

文章编号: 2095-4980(2020)06-1020-05

复杂电磁环境下的高速频谱分析技术

陈国通, 刘 琪, 孙 敬

(河北科技大学 信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050000)

摘要: 为解决传统频谱分析系统存在测试速度慢、对瞬态信号侦测分析不精确、实时性差的问题, 提出了频率模板触发技术结合可重构计算, 实现系统的超高速数据捕获、侦测与分析。频谱显示采用数字荧光显示技术, 信号频谱展现更加实时、直观、精确。实测结果表明: 该系统在可接受的性能损失范围内, 提高了对信号的分析精确度。可重构计算使系统运行更高效, 降低了传统频谱分析方法的能量消耗, 使系统在大带宽情况下仍可实现对瞬态信号和复杂信号的实时精准分析。

关键词: 瞬变信号; 信号捕获; 频谱分析; 频率模板触发; 可重构计算; 频谱视图; 数字荧光显示

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019228

High-speed spectrum analysis technology in complex electromagnetic environment

CHEN Guotong, LIU Qi, SUN Jing

(School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050000, China)

Abstract: In order to solve the problems of low test speed, inaccurate analysis of transient signal detection and poor real-time performance of traditional spectrum analysis systems, a Frequency Mask Triggering(FMT) technology combined with reconfigurable computing is proposed to achieve ultra-high speed data capture, detection and analysis. The digital fluorescent display technology is adopted to make the displayed signal spectrum more real-time and intuitive. The measured results show that the system has improved the accuracy of signal analysis within the acceptable performance loss range. The reconfigurable calculation makes the system run more efficiently, reduces the energy consumption, and enables the system to achieve real-time and accurate analysis on the transient signals and complex signals even under large bandwidth conditions.

Keywords: transient signal; signal capture; spectrum analysis; Frequency Mask Trigger; reconfigurable calculation; spectrum view; digital fluorescent display

复杂的电磁环境中, 无线通信面临从传统的静态频谱管理与分配策略发展为高效、动态的管理与分配技术^[1]。传统频谱分析系统中常会遇到很多难以解决的问题, 如对瞬变信号的捕获与定位一直是信号监测与管理工作中的难题。针对这一现象, 本文从无线电频谱监测所面临的问题出发, 为满足复杂电磁环境下频谱快速分析的技术需求, 以及针对现有技术存在的侦测速度慢与频谱分析不精确等问题, 重点研究了实时快速宽带接收与频谱分析的方法。

设计信号捕获、实时分析过程中, 采用频域触发方式以及可配置(重构)技术, 提高对突发信号的捕获精确度与速度^[2-3]。信号频谱特征呈现采取数字荧光频谱技术, 使系统能在更大带宽内实现对复杂信号的快速实时分析, 尤其是混叠信号、瞬态信号等, 精准地实现对信号的侦听捕获与定位。

收稿日期: 2019-06-02; 修回日期: 2019-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61561010); 河北省科技支撑资助项目(18210803D); 河北省科技计划攻关资助项目(17210401D)

作者简介: 陈国通(1960-), 男, 教授, 主要研究方向为北斗卫星导航。email:384410613@qq.com

1 快速频谱分析结构

设计中数据结构为配合触发与显示模块,在捕获存储以及处理结构中采用“点-帧-块”3层模式。这种基于“点-帧-块”的数据结构是实现实时性分析的基础^[4]。频率模板触发和数字荧光显示技术也需以此为前提,实现对复杂混叠信号中的瞬态信号和弱信号的快速侦辨。

系统结构如图1所示,其中数字荧光频谱显示技术能够以颜色直观生动地实时呈现频域中瞬变信号随时间变化的情况。一旦系统发现了一个异常事件,便能进行触发,触发部分采用频率模板触发技术。通过持续不断的捕获,可记录下连续变化的信号信息,以便在相应分析域内进行对信号的时间相关分析。系统不仅可实现实时频谱分析,且三维视图能实时展示信号频率与幅度随时间的变化情况。

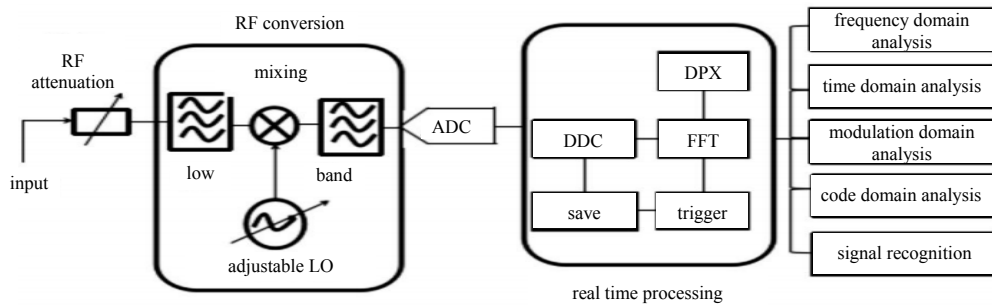


Fig.1 Architecture of system
图1 系统结构图

2 信号捕获与计算

2.1 频率模板触发(FMT)

为克服传统扫频式接收机难以实现对瞬态或弱信号捕获的现象,设计中排除了通过门限电平比较或外部信号触发捕获的方式,采用了频率模板触发(FMT)技术^[4-5],如图2所示。在频谱分析的三维图像中可以清楚地看到,面板左侧呈现出信号频率和幅度随时间变化的情况。触发功能监测频域变化,把任何超门限信号捕获到存储器中。在面板的右侧,频域三维视图会进行自动更新,并可在相应时点展示相应的频谱视图。

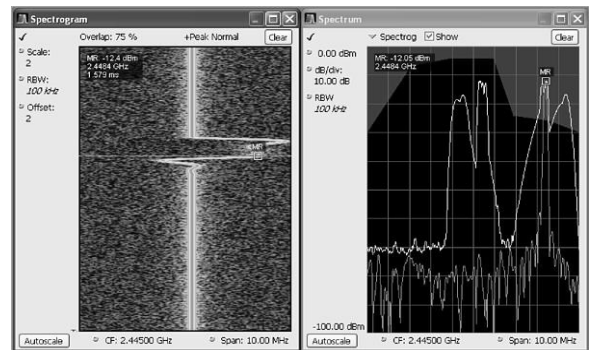


Fig.2 Three-dimensional spectrum
图2 三维频谱图像

FMT可在系统不间断采集时,进行同步实时的快速傅里叶变换,避免系统工作中的数据丢失。数字下变频后的数据送入内存管理模块和频率模板触发判决模块,在内存管理模块进行数据的无缝实时存储,在频率模板触发判决模块内部进行实时的快速傅里叶变换^[6]。

2.2 可配置(重构)系统设计

为确保整个系统在参数、局部模块以及系统整体结构上的动态配置,采用了可配置(重构)系统。对可重构系统的性能进行对比分析,如表1所示。说明了可重构系统可在有限的资源内实现更多功能,提高系统利用率,有利于系统在复杂电磁环境下更高效地对信号进行实时监测与精确分析^[7]。

表1 性能对比分析
Table1 Performance comparison and analysis

| algorithm implementation | running speed | parallel processing | resource consumption | design complexity | input cost | potential for promotion |
|--------------------------|-----------------|---------------------|----------------------|-------------------|------------|-------------------------|
| hardware | fast | better | adjustable | difficult | high cost | no |
| software | slow | limited | unchanged | easy | cost less | yes |
| reconfigurable system | relatively fast | most can be done | unchanged | developing | cost less | yes |

3 数字荧光频谱显示技术

扫频调谐频谱分析仪和步进调谐频谱分析仪进行扫描时,都是在短时间内对频率跨度中的一段进行调谐。如果在调谐部分之外的其他跨度部分出现猝发信号,系统将无法检测或显示。此外,在上次扫描与下次扫描之间的时间间隔中,分析系统会存在漏检信号的情况。另外,传统分析仪还会出现漏掉采集数据块之间的信号情况^[7]。

数字荧光频谱显示技术在测试结果显示中能够展示瞬变信号踪迹,详细且实时地观察瞬变信号。可在测试中呈现较为丰富的信号信息,发现毛刺和干扰^[8-9]。

3.1 信号定位

虽然信号定向系统专门针对信号定位,但在工作中避免不了需要便携仪器协助。常见的定位方式是工作人员手拿便携小型频谱仪或接收机配合定向天线,根据音频啸叫或时频图的反应寻找测试信号最强的方向。

数字荧光频谱显示技术也可进行有效的信号定位^[10]。系统以测试断续缓慢变化的信号为例,使用传统方法测试定位该信号,结果有相应程度的影响。而数字荧光频谱显示技术能够使得这类“准稳态信号”的频谱显示成稳态信号,之后通过调整天线便可快速确定干扰信号方向,并对之进行定位。

3.2 侦听概率

对偶发信号频谱进行捕获与分析是高速实时分析系统的基本要求,图3为数字方式实现的信号侦测。提高强度可使样点变亮,从而可查看可能已经变暗的偶发事件。在噪声包围的连续信号中,可调低强度,加重噪声^[11]。

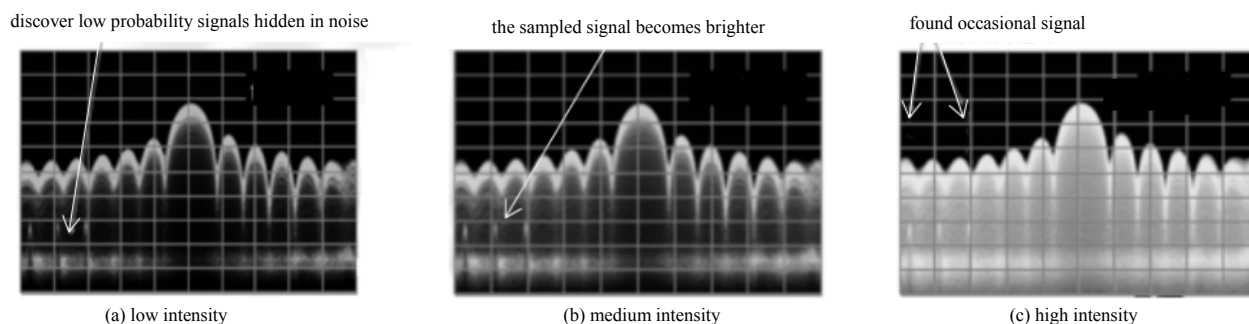


Fig.3 Display effect of intensity adjustment

图3 强度调节显示效果

实时频谱分析系统中的DPX技术保证了侦听概率,可以保证系统在110 M的带宽范围内每秒处理超290 000个频谱,实现最短10.3 μs 的瞬时信号的百分百捕获^[12]。它的应用已不限于频谱监测领域,是频谱监测与管理的有效工具^[13-14]。

4 测试结果对比

瞬变信号变化可达微秒级,以测试每625 μs 一帧,每帧间隔250 μs 的WLAN信号为例。传统扫频式扫描速度较快,但频谱显示结果如图4(a)所示为杂乱脉冲,随时间不停跳变,无法精确观测。要想观察到此信号的完整频谱,须将图4(b)中的最大保持数设为10 s,非常不利于实时频谱测试。由此可见,在监测中需要计算信道频谱的占用度,较长的计算时间使系统无法满足实时性检测的要求。

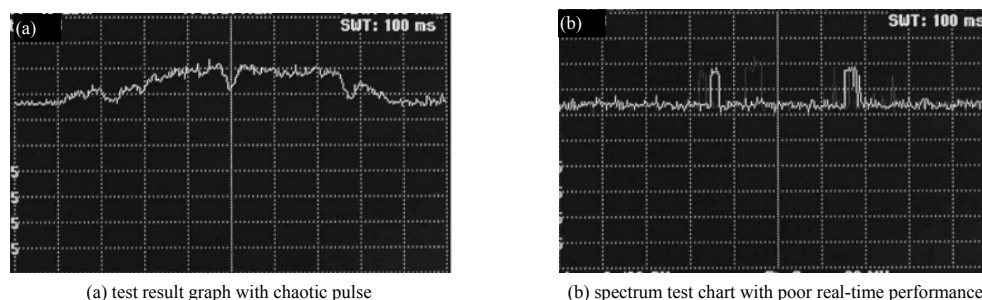


Fig.4 Traditional test results

图4 传统测试结果

新型分析系统测试结果如图5所示,该系统测试时,在1 s时间内,WLAN信号的频谱完全展现出来,之后再适当转动天线,便可对要寻找的干扰信号方向进行定位。

系统完成杂散信号的高性能和灵敏度测量的速度比其他频谱分析仪快得多,可以迅速、准确且成功地进行传统测量和故障排除,包括100%检测概率、最佳最短信号持续时间和最佳实时动态范围。

5 结论

本文采用FMT技术以及可重构计算,结合数字荧光显示技术,实现系统的超高速数据捕获、侦测与分析。其实测结果与传统频谱分析系统相比,在实现信号精准接收的同时,兼顾了频谱分析的实时性;并且加强了对于瞬态猝发信号的捕获与分析,显示中位图可依照发生频率在相应事件上标出对应色码,以最高效的方式查看瞬变信号。

参考文献:

- [1] 黄赛. 复杂电磁环境下高性能频谱感知与分析方法研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2017. (HUANG Sai. Research on high-performance spectrum sensing and analysis methods in complex electromagnetic environment[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.)
- [2] 陈勇,张余,张建照,等. 无线电干扰设备频谱特征仿真模型库系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(1): 58-63. (CHEN Yong,ZHANG Yu,ZHANG Jianzhao,et al. Design of simulation model library system for spectrum characteristics of radio interference equipment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2019,17(1):58-63.)
- [3] 代泽洋,王贺,刘宝泉,等. 认知雷达中协作频谱感知技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2015,13(1):17-20,26. (DAI Zeyang, WANG He,LIU Baoquan,et al. Study on cooperative spectrum sensing technology in cognitive radar[J]. Radar Science and Technology, 2015,13(1):17-20,26.)
- [4] 陈曾平,吴巨红,宿绍莹,等. 宽带实时频谱分析技术及其应用[J]. 信号处理, 2012,28(2):151-157. (CHEN Zengping, WU Juhong,SU Shaoying,et al. Broadband real-time spectrum analysis technology and its application[J]. Signal Processing, 2012,28(2):151-157.)
- [5] 钟毅伟,沈韬,毛存礼,等. 核优化相关向量机太赫兹频谱特征提取方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2016,36(12):3857-3862. (ZHONG Yiwei,SHEN Tao,MAO Cunli,et al. A method for extracting terahertz spectrum features from kernel optimization correlation vector machines[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016,36(12):3857-3862.)
- [6] 郭仕剑,李坡,胡昆明,等. 实时频谱分析技术在雷达信号侦察中的应用[J]. 信号处理, 2011,27(8):1229-1234. (GUO Shijian,LI Po,HU Kunming,et al. Application of real-time spectrum analysis technology in radar signal reconnaissance[J]. Signal Processing, 2011,27(8):1229-1234.)
- [7] 唐瑞,岳显昌,张兰,等. 高频地波雷达频谱监测仪的设计[J]. 雷达科学与技术, 2017,15(1):108-114. (TANG Rui,YUE Xianchang,ZHANG Lan,et al. Design of HF ground wave radar spectrum monitor[J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(1):108-114.)
- [8] 耿雨晴. 宽带频谱感知技术研究与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017. (GENG Yuqing. Research and implementation of broadband spectrum sensing technology[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2017.)
- [9] 李坡,杨剑,张月,等. 雷达侦察中数字荧光技术的应用研究[J]. 计算机工程与科学, 2011,33(4):168-172. (LI Po,YANG Jian,ZHANG Yue,et al. Application research of digital fluorescence technology in radar reconnaissance[J]. Computer Engineering and Science, 2011,33(4):168-172.)
- [10] 郭仕剑,唐鹏飞,宿绍莹,等. 数字荧光实时频谱分析设备的设计实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2011,25(9):781-786. (GUO Shijian,TANG Pengfei,SU Shaoying,et al. Design and implementation of digital fluorescence real-time spectrum analysis equipment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011,25(9):781-786.)
- [11] 陈雷. 基于MWC的模拟信息转换技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2017. (CHEN Lei. Research on analog information conversion technology based on MWC[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.)
- [12] 泰克公司. 泰克扩展了USB频谱分析仪家族系列,支持13 GHz和18 GHz频谱范围 新增RSA513A和RSA518A满足了对Ku频段和5G LTE基站测试的市场需求[J]. 电子测量与仪器学报, 2018,32(9):186. (Tektronix. Tektronix expands the family of USB spectrum analyzers to support the 13 GHz and 18 GHz spectrum ranges. The new RSA513A and RSA518A

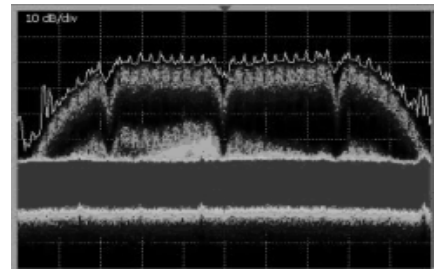


Fig.5 Test results of new analytical system
图5 新型分析系统测试结果

- meet the market demand for Ku-band and 5G LTE base station testing[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2018,32(9):186.)
- [13] 泰克公司. 泰克为RSA7100A宽带射频信号分析仪增加IQFlow~(TM)功能[J]. *电子测量技术*, 2018,41(13):111. (Tektronix. Tektronix adds IQFlow~(TM) function to RSA7100A broadband RF signal analyzer[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018,41(13):111.)
- [14] 韦再雪,杨大成,桑林. 基于认知无线电技术的系统级动态频谱分配方案[J]. *中国通信*, 2014,11(7):84-91. (WEI Zaixue, YANG Dacheng,SANG Lin. System-level dynamic spectrum allocation scheme based on cognitive radio technology[J]. *China Communications*, 2014,11(7):84-91.)

(上接第 1014 页)

- [5] GUO Y,ZHAO W,LI F,et al. Improving continuous-variable measurement-device-independent multipartite quantum communication with optical amplifiers[J]. *Communications in Theoretical Physics*, 2017(68):191-200.
- [6] UNDEN T,BALASUBRAMANIAN P,LOUZON D,et al. Quantum metrology enhanced by repetitive quantum error correction[J]. *Physical Review Letters*, 2016,116(23):230502.
- [7] ABADIE J,ABBOTT B P,ABBOTT R,et al. A gravitational wave observatory operating beyond the quantum shot-noise limit[J]. *Nature Physics*, 2016(7):962-965.
- [8] PEZZE L,SMERZI A. Mach-zehnder interferometry at the heisenberg limit with coherent and squeezed-vacuum light[J]. *Physical Review Letters*, 2008,100(21):073901.
- [9] YONEZAWA H,NAKANE D,IWASAWA K,et al. Quantum-enhanced optical phase tracking[J]. *Science*, 2012,337(6101):1514.
- [10] LAVERICK K T,WISEMAN H M,DINANI H T,et al. Adaptive estimation of a time-varying phase with coherent states:smoothing can give an unbounded improvement over filtering[J]. *Physical Review A*, 2018,97(3):025658.
- [11] ROY S,PETERSEN I R,HUNTINGTON E H. Robust adaptive quantum phase estimation[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(3):22.
- [12] YAO L,LI T,LI Y,et al. An improved feed-forward neural network based on UKF and strong tracking filtering to establish energy consumption model for aluminum electrolysis process[J]. *Neural Computing & Applications*, 2018,31(4):1-15.
- [13] BERRY D W,WISEMAN H M. Adaptive quantum measurements of a continuously varying phase[J]. *Physical Review A*, 2002,65(4):043803.
- [14] TSANG M,SHAPIRO J H,LLOYD S. Quantum theory of optical temporal phase and instantaneous frequency[J]. *Physical Review A*, 2008,78(5):053820.
- [15] TSANG M,SHAPIRO J H,LLOYD S. Quantum theory of optical temporal phase and instantaneous frequency II continuous-time limit and state-variable approach to phase-locked loop design[J]. *Physical Review A*, 2009,79(5):053843.