性。由于系统中各设备的非理想性,在实际应用中,系统运行较长时间后,某些跳频点会出现很多次,而某些跳

频点则很少出现,整个频带并没有被均匀利用,此时传统的跳频间隔、跳频频率、跳频周期等指标已不能准确地分析这种现象。系统灵敏度是直接扩频系统中衡量系统抗干扰性能的主要指标,在混合扩频测控系统中,由于系统设备的非理想性,在系统运行一段时间后,不同的载波频率对应的增益不同,导致各跳频对应的抗干扰性能亦不一致,仅靠系统灵敏度不能全面反映混合扩频测控系统的抗干扰特性。

针对上述混合扩频系统测试中出现的传统指标不能全面衡量系统性能的问题,本文提出了跳频图案稳定性及跳频增益稳定性两项新指标,并研究了其测试方法,最后结合多种可视化方法完成了测试结果的显示。

2 测试方法研究

2.1 跳频图案稳定性的测试

跳频图案稳定性指某系统长时间运行中载波频率跳变存在的不均匀现象,因此,通过统计某段时间(多个跳频周期)内各个跳频频率对应的出现次数,即可反映跳频图案的稳定性。通过研究跳频图案稳定性,可以评定跳频伪码生成式的性能,进一步评定系统的抗干扰性能。

为了精确比较不同系统跳频图案稳定性的优劣,需要定量研究系统的跳频图案稳定性,本文结合熵的思想提出跳频图案稳定率的概念,并定义其为某段持续时间内某一跳频频率出现次数倒数的乘积。跳频图案稳定率越小,跳频频率的随机性越大,系统的抗干扰效果越好。

通过对跳频图案稳定性指标的分析和研究,本文设计跳频图案稳定性的测试步骤如下。

- (1)截取足够长的中频采样信号,选取最优的时频分析方法求其时频分布图。
- (2)利用混合扩频测控信号时频分析方法获取信号的跳载频集。
- (3)对跳载频集进行频率分类,消除同一载频频率由于测试误差带来的差异。
- (4)统计修正后不同载频频率出现的次数。
- (5)利用多种可视化方法表现跳频图案稳定性的测试结果。

在测试过程中,由于利用时频分析法计算跳载频存在的误差,会导致在步骤(2)获得的跳载频集中的频率与标准载频集存在一定的偏差,在后续的载频出现次数的统计中,可能会导致各载频的出现次数均为一次,因此,需要通

过步骤(3)对测试获得的频率进行分类,以消除测试误差带来的影响。目前对数据分类的研究多集中在二维及多维数据中,采用的方法有支持向量机、人工智能、神经网络等方法,这些方法的算法复杂、训练速度较慢、占用内存大。本文提出了一种简单实用的一维数据分类方法,该算法利用跳频序列排序后相邻值之间的差分运算结果对跳频频率进行分类。具体的算法流程如图1所示。

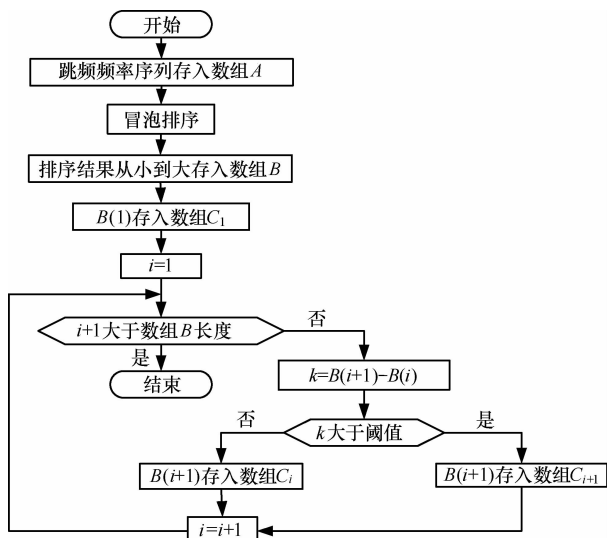


图1 跳频频率分类算法流程

2.2 跳频增益稳定性的测试

跳频增益稳定性指混合扩频系统中不同跳频之间载波增益的一致性。通过研究增益稳定性,可以分析系统跳频载波增益的稳定性及系统的抗干扰性能。跳频增益稳定性可以通过一段时间内的跳频频率—该频率载波增益—该增益出现次数的关系图来表示。

参考跳频图案稳定性定量分析的思想,采用跳频增益稳定率来衡量,其定义为某段持续时间内某一跳频增益出现次数倒数的乘积。跳频增益稳定率越小,跳频增益的稳定性越好,系统的抗干扰性越好。由于跳频增益的测试存在一定的误差,可以对跳频增益进行量化预处理。本文设计的跳频增益稳定性的测试步骤如下。

- (1)截取足够长的中频采样信号,选取最优的时频分析方法求其时频分布图。
- (2)利用混合扩频测控信号参数测试方法获取信号的跳载频集,计算多周期跳载频集平均值,得到一个周期的平均跳载频集。
- (3)对时频分布增益进行量化。
- (4)统计量化后不同时频分布增益出现的次数。



(5)利用多种可视化方法表现跳频增益稳定性的测试结果。

3 可视化方法研究

3.1 跳频图案稳定性的可视化

跳频图案稳定性测试结果可以通过系统运行时间—跳频频率—该频率出现次数的关系图来定性表示,这种定性分析方法可以直观地显示某一系统是否具有严格的跳频图案稳定性,可以通过多种不同的可视化方法展现这一测试结果。本文在分析了直方图、瀑布图两种可视化方法的优点和缺点后,借鉴硬件仪器中的二维瀑布图显示效果,实现了 MATLAB 二维瀑布图测试结果的可视化。

(1)直方图

直方图是一种统计报告图,有一系列高度不等的纵向条纹或线段表示数据的分布情况。借助 MATLAB 平台,可以用直方图表示一定时间内测控信号的跳频图案稳定性。本文用横轴表示不同的跳频频率,纵轴表示该跳频频率总的出现次数。该方法的优点是可以方便直观地展现测试时间内不同载频频率的分布规律,不足之处是不能表示测试信号长度对频率稳定性的影响,并且在跳频频点较多时重叠性大,显示效果不理想。

(2)三维瀑布图

瀑布图是表示变量随时间推移的变化规律的有力工具。频率—时间—频率重叠次数可以表示应急测控信号的跳频图案稳定性,并可以直观展现当截取信号时间达到一定程度时,跳频图案稳定性的变化规律将趋于稳定,利用瀑布图也可以分析和设定截取的信号长度的阈值。瀑布图的优点是可以表示跳频图案稳定性随系统运行时间的变化规律,也可以通过 MATLAB 函数方便实现。但其三维显示导致软件化测试系统的复杂化,降低了测试系统的实时性。

(3)二维瀑布图

综合直方图和瀑布图的优势,借鉴硬件仪器的二维瀑布图显示效果良好。本文通过引入颜色标度,利用 MATLAB 实现了测试结果的二维瀑布图可视化,具体为:针对某一系统运行时间段内的待测信号,以坐标系横轴表示不同的持续时间段,纵轴表示频率,统计各时间—频率对应的出现次数,建立出现次数与颜色的对应关系,实现跳频图案稳定性显示,该显示方式克服了瀑布图测试结果直观性不强的缺点,可以根据颜色的均匀性直观显示测试

结果,并且二维显示降低了测试系统的软件化实现复杂度。

3.2 跳频增益稳定性的可视化

本文采用了 4 种不同的可视化方法完成了跳频增益稳定性测试结果的显示,介绍如下。

- 时频分布三维图:从时频分布三维图上可直观地观察应急测控信号的增益稳定性。
- 直方图:横轴表示不同的跳频频率,纵轴表示该跳频频率对应的时频分布增益,即可获得增益稳定性的直方图表示。
- 三维瀑布图: x 轴表示不同的持续时间段, y 轴表示跳频频率, z 轴表示时频分布增益,绘制瀑布图。
- 二维瀑布图:将时频分布结果的幅值进行量化,横轴表示时间,纵轴表示频率,将时频分布幅值的大小与不同颜色对应,生成不同的颜色标度,最后产生关于时频分布幅值、频率、系统运行时间的直观、方便的可视化结果,从颜色分布的均匀度上即可直观地分析系统的增益稳定性。

4 仿真验证

为了验证上述分析的正确性和测试方法的测试效果,进行如下仿真实验,仿真信号为 DS/FH 混合扩频信号,其基本参数如下。

- 采样频率: 300×10^6 MHz;
- 信号速率:100 kbit/s;
- 直扩伪码速率:1 000 kbit/s;
- 跳频速率: 10^6 hop/s;
- 跳频点数:2 000;
- 直扩伪码采用 m 序列;
- 跳频频率采用另一 m 序列控制其跳变规律;
- 进行跳频图案稳定性测试时,为体现测试效果,跳频图案不稳定时的频率选择是随机的;
- 进行跳频增益稳定性测试时,为体现测试效果,随着系统运行时间的增加,载波增益也出现随机跳变。

4.1 跳频图案稳定性研究的仿真验证

图 2 是跳频图案稳定性测试结果的直方图显示,其针对两个跳频周期内的采样信号进行了分析。从图中可以看出,直方图可以简单、直观地显示测试结果,图 2(a)是跳频图案稳定时的测试结果直方图表示,为了提高显示效果,仅显示了部分频率的测试结果,每一个跳频频率的出现次数都是两次,其高度是一致的;图 2(b)是跳频图案不

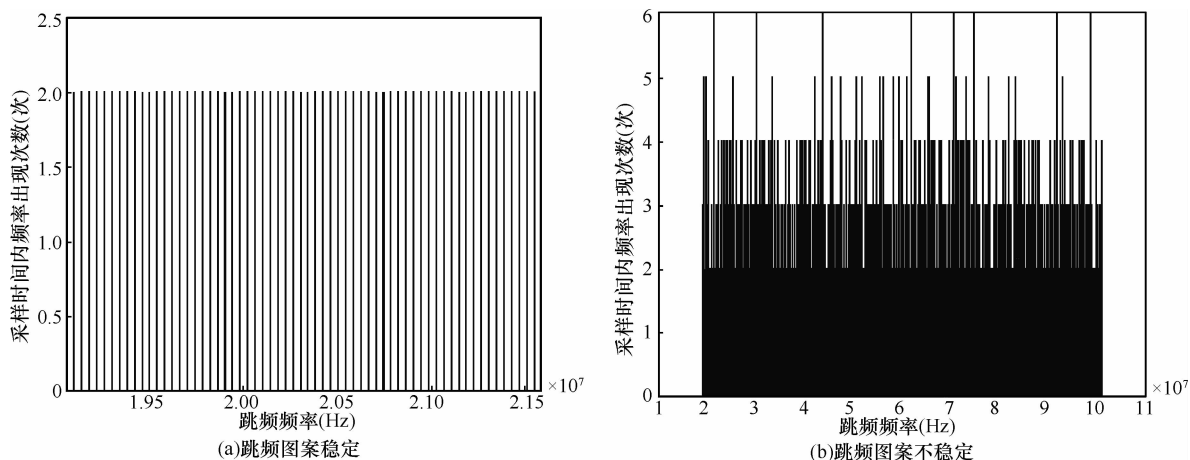


图2 跳频图案稳定性的直方图表示

稳定时的测试结果,不同的频率出现的次数不同,其高度也不一致。

图3是测试结果的三维瀑布图显示,其中, x 轴表示不同的跳频频率, y 轴代表信号的持续时间,即参加信号分析

的信号长度, z 轴代表不同频率在某个运行时间下的出现次数。从图中可以看出,瀑布图不但可以体现不同频率的出现次数,也可以表示不同时间的跳频图案稳定性。

图4利用二维瀑布图显示了跳频图案稳定性的测试

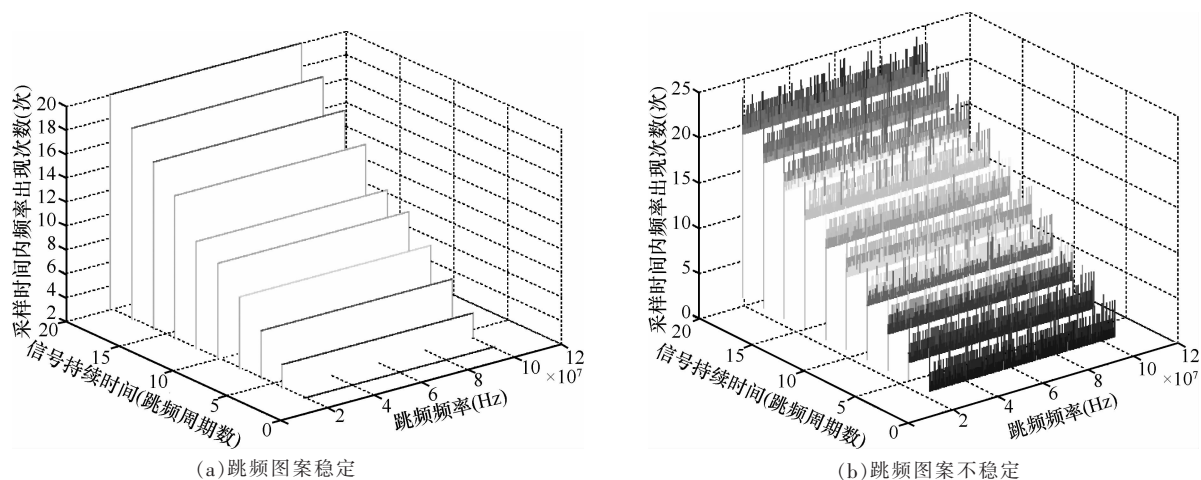


图3 跳频图案稳定性的三维瀑布图表示

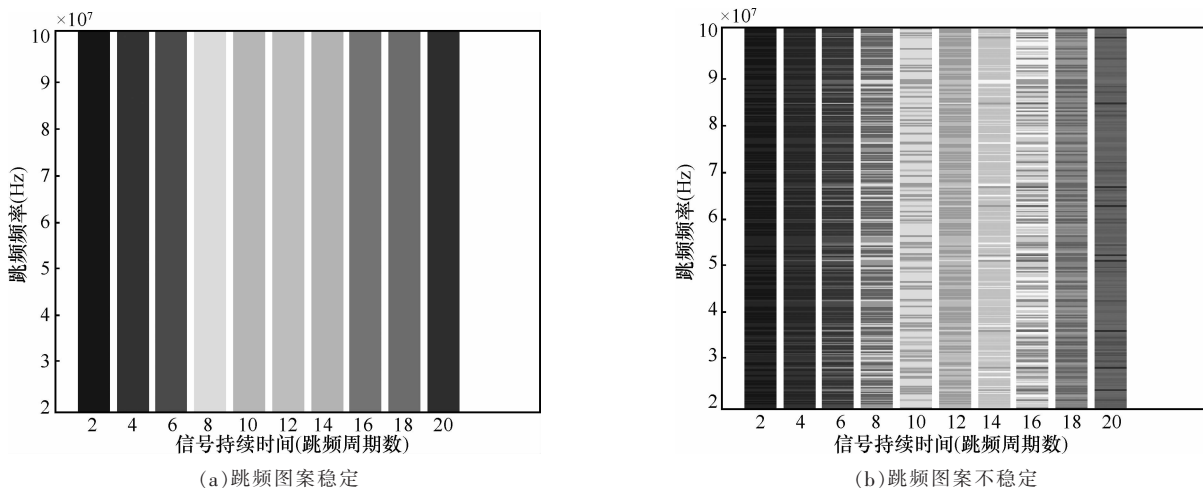


图4 跳频图案稳定性的二维瀑布图表示



结果,横轴表示测试信号的持续时间,分别为 2~20 个跳频周期内步进为 2 个跳频周期的 10 个时间段,纵轴表示跳频频率,不同的颜色代表跳频频率的出现次数不同,随着时间的增加,跳频次数增加,颜色也逐渐变化。若跳频图案稳定,则在某一持续时间内,各个跳频频率的出现次数是相同的,其颜色也是同一种颜色,如图 4(a)所示;若跳频图案不稳定,则在某一跳频时间内,各个跳频频率的出现次数不同,颜色亦不一致,如图 4(b)所示。

4.2 跳频增益稳定性研究的仿真实验

图 5 是跳频图案稳定性测试结果的时频图显示, x 轴表示跳频时刻, y 轴表示跳频频率, z 轴表示谱图增益。从图中可以看出,时频图可以简单、直观地显示测试结果,图 5(a)是跳频图案稳定时的测试结果时频图表示,其分布增益的高度是一致的;图 5(b)是跳频图案不稳定时的测试结果,其高度也不一致。

图 6 是跳频增益稳定性测试结果的直方图显示,其针对两个跳频周期内的采样信号进行了分析,横坐标代表不同的跳频频率,纵坐标表示不同的跳频频率对应的谱图增益。从图中可以看出,直方图可以简单、直观地显示测试结

果,图 6(a)是跳频增益稳定时的测试结果直方图表示,其高度是一致的;图 6(b)是系统运行 10 个跳频周期后跳频增益不稳定时的测试结果,其高度已经不一致;图 6(c)是系统运行 25 个跳频周期后跳频增益不稳定时的测试结果,其高度的不一致效果更加明显。

图 7 是测试结果的三维瀑布图显示,其中, x 轴表示不

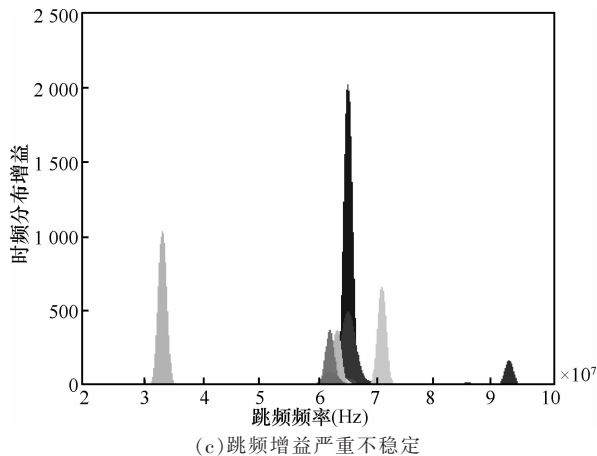
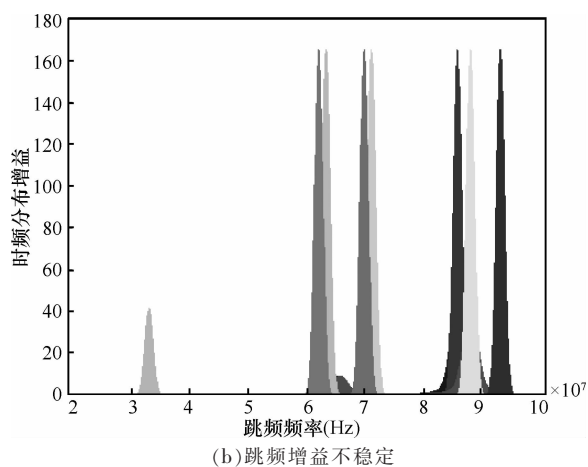
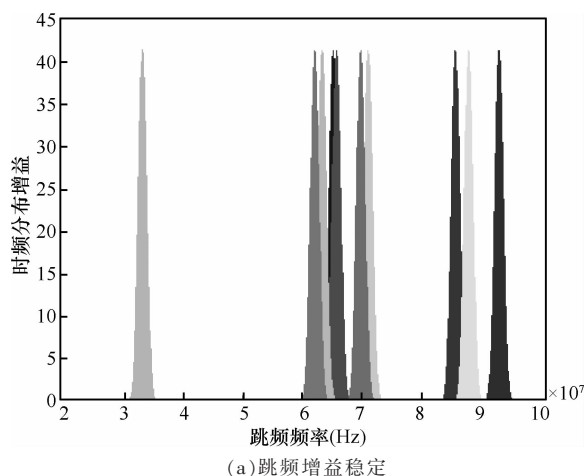


图 6 跳频增益稳定性的直方图表示

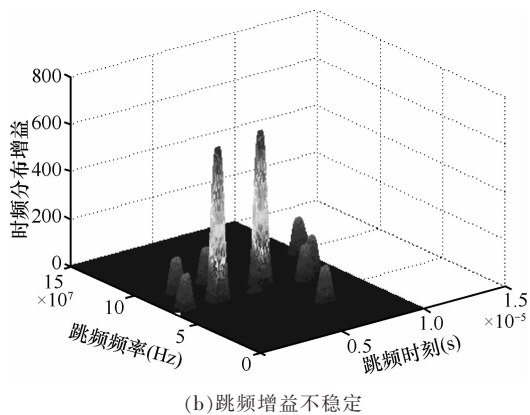
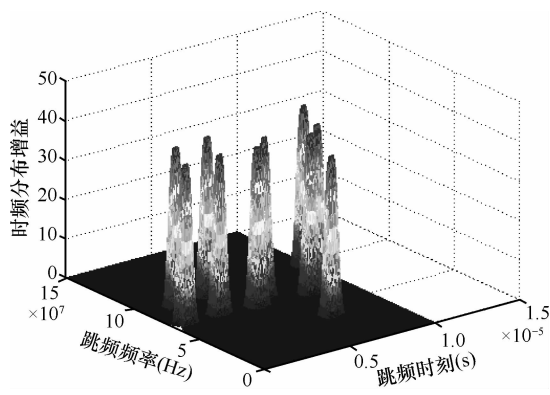


图 5 跳频增益稳定性的时频图表示

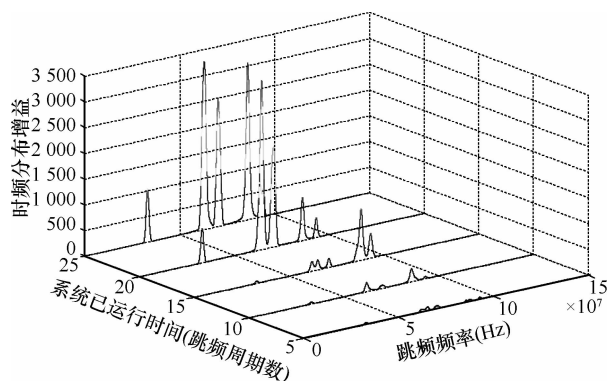


图7 跳频稳定性的三维瀑布图表示

同的跳频频率, y 轴代表系统已经运行的时间, z 轴代表不同频率的谱图增益。从图中可以看出, 随着系统运行时间的增加, 系统的跳频增益稳定性越来越差, 因此, 三维瀑布图不但可以体现不同频率的跳频增益, 也可以表示不同时间的跳频增益稳定性。

图8利用二维瀑布图显示了跳频增益稳定性的测试结果, 其中横轴表示系统的运行时间, 纵轴表示跳频频率, 不同的颜色代表跳频频率的谱图增益。当系统运行了5个跳频周期时, 跳频增益是稳定的, 此时各频率对应的颜色是一致的。随着系统运行时间的增加, 其跳频增益稳定性开始下降, 在系统运行了25个跳频周期后, 系统的跳频增益稳定性最差, 此时, 其不同频率对应的增益颜色的反差也最大, 因此可以通过二维瀑布图直观地观察系统的跳频增益稳定性。

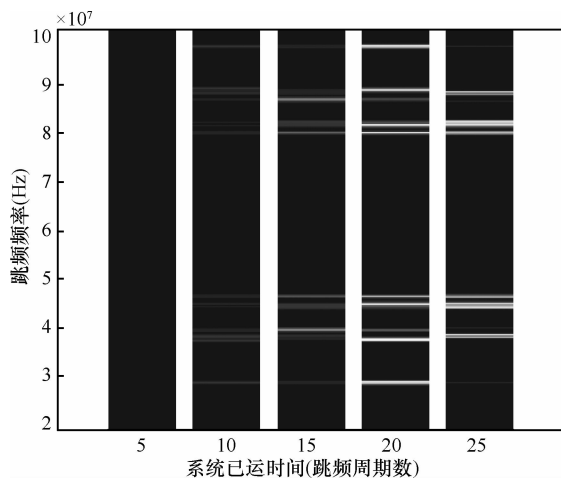


图8 跳频稳定性二维瀑布图表示

5 结束语

本文针对DS/FH混合扩频测控系统在运行阶段中由于设备非理想性产生的不稳定现象, 提出利用跳频图案稳

定性和跳频增益稳定性来衡量系统的稳定性, 并给出了其测试方法及可视化技术。跳频图案稳定性通过统计某段时间内跳频频率对应的出现次数来表示, 跳频增益稳定性通过研究信号的时频增益来衡量。分析及仿真结果表明, 测试指标能够刻画系统运行中出现的不稳定现象, 测试方法亦可准确完成指标测试, 从而完善了混合扩频测控系统的测试体系。

参考文献

- 1 于志坚. 航天测控系统工程. 北京: 国防工业出版社, 2008
- 2 Geraniotis E A. Coherent hybrid DS-SFH spread-spectrum multiple-access communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1985, SAC-3(5): 695~705
- 3 Hill D A, Felstead E B. Laboratory performance of spread spectrum detectors. *IEEE Proceedings Communications*, 1995, 142(4): 243~249
- 4 Phoel W G. Iterative demodulation and decoding of frequency-hopped PSK in partial-band jamming. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(5): 1026~1033
- 5 文霄杰, 张彦仲, 邵定蓉. DS/FH混合扩频系统快速捕获新算法. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(12): 1504~1509
- 6 施磊, 苟先太, 草婷等. 混合扩频测控体制下高精度测速研究. *通信技术*, 2011, 44(7): 96~98
- 7 杨文革, 文贻军, 孟生云等. 直扩/跳频混合扩频信号测量性能分析. *电讯技术*, 2009, 49(1): 13~17
- 8 章兰英, 袁嗣杰, 陈源. 航天扩频测控系统中伪码捕获方法研究. *电子学报*, 2011, 39(6): 1471~1476
- 9 孟生云, 杨文革, 王金宝等. DS/FH测控信号同步方案的捕获性能. *宇航学报*, 2010, 31(8): 2036~2042
- 10 朱明哲, 姬红兵, 金艳. 基于信道化谱增强的混合DS/FH扩频信号跳速估计. *电子与信息学报*, 2010(2): 329~334
- 11 Shui P L, Shang H Y, Zhao Y B. Instantaneous frequency estimation based on directionally smoothed pseudo-Wigner-Ville distribution bank. *IET Radar Sonar and Navigation*, 2007, 1(4): 317~325

(下转第69页)