

宽带实时频谱分析技术及其应用

陈曾平 吴巨红 宿绍莹 郭仕剑

(国防科技大学 ATR 国防科技重点实验室, 410073)

摘 要: 宽带实时频谱分析技术主要用于各类宽带辐射源信号的侦察、捕获与分析。本文分析了宽带条件下实时频谱分析面临的挑战, 重点分析了宽带实时频谱分析的概念、系统结构、实现原理以及关键技术, 介绍了相关技术在频谱监视以及信号侦察中的应用示例, 随着应用的深入以及一些新的理论方法的不断完善, 该技术在复杂宽带信号分析方面具有很好的应用前景。

关键词: 宽带实时频谱分析; 频谱监视; 信号侦察

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)02-0151-07

The technology and application of wideband real-time spectrum analysis

CHEN Zeng-ping WU Ju-hong SU Shao-ying GUO Shi-jian

(ATR Key Lab., National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The technology of wideband real-time spectrum analysis focuses on the effective discovery, capture and detection of signal with the large bandwidth and the complex modulation. This paper first analysis the challenge of wideband real-time spectrum analysis (RTSA), then highlights the conception of technology of wideband real-time spectrum analysis, general system architecture, basic principle and key technologies. At the third section of the paper, some applications are provided. Finally, with the deepening application on signal monitoring and detection, and with supplement of some new theoretical methods, wideband real-time spectrum analysis should be promoting in wide area.

Key words: wideband real-time spectrum analysis, spectrum monitoring, signal detection

1 引言

随着各类新体制辐射源数量不断增加, 体制越来越多样, 信号形式越来越繁杂, 各类电子侦察系统中面临越来越复杂的电磁环境, 电磁环境的复杂性至少体现在以下几个方面:

- 1) 信号密度不断增加, 交织混叠现象严重;
- 2) 信号突发性不断增强, 瞬态信号无处不在;
- 3) 信号所处频段不断扩展, 信号呈现大带宽、大动态趋势。

面临大带宽、大动态以及瞬态猝发的挑战, 新型电子侦察系统需要采用先进技术, 一方面探索适应复杂信号环境的信号分析技术, 以便有效分选和测量信号, 另一方面要在信号捕获、实时分析以及信号特征呈现等方面采取有效的手段, 以便尽可能不漏

掉感兴趣信号, 特别是瞬态信号、弱信号和包含混叠信号。

宽带实时频谱分析技术 (RTSA)^{[1][2][3]} 正是针对上述应用需求提出的, 它借鉴实时频谱分析仪器设备中若干先进技术, 整合信号处理、超高速数据采集存储和传输^{[2][4]}、可配置(重构)计算^[5]、先进显示^{[6][8][9][10]}等技术, 实现更大带宽、更高精度的信号获取, 灵活选择信号分析精度和带宽, 为宽带复杂信号分析提供有效的技术途径。

本文结构如下: 第一节概述了宽带实时频谱分析技术的必要性; 第二节在介绍通用仪器设备中所采用实时频谱分析技术基础上, 重点阐述宽带条件下实现实时频谱捕获分析所面临的挑战以及解决方案; 第三节介绍宽带实时频谱分析技术在信号侦察中的应用示例; 第四节是本文小结。

2 宽带实时频谱分析原理

2.1 宽带条件下实时频谱分析面临的挑战

根据信号流密度理论,分析带宽越大,信号之间的关系越复杂。有效实现对更大带宽信号的监视和侦察带来了如下技术挑战:

- 如何完整呈现大带宽信号频谱态势?
- 如何将包含在大带宽信号中的弱小、窄带信号发现甄别出来?
- 如何在确保全频带信号态势呈现的同时不损失信号分辨率?
- 如何有效发现并捕获和识别重要瞬态信号?

常用的频谱分析仪是基于超外差接收机的扫频式结构^{[9][10]},本振在频带内扫描,进行逐个窄带的信号分析,其接收机结构见图1。

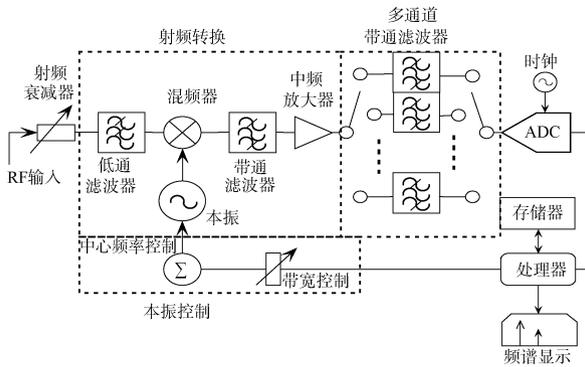


图1 扫频式接收机结构

Fig. 1 the structure of swept frequency analyzer

这类频谱分析技术有如下缺点:

- 只适于稳态信号测量,对瞬态信号、突发信号测量能力十分有限;
- 只能测量频率幅度,缺少相位信息,属于标量测量方法;
- 它需要多组低频带通滤波器,获得整个频段的测量结果要花费较长的时间,称为非实时处理方法,如果扫描带宽较宽,将延长整个频带的扫描时间,

导致某些瞬态信号丢失。如图2中的突发信号,扫频式结构会漏掉某些瞬态信号:当接收机扫到 F_a 频段时,在 F_b 频段上出现了一个猝发信号,维持时间较短,当接收机扫到 F_b 频段时,该信号已经消失,该瞬态信号将无法被检测到。

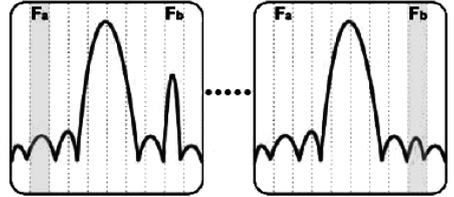


图2 扫频式接收机局限性^[10]

Fig. 2 the defeat of swept frequency analyzer

2.2 商业实时频谱分析仪的局限性

出于通用目的、实现成本以及技术难度等多方面考虑,目前商用实时频谱分析设备最大信号捕获和分析带宽为110MHz左右,无法满足更大带宽条件下信号实时捕获和分析需求。

2.3 宽带实时频谱分析技术概念

宽带实时频谱分析技术借鉴商业实时频谱分析仪器设备中的频率模板触发(FMT)、数字荧光(DPX)显示等技术,实现先进的频谱图生成和信号分析功能。

采用宽带实时频谱分析技术的电子侦察系统将具有以下优势:

- 可以灵活选择分析带宽、精度与分析模式,能够适应大带宽、大动态的分析环境;
- 具有更好的瞬态、交叠信号分析能力;
- 具有更强的实时性;
- 具有分析多种体制混合信号的能力;
- 具有更加直观的频谱态势呈现能力;
- 能够从多视角、多侧面获得信号情报信息。

2.4 宽带实时频谱分析系统基本结构

宽带实时频谱分析系统一般包括三个部分,见图3。

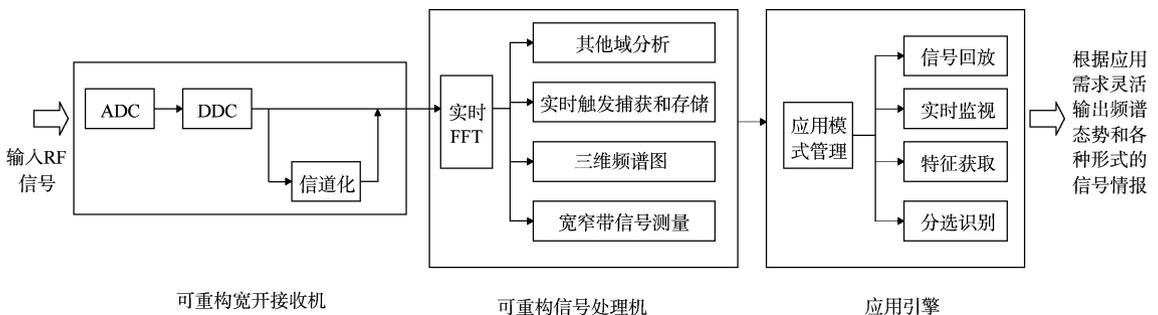


图3 宽带实时频谱分析系统结构

Fig. 3 the architecture of system of wideband real-time spectrum analysis

宽带数字接收机首先对射频(或中频)信号进行数字化,为满足不同应用模式和精度下的信号分析要求,接收机部分要兼顾宽带条件下的信号不失真采样、大动态范围以及数据高速传输与存储等方面。

对于瞬态信号捕获,从技术实现上既需要能够及时发现信号,又需要将信号捕获下来以供分析之用,这对信号处理机提出了以下要求:

- 无论在任何信号环境下,只要出现感兴趣的信号,就要能够发现并捕获;
- 处理上要具备实时性。

实时频谱分析技术充分利用数字化技术进行信号捕获和测量,通过 FFT 等数字信号处理手段实现信号的实时触发和捕获,并在多个域中分析信号。这种方法可以对一定带宽内的所有频率成分同时进行分析处理,不会像扫频式结构那样,受限于扫频时间而漏掉某些频谱信息,实现对突发信号、复杂调制信号和干扰信号的捕获、观察和分析能力。实时频谱分析接收机结构如图 4 所示。

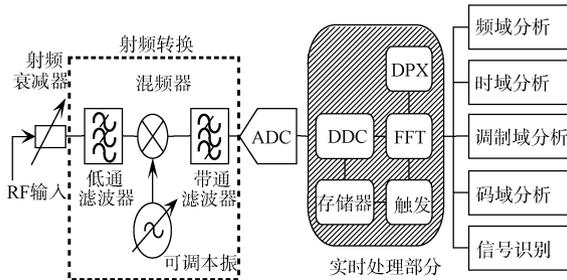


图 4 实时频谱分析接收机结构[10]

Fig.4 the structure of real-time spectrum analyzer

实时频谱分析的频率分辨率受限于每一帧实时 FFT 的点数,当 FFT 点数过大时,运算量过大,信号处理的硬件能力无法满足;当带宽增加而 FFT 点数不变,则频率分辨率势必下降,将使信号的分析精度降低。采用数字信道化接收机是宽带条件下有效提高分析精度的技术途径,允许对大带宽内某一频段信号进行高分辨的窄带化接收与分析。

实时 FFT 是实时频谱分析的基本运算,也是实现有效触发和信号捕获分析的前提,宽带条件下的实时频谱分析需要根据具体的应用需求动态调整 FFT 点数,以满足分析精度的要求。

2.5 实时频谱分析技术数据结构

实现实时频谱分析技术的基础是“点-帧-块”的三层次数据采集、存储和处理结构,见图 5 所示。

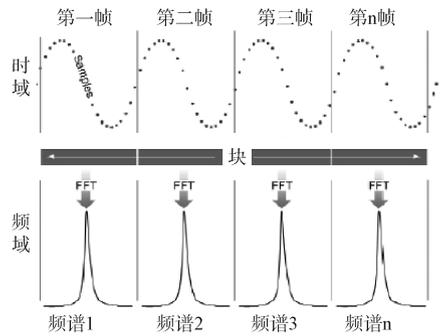


图 5 实时频谱分析中的数据采样存储和处理层次^[10]

Fig.5 the hierarchy of data in real-time spectrum analyzer

其中:

- 样点:是离散的时域数据点,样点的时间分辨率取决于 ADC 的采样间隔;
- 帧:整数个连续样点构成了帧,每一帧数据作为 FFT 处理的基本单元,帧的时间分辨率由采样率和 FFT 的点数决定;
- 块:是连续无时间间隔的多帧数据,满足触发条件时数据存储的长度即为块的大小,块的大小受限于捕获内存的容量。

以上述三层数据结构为纽带,将信号的数字化、存储和处理有机结合,为信号的多域分析、特定条件的实时触发和捕获以及信号的实时或事后分析提供了保证。基于“点-帧-块”的数据结构,可以实现实时频谱分析中的两项关键技术:频率模板触发(FMT)和数字荧光显示技术(DPX),并基于 DPX 中的统计特性,实现多种形式的信号分析。

2.6 宽带实时频谱分析关键技术

1、频率模板触发技术(FMT)

扫频式接收机一般通过门电平比较或者外部信号进行触发捕获,属时域触发方式,难以实现对瞬态或弱信号捕获,FMT 则通过频率模板的灵活设定克服这一不足,属频域触发方式。

频率模板包含了频率和功率双重信息,它是一组预先设定的频率-幅度值,作为各频率点上频率的幅度门限,见图 6。FMT 的基本思想是:对高速采集获取的数据进行频域变换,然后与模板进行比对匹配,超过相应频点幅度门限就触发对原始数据的捕获。FMT 为检测和捕获瞬态信号、弱信号等提供了技术途径。对于图 3 的情况,如果设定如图 7 所示的频率模板,则一旦落在 F_b 频段内的信号出现就会触发并被捕获。

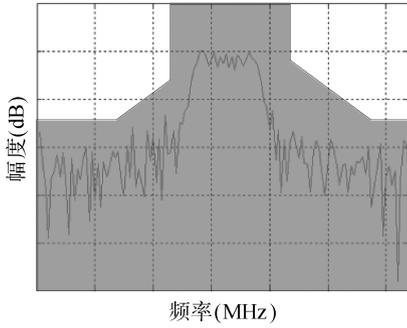


图6 频率模板

Fig. 6 the frequency template

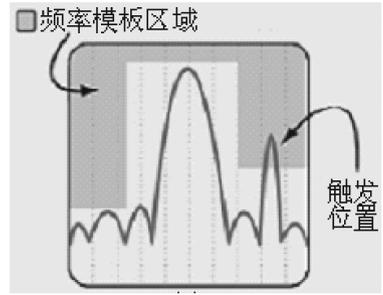


图7 频率模板触发捕获弱信号的情况^[10]

Fig. 7 the FMT to capture weakly signal

2、数字荧光显示技术(DPX)

DPX 最早用于 CRT 显示设备,后应用于实时频谱分析设备上,基于 DPX 的频谱显示能够把不同时间内处于同一频段上的多个信号,利用强度等级、配色方案

和统计轨迹等技术来突出显示出来,呈现更加丰富的信号信息。

基于 DPX 的频谱图包含了信号在一段时间内的“频率-幅度-同一幅度命中次数”的三维信息,见图 8 所示。

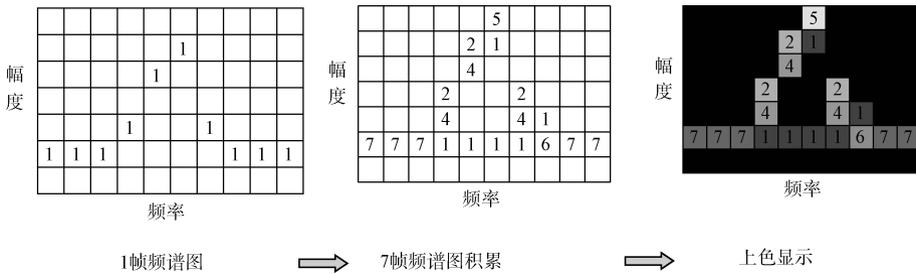


图8 基于 DPX 显示技术的频谱图原理^[3]

Fig. 8 the principle of spectrogram displayed on DPX

高清晰 DPX 显示技术为信号监测提供了直观的判断依据,具体实现方法参见文献^{[6][8]}。通过 DPX 频谱图,为在复杂信号环境中发现感兴趣信号提供了便利,基于 DPX 频谱图,还可以衍生出其他的方法,为进一步的信号分析和检测识别提供更加多样的途径。

的频幅特性,该图被称为“瀑布图”,瀑布图的好处在于充分展现了频率随时间变化情况。

为了更直观反映与时间相关的多域信息,本文还定义了基于 DPX 计算的随时间统计的频率-过门限幅度信息,称之为“统计频谱图”。

将 DPX 频谱图、瀑布图以及统计频谱图统称为“三维频谱图”,三维频谱图从不同侧面表现信号特征,为信号分析提供新的思路。

3、基于 DPX 频谱态势图的信号特征分析技术

4、可配置(重构)系统设计技术

DPX 频谱图的优势在于能够通过各频点的不同幅度点上命中次数来反映信号在单位时间内各个频率点上的出现概率,对于单一的稳态信号可以通过 DPX 频谱图直观得出信号的频域基本参数,对于复杂信号,就难以直接得出信号特征测量值。由于 DPX 频谱图的统计特性转换为图像颜色,特征更加明显,因此可以借助图像分割方法对 DPX 频谱图进行处理,实现多信号的分离。

为实现更大带宽条件下灵活的信号监视、高精度信号分析和测量,采用先进的可配置(重构)系统设计技术(RC, Reconfigurable Computing)是必要的。RC 技术能够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重配置,为在有限计算资源条件下扩展功能或者实时更新和分时复用某些系统资源提供技术保证。

3 宽带实时频谱分析技术应用示例

一般实时频谱分析仪中除实时 DPX 频谱图外,还基于“点-帧-块”数据结构以及 FMT 技术,实现了信号在一段时间内的频率-幅度显示,通过“频率-时间-幅度”三维信息反映了频率模板触发前后一段时间内

本节主要介绍宽带实时频谱分析技术在信号监视

和分析中的几种应用情况。

3.1 LFM 信号 DPX 频谱图

图 9 是带宽为 200MHz 的线性调频信号,目前 SAR 信号甚至达到或超过 GHz 带宽,宽带实时频谱分析技术为此类信号的监视与分析提供了技术手段。

从 DPX 频谱图可得到信号的基本参数。例如从

图中容易得到-3dB 功率点,从而计算出信号的中心频率和带宽^[7]。

3.2 复杂信号 DPX 频谱图

图 10 是在某 500MHz 分析带宽内的实际电磁信号频谱态势,通过该图,可以得到频带内各信号的频谱动态变化情况。

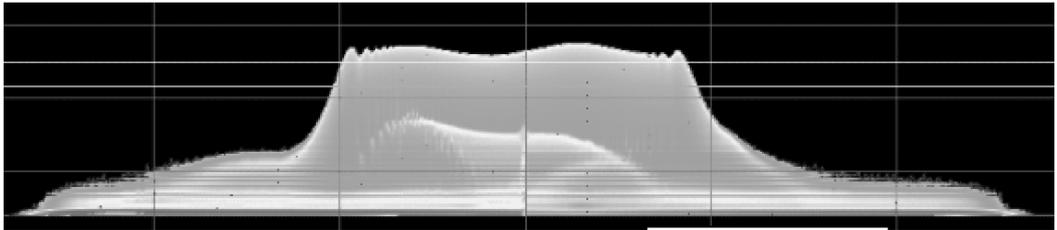


图 9 具有 200MHz 带宽的 SAR 信号频谱态势

Fig. 9 the spectrum of a SAR signal with the bandwidth of 200MHz

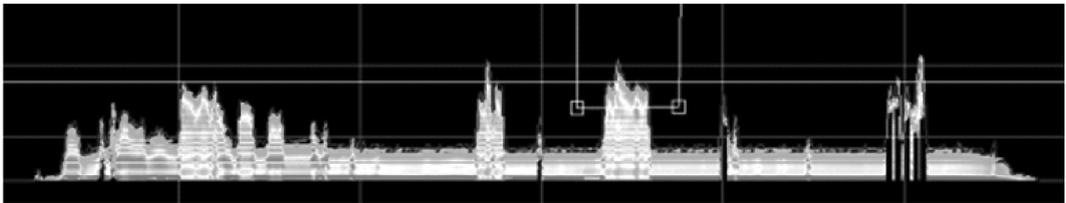


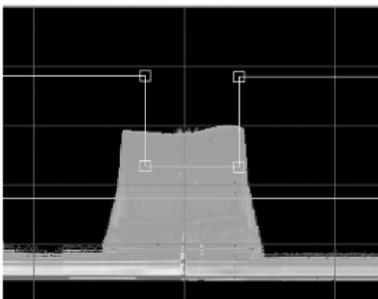
图 10 500MHz 带宽内信号频谱

Fig. 10 the spectrum with a bandwidth of 500MHz

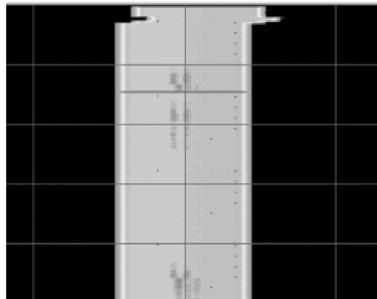
3.3 利用三维频谱图和 FMT 综合分析复杂信号

图 11(1)是某频段内信号的 DPX 频谱图,通过该图难以直观发现被包含在大带宽点内的窄带信号,图 11(2)

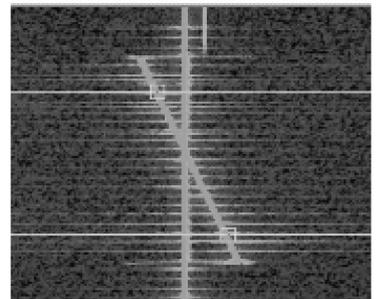
是实时反映该信号随时间变化的统计频谱图,通过统计频谱图可以发现被包含信号的情况,利用频率模板实现触发捕获,再通过瀑布图将二者区别开来,见图 11(3)。



(1)某(包含)信号DPX图



(2)该信号统计三维频谱图



(3)该信号瀑布图

图 11 综合利用三维频谱图分析信号包含情况

Fig. 11 the case of signal analysis using the three-dimension spectrogram

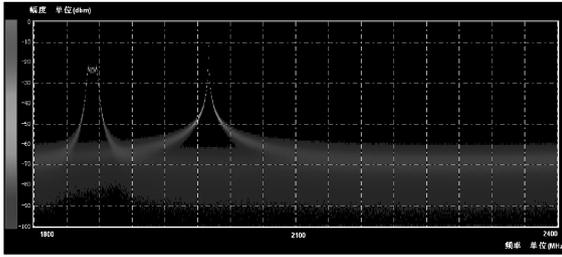
3.4 利用 DPX 频谱图以及图像分割技术实现信号分析

多信号情况下,由于 DPX 图反映了信号的频域统计特性,因此利用多信号在 DPX 图上的差异性(中心频率、功率谱幅度、幅度命中次数等)来区分之^[3]。

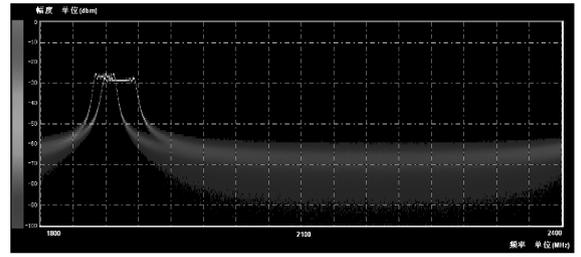
图 12(1)是两信号分离情况,此时无论功率谱幅

度和命中次数关系如何,都可以将两个信号在频域上区分。

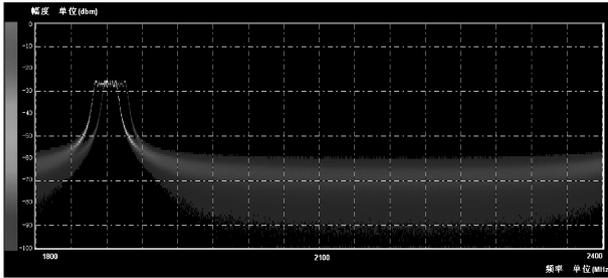
图 12(2)、(3)和(4)分别为两信号交叉时幅度命中次数相同功率谱幅度不同、幅度命中次数不同功率谱幅度相同、以及幅度命中次数和功率谱幅度都相同的情况。



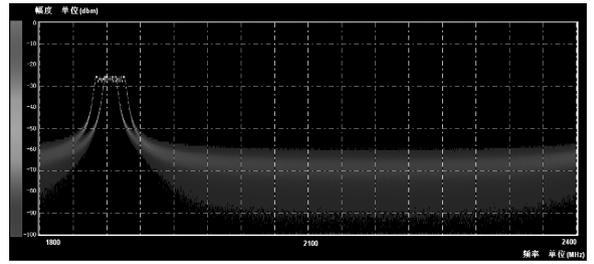
(1)两信号频率位置分离情况



(2)频率交叉--命中次数相同幅度不同



(3)频率交叉--命中次数不同幅度相同



(4)频率交叉--命中次数和幅度都相同

图12 具有不同位置关系的两信号频谱图

Fig. 12 two signal with different location in spectrogram

对于图(2)情况,可以根据幅度差异来区分信号。对信号功率谱幅度做门限检测,可得到强信号的峰值幅度及对应的命中次数,在此基础上测量强信号的频域特征并根据命中次数恢复其频谱形状,然后用原DPX频谱图减去此强信号频谱,余下的可认为是弱信号频谱,再测量其频域特征。

对于图(3)情况,可以根据幅度命中次数差异来区分信号。根据幅度命中次数得到统计直方图,由于不同信号和噪声出现次数的差异,直方图呈现峰-谷交替状,根据峰值出现位置可以将两信号分离出来。

对于图(4)情况,很难通过差异将两信号区分,此时可以借鉴应用3信号包含的分离方法进行处理。

以上列举了宽带实时频谱分析技术在信号监视与分析中的几个应用示例,从中可以看出,信号的差异以及应用目的的不同将带来使用上的差异,因此将多种技术集成,提供多种工作模式和分析方法,结合多种特征进行信号分析是十分必要的。

4 结束语

总之,各类新体制辐射源的出现,使得电磁信号环境日益复杂,这给电子侦察、频谱监视以及信号分析等带来了新的挑战,宽带实时频谱分析技术是解决这些问题的可行技术途径之一,随着应用的深入以及一些新的理论方法的不断完善,该技术在复杂宽带信号分

析方面具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 宿绍莹,刘平,陈曾平. 宽带实时频谱分析技术研究与应用[J]. 电子测量与仪器学报,2007,21(5):113-116. Su Shaoying, Liu Ping, Chen Zengping. Design and Implementation of Wideband Real-time Spectrum Analyzer [J]. JOURNAL OF ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENT, 2007, 21(5): 113-116. (in Chinese)
- [2] 宿绍莹 侯庆凯 陈曾平. 基于 RapidIO 的宽带实时频谱分析. 数据采集与处理,2011, 26(2):152-155. Su Shao ying, Hou Qingkai, Chen Zengping. Wideband Real-Time Spectrum Analyzer Based on RapidIO [J]. JOURNAL OF OF DATA ACQUISITION & PROCESSING, 2011,26(2):152-155. (in Chinese)
- [3] 李坡. 宽带数字侦察接收系统关键技术研究与应用[D]. 长沙:国防科技大学,长沙. 2009:44-45, 85-86, 91-94. Li Po. Research and Realization on Key Techniques of Wideband digital reconnaissance receiving system [D]. Doctor Dissertation of National University of Defense Technology, Changsha. 2009:44-45, 85-86,91-94.
- [4] 张月. 宽带数字阵列雷达全数字接收机及信号处理关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,长沙. 2010: 107,128.

- Zhang Yue. Research on Key Technology of All-digital Receiver and Signal Processing of Wideband Digital Array Radar[D]. Doctor Dissertation of National University of Defense Technology, Changsha. 2010:107,128.
- [5] 吴巨红,陈曾平,张银福. 基于平台的可配置计算及其在自动目标识别中的应用[J]. 信号处理, 2010, 26(8):1222-1228.
- Wu Juhong, Chen Zengping, Zhang Yinfu. Overview of Platform-based configurable Computing and Application on Auto-Target-Recognition[J]. SIGNAL PROCESSING, 2010, 26(8):1222-1228. (in Chinese)
- [6] 郭仕剑 唐鹏飞 宿绍莹 陈曾平. 实时频谱态势图的生成和伪彩色显示编码方法[J]. 信号处理, 2011, 27(9):1375-1379.
- GUO Shi-jian, TANG Peng-fei, SU Shao-ying, CHEN Zeng-ping. Build of Image for Real-time Spectrum's State and Display of Pseudo-coloring Coding[J]. SIGNAL PROCESSING, 2011, 27(9):1375-1379. (in Chinese)
- [7] 郭仕剑 李坡 胡昆明 陈曾平. 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):1229-1233.
- GUO Shi-jian, LI Po, HU Kun-ming CHEN Zeng-ping. Application of Real-time Spectrum Analysis Technology in Radar Reconnaissance [J]. SIGNAL PROCESSING. 2011, 27(8):1229-1233. (in Chinese)
- [8] 郭仕剑 宿绍莹 唐鹏飞 陈曾平. 应用数字荧光技术的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):781-785.
- GUO Shijian, SU Shaoying, TANG Pengfei, CHEN Zeng-ping. Design of Real-time Spectrum Analysis Applying DPX [J]. JOURNAL OF ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENT, 2011, 25(9):781-785. (in

Chinese)

- [9] Christoph Rauscher. 频谱分析原理中文版, 第二版[M]. 罗德施瓦茨公司. 2005:29-32, 34-90.
- [10] Tektronix Company. Fundamentals of Real-Time Spectrum Analysis[M/CD]. 2005:2-6.

作者简介



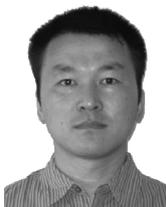
陈曾平,男,国防科技大学 ATR 实验室教授,博士生导师,主要从事自动目标识别、信号处理等领域研究。

E-mail: atrchen@sina.com



吴巨红,女,国防科技大学 ATR 实验室副教授,硕士生导师,主要从事信号处理、可配置计算等领域研究。

E-mail: wujuhong92@sohu.com



宿绍莹,男,国防科技大学 ATR 实验室讲师,主要从事全数字雷达接收机,信号处理等领域研究。

E-mail: sy_su@126.com



郭仕剑,男,国防科技大学 ATR 实验室博士研究生,主要研究方向电子对抗和雷达信号处理。

E-mail: sjguo@nudt.edu.cn