

实时频谱分析技术在雷达信号侦察中的应用

郭仕剑¹ 李 坡² 胡昆明³ 陈曾平¹

- (1. 国防科学技术大学电子科学与工程学院 ATR 实验室, 湖南长沙 410073;
2. 国防科技大学国家安全与军事战略研究中心, 湖南长沙 410073;
3. 空军装备研究院通信导航与指挥自动化研究所, 北京, 100086)

摘 要: 复杂电磁环境下, 信号侦察系统需要宽带的信号采集和处理能力、高截获概率和快速准确的分析能力。数字化雷达侦察宽带接收机中采用实时频谱分析技术可以提高设备对信号的捕获能力和观察能力, 是一种非常有应用前景的新技术。本文首先研究了实时频谱分析技术的基本原理及其两个关键技术——频率模板匹配技术和数字荧光技术, 然后提出了经过频率模板匹配处理后基于数字荧光技术生成的频谱积累图进行信号检测的处理方法, 并定性分析了在接收频段上存在单信号、双信号及多信号等不同情况下该方法的处理性能。对双信号和多信号情况, 根据信号位置按照分离、交叉和包含三种情况进行了分析。最后给出了相应的仿真验证, 假定频段上存在三个宽带信号, 其中一个信号在频率模板的模板区, 另外两个信号不在, 对 3 种能分离的情况在 5dB、10dB、15dB、20dB 的不同信噪比下各作了 100 次试验, 并对试验结果进行了分析。仿真结果表明, 采用文中提出的处理方法, 能够有效的分析处理在同一时间段内存在的多个不同信号, 从而提高了雷达侦察接收机的性能。

关键词: 雷达侦察; 实时频谱分析; 频率模板匹配; 数字荧光技术

中图分类号: TP971 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)08-1229-06

Application of Real-time Spectrum Analysis Technology in Radar Reconnaissance

GUO Shi-jian¹ LI Po² HU Kun-ming³ CHEN Zeng-ping¹

- (1. ATR Key Lab, School of Electronic Science and Technology, NUDT, 410073, ChangSha;
2. Center for National Security and Strategic Studies, National University of Defense Technology, 410073, ChangSha;
3. The Communication Navigation and Command Automation Institute of the Airforce Equipment Academy, 100086, BeiJing)

Abstract: In the complex electromagnetic environment, the system for signal detection of radar reconnaissance receiver needs the abilities of wideband signal acquisition and processing, high probability of intercept and capture, and fast and accurate analysis. The digital radar reconnaissance system that applies the real-time spectrum analysis technology can highly enhance the capability of capturing and observing signals, and it is a new technology which has a very nice foreground in the application. First of all, the basic theory of real-time spectrum analysis technology and the two key techniques— frequency mask matching (FMM) and Digital phosphor technology (DPX) have been worked over. Then the method for signal detection based on cumulative spectrum which was made from DPX after FMM was put forward. Beside this, the performance in different conditions including single signal, double or multiple signals existing in the same receiver band was qualitatively analyzed. When there is more than one signal, the relationship of frequency position is divided into the separation, cross and containing, all the resolvent for every situation are particularly explained. Eventually the corresponding simulation tests were presented. There are three broadband signals in the frequency band, one signal not match the frequency mask and the other two signals do. Every 100 tests were done under the SNR of 5dB, 10dB, 15dB and 20dB. The analysis for the results and the conclusion was discussed followed. The simulating results has demonstrated that the multiple signals existing in the same time period can be analyzed effectively using the method proposed in this paper, which improves the performance of radar reconnaissance receiver.

Key words: Radar Reconnaissance; Real-time Spectrum Analysis; Frequency mask matching; Digital phosphor technology

收稿日期: 2011 年 5 月 26 日; 修回日期: 2011 年 7 月 22 日

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目资助, 编号 NCET-06-0921

1 引言

复杂电磁环境下,信号复杂性不断增大,信号密度不断增加,突发性不断增强,信号所处频段也不断扩展。现代雷达信号侦察系统面对如此复杂的战场电磁环境,需要同时具有宽带的信号采集和处理能力、高截获概率以及快速准确的分析测量能力^[1]。为满足上述要求,现代雷达侦察接收机通常采用数字接收机结构,因为与传统接收机相比,数字接收机特别是宽带数字接收机具有如下优点:可保留信号的全部信息、可采用数字信号处理的方法实现参数的高精度测量、可处理多批同时到达信号等^{[2][3]}。在数字技术高速发展的今天,利用数字技术对接收机进行数字化设计,可以极大提高接收机的性能。

数字接收机的处理方式灵活多样,可以根据需要对信号采取不同的检测、监视方法^{[4][5]},本文将实时频谱分析的几项关键技术整合后应用到雷达信号侦察处理中,从而进一步提高了侦察接收机对信号的捕获、观察和分析能力。实时频谱分析是近几年发展起来的一种新的信号分析技术,该技术能够实现电磁信号的实时触发,无缝的捕获信号,还能够在多个域中分析信号^[6]。随着数字技术的飞速发展,实时频谱分析技术也取得了许多重大进展,应用范围越来越广。其核心技术包括实时触发、无缝捕获和多域分析技术在不断发展变化中又衍生出新的信号处理技术,丰富了实时频谱分析技术的应用。

在宽带数字接收机中,应用实时频谱分析技术的方法是在高速 ADC 数字化后首先进行数字下变频,然后采用实时 FFT 处理器将信号变换到频域,再根据信号的频域信息设置实时触发模板,将触发后的时域和频域数据存储到内存中,最后根据不同需要在多个域中进行分析、测量信号参数。实时频谱分析技术常采用的处理结构如图 1 所示^[7]。

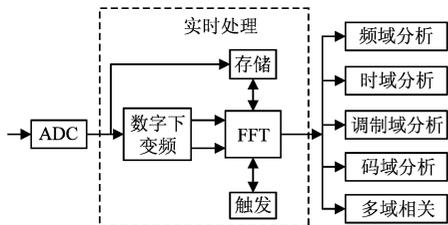


图1 实时频谱分析方法结构图

Fig. 1 Framework of real-time spectrum analysis

2 实时频谱分析中的关键技术

实时频谱分析技术包括数字下变频、FFT、数字实时触发、高速存储、多域分析等多种数字信号处理方法,其中有两项独特的技术是实现实时触发和无缝

捕获功能的关键所在:频率模板匹配技术和数字荧光技术。

2.1 频率模板匹配技术

“频率模板”的概念最早由美国泰克仪器公司提出,并在其宽带数字实时频谱分析仪中得到应用。频率模板技术允许用户根据频域中的特定事件设定触发条件,用户可以自己定义一个模板,这个模板是在有效带宽内触发事件的条件集合。这个集合由一系列频点及幅度组成,可以在不同的频率上设置不同的功率触发门限。“匹配”即把实际采集信号的频谱形状与用户预先定义的“频率模板”进行对比,如何符合将触发特定事件进行存储或处理。

频率模板包括了频率和功率双重信息。频率模板匹配的一个示例如图 2 所示,图中深色区域表示模板区,当有信号频谱出现在这个区域之外时,将产生触发。图中的信号完全在模板区内,即和模板相匹配,不满足触发条件,无法触发存储。

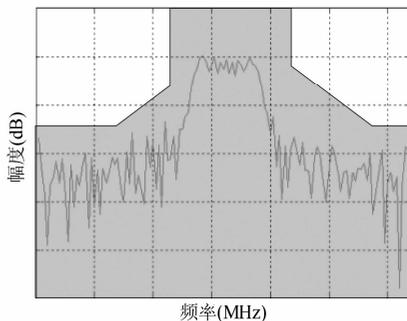


图2 频率模板示意图

Fig. 2 Sketch map of frequency template

频率模板匹配技术加入了频率信息作为触发条件,允许频谱分析设备按频谱形状变化来触发存储。即使存在电平高得多的其它信号时,频率模板触发技术仍可以可靠地检测其中的弱信号。这种存在强信号时触发、存储、检测弱信号的能力,对检测间歇性信号、是否存在互调产物及瞬时频谱包容超限等至关重要^[8]。

2.2 数字荧光(DPX)技术

数字荧光技术(DPX)是近年来应用于实时频谱分析中的一项创新性技术。该技术可以显示在不同时间内处于同一频段上的多个信号,并利用强度等级、配色方案和统计轨迹等技术来突出显示信号的多种不同信息。文献[9]对DPX技术的原理与应用进行了详细介绍。DPX技术的实质是把一段时间内的所有信号频谱集成到一张频谱图上显示。这张频谱图包含这段时间内频率、幅度和幅度命中次数的三维信息,充分展现了信号特征。DPX技术的具体实现过程为“信号数字

化→图形化→显示”,首先通过连续的实时 FFT 运算,把信号从时域转换到频域中,然后将变换后的频谱写入存储空间中进行积累,再转换成直观、动态的画面。从 DPX 的实现过程可以看到,DPX 生成的图像保留了信号的多种特征,并将这些特征直观的展现出来。观测人员通过 DPX 图像对信号进行监视,即使在复杂的信号环境中也能方便的发现感兴趣的信号,并且可以通过采用信号态势分析、统计轨迹检测、图像分割、图像识别等方法对 DPX 图像进行处理和分析,从而得到更多对电子侦察有用的特征信息^[9]。

3 在雷达信号侦察中的应用

从上一节的介绍可以看出,采用频率模板匹配技术和数字荧光技术可以大大提高接收机对信号的实时捕获能力。在本文中,将这两个技术结合起来进行雷达信号侦察处理,其处理过程如图 3 所示,此处,假定已知一定的信号信息或是噪声背景信息,并由此设立频率模板。

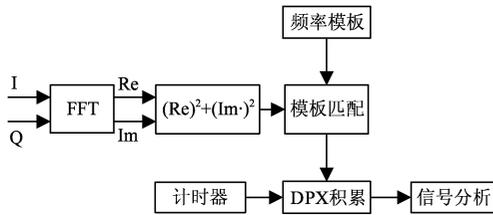


图 3 结合两种方法的处理结构图

Fig. 3 Processing framework map integrating frequency template and DPX

采样后获得的数字信号经 FFT 后,由平方和运算得到功率谱的幅度,然后和预先设置的模板进行匹配,如匹配则将数据丢弃,如不匹配则触发存储;将触发前后一段时间的频谱进行 DPX 积累,在积累达到指定时间时,将 DPX 频谱图输出用做进一步的分析处理。其中,频率模板匹配可以起到信号检测的作用,只将检测到的感兴趣的信号进行积累,这样得到的 DPX 频谱图可以认为都是由包含了信号信息的有用频谱组成的。下面就工作频段上存在单信号、双信号和多信号等情况下的具体处理方法进行讨论。

3.1 单信号情况

单信号是指当在 DPX 积累时间内工作频段上只存在一个信号,准确的说是经频率模板匹配后只余一个信号的频谱信息。此时,信号成分单一,由 DPX 频谱图可以很容易的得到信号的多个参数。

若得到的 DPX 频谱图如图 4 所示,则可以很容易从图中得到 3dB 功率点,从而计算出中心频率和带宽;通过最大峰值检测,检测每列频点上的最大幅度值,得到信号峰值功率;通过均值检测,计算每列频点上幅度

和相应幅度命中次数乘积和的均值,得到信号的平均功率;若记录触发的时间序列为 t_1, t_2, \dots, t_{N_T} ,则由此可得到脉冲到达时间的序列,进而计算出信号的重复周期。至此,基于 DPX 频谱图,通过一些简单的测量计算就得到了信号的基本特征参数集,实现了对信号的分析测量。

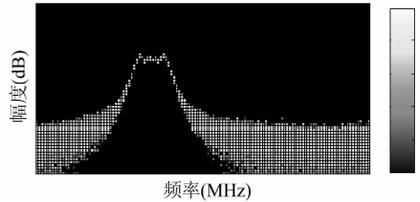


图 4 模板匹配后得到的 DPX 频谱图仿真
Fig. 4 Simulative image of DPX after template matching

3.2 双信号情况

电子侦察宽带接收机面临复杂的电磁环境,宽带接收机必须具有处理多信号的能力。本节以 DPX 频谱图上存在两个信号的情况为例进行讨论。

处理的基本思路是尽量根据信号的差异性(中心频率、功率谱幅度、幅度命中次数等)将两个信号分离,然后用单信号的处理方法分析测量信号的各参数。考虑一般性,假设两个信号均为宽带信号(点频信号可以看成是特殊的宽带信号),按两个信号的频率位置关系、功率谱幅度的大小和幅度命中次数多少可以分为多种情况。下面按频率位置的不同关系做具体分析。按频率位置的关系可分为分离、交叉和包含等,分别表示两个信号的频谱无交叉部分、有部分交叉和一个信号的频谱完全在另一个信号的带宽之内的情况。

(1) 频率位置相互分离

如图 5 所示,此时无论功率谱幅度和幅度命中次数关系如何,都可以容易的将两个信号在频域上区分开,从而可以用 3.1 中提到的测量方法计算出信号的频域参数,但此时估算的信号时域参数并不准确。

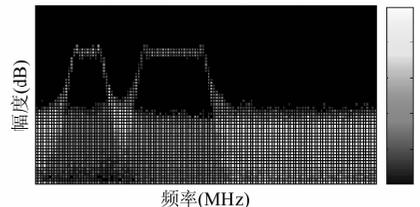


图 5 两信号频率位置相互分离情况下的 DPX 频谱图
Fig. 5 Simulative image of DPX for two signals with separated frequency

(2) 频率位置相互交叉

当频率位置相互交叉时,又可按功率谱幅度和幅度命中次数分为四种情况:

a) 当两个信号的幅度命中次数相同而功率谱幅

度不同时,如图6中的a)图所示,此时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。

b) 当两个信号的幅度命中次数不同而功率谱幅度相同时,如图6中的b)图所示,此时可以根据幅度命中次数差异来区分信号。根据幅度命中次数做统计直方图,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。直方图中靠近0端的第一个峰值的可

认为是一个信号的命中次数,根据这个数值可恢复出其频谱形状,并在此基础上进行测量;然后用原DPX频谱图减去此信号频谱,余下的可认为是另一个信号的频谱,再测量其频域特征。

c) 当两个信号的功率谱幅度和幅度命中次数都不同时,信号在DPX频谱图上的特征明显不同,可以采用上面的任一种方法来处理。

d) 当两个信号的幅度命中次数和功率谱幅度都相同时,如图6中的c)图所示,此时各特征区分不明显,无法将两个信号直接分开,因此也得不到准确的测量值。

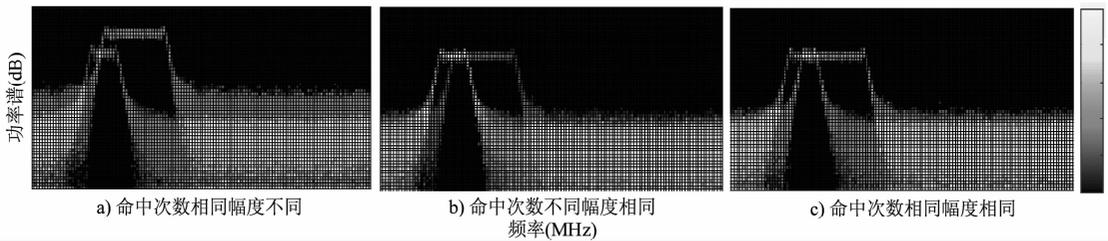


图6 两信号频率位置相互交叉情况下的DPX频谱图

Fig.6 Simulative images of DPX for two signals with crossed frequency

(3) 频率位置相互包含

和频率位置相互交叉的讨论一样,也可按功率谱幅度和幅度命中次数分为四种情况,得到的结论和处理方法也类似。当两个信号的幅度命中次数和

功率谱幅度都相同,无法分离信号,其它情况可分离信号并测量得到其频域特征。此时的信号DPX频谱图如图7所示。限于篇幅,只画出其中的两种情况。

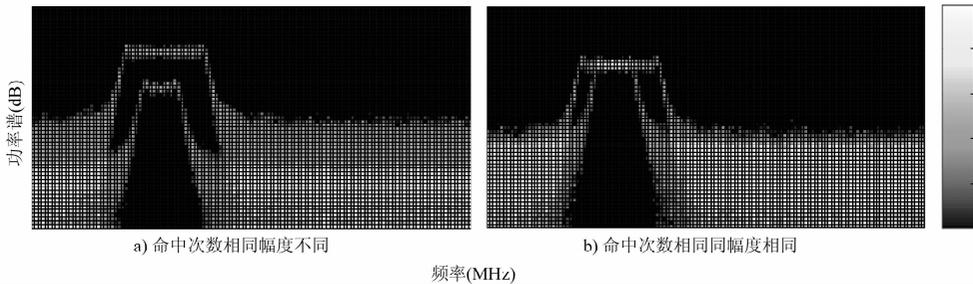


图7 两信号频率位置相互包含情况下的DPX频谱图

Fig.7 Simulative images of DPX for two signals with inclusive frequency

将以上讨论的结果总结如下表:

表1 双信号的分类情况

Tab.1 The class instance of two signals

状态	频率位置关系		
	分离	交叉	包含
A 相同 B 相同	√	×	×
A 相同 B 不同	√	√	√
A 不同 B 相同	√	√	√
A 不同 B 不同	√	√	√

注: A 为功率谱幅度, B 为幅度命中次数; √表示可以分离, ×表示无法分离

从表1中可以看出,当含有两个信号的DPX频谱图的三个要素频率位置、功率谱幅度、幅度命中次数中有一个存在差异,即可将信号分离出来。而当功率谱幅度、幅度命中次数相同而频率上相互交叉或包含时,如果没有其它信息进行辅助判决,无法正确区分两个信号;特别是当两个信号带宽也相同时,在频谱图上完全重合,可认为就是一个信号。

从以上分析可以看出,当信号个数大于1时,只用本节的处理方法已不能得到准确的信号时域特征。此时可结合其它处理方法一起分析测量信号,得到完整全面的信号特征。

3.3 多信号情况

当在 DPX 频谱图中存在更多信号时,需要讨论的情况更加复杂。此时依然可以根据信号的差异性,将信号逐个分离出来,然后用前面提到的双信号处理方法和单信号处理方法进行分析测量。另外,在文献[7]中提出,由于 DPX 频谱图是一幅三维图像,因此可以利用数字图像处理的方法对其进行处理,实现信号的自动检测和分离。

也可以考虑在图 3 所示的处理结构上增加多个处理支路,每个支路都有独立的频率模板、DPX 存储器和信号分析模块,处理机可以同时进行多个不同的频率模板匹配及后续处理,降低了每个处理支路出现多信号的概率。但是,这样做势必会增加硬件复杂度和消耗更多的资源,实际应用中可以根据需要确定适当的处理路数。

4 仿真试验

在本节的仿真中,采用如图 1 所示的处理结构,DPX 积累时间定为 100ms,设定频段上存在三个宽带信号,其中有一个信号在频率模板的模板区,另外两个信号不在。这两个信号的频率位置为相互交叉,对 3.2 中提出的 3 种能分离信号的情况在 5dB、10dB、15dB、20dB 的不同信噪比下(添加的是高斯分布的随机噪声)各作 100 次试验,得到结果如表 2 所示:

表 2 频率位置相互交叉情况下的仿真结果

Tab. 2 Simulative result of two signals with crossed frequency

SNR (dB)	5	10	15	20
频率模板匹配成功率	100%	100%	100%	100%
A 相同 B 不同信号分离率	87%	95%	98%	100%
A 不同 B 相同信号分离率	100%	100%	100%	100%
A 不同 B 不同信号分离率	97%	100%	100%	100%

注:A 为功率谱幅度,B 为幅度命中次数

两个可匹配信号的频率位置为相互包含,其它条件不变,得到结果如表 3 所示:

表 3 频率位置相互包含情况下的仿真结果

Tab. 3 Simulative result of two signals with inclusive frequency

SNR (dB)	5	10	15	20
频率模板匹配成功率	100%	100%	100%	100%
A 相同 B 不同信号分离率	94%	98%	100%	100%
A 不同 B 相同信号分离率	95%	96%	100%	100%
A 不同 B 不同信号分离率	97%	100%	100%	100%

注:A 为功率谱幅度,B 为幅度命中次数

由仿真结果可以看出,频率模板匹配的方法在低信噪比时依然能准确的触发信号,鲁棒性强,但是各种信号分离方法随着信噪比的降低而性能下降。由表 2 和表 3 的仿真结果可知,不同信噪比、不同条件下有不同的信号分离概率,实际检测信号时要满足不同的信号分离率,必须满足一定的信噪比才能应用本方法进行处理。例如需要 100% 的分离率,需要 20dB 的信噪比,而如果只需要满足低的分离率,那么相应低一些的信噪比就可以满足要求,信噪比条件由实际检测中需要的信号分离率决定。当存在多于两个信号满足触发条件的情况,可以参照两信号的情况进行处理。

5 结论

本文针对雷达侦察宽带接收机所面临的复杂电磁环境,提出了一种基于实时频谱分析技术的信号侦察处理方法。该方法以频率模板触发技术和 DPX 技术为核心,对通过触发得到的 DPX 频谱图做进一步信号分析,在多信号情况下也可准确的分离信号并测量其频域参数。仿真结果表明该方法是准确有效的。

本文采用的频率模板触发方法,对于已知特定信号的检测具有显著的优势,特别是针对复杂背景下特定弱小信号的检测和侦收问题,是一种非常好的解决方案。基于 DPX 技术的信号侦察技术,可以对一段时间内频谱变化规律形成统计信息,生成一段时间内的实时频谱态势图,大大提高设备对信号的捕获和观察能力,非常适合在雷达信号侦察中应用,特别是能够实现跳频信号和瞬态信号的检测。

参考文献

- [1] 马岸英,杨军超,司昕璐. 宽带高分辨无线电信号侦察接收机[J]. 探测与控制学报,2005,27(2):1-4.
Ma Anying, Yang Junchao, Si Xinlu. Wideband Radio Signal Reconnoitering Receiver with High Resolution[J]. Journal of Detection & Control, 2005, 27(2): 1-4. (in Chinese)
- [2] James Tsui 著,杨小牛,陆安南,金颢译. 宽带数字接收机[M]. 北京:电子工业出版社,2002:17-21.
James Tsui author, Yang Xiaoniu, Lu Annan, Jin Biao translator. Digital Techniques for Wideband Receivers [M]. BeiJing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 17-21. (in Chinese)
- [3] 王自强,张春,王志华. 无线接收机结构设计[J]. 微电子学,2004,34(4):455-459.
Wang Ziqiang, Zhang Chun, Wang Zhihua. An Overview of Wireless Receiver Architectures[J]. Microelectronics, 2004, 34(4): 455-459. (in Chinese)

- [4] 王永明,张尔扬,赵津丽. 应用形态学滤波的宽带侦察接收机信号检测新方法[J]. 应用科学学报,2009,27(4):343-347.
WANG Yong-ming, ZHANG Er-yang, ZHAO Jin-li. Signal Detection in Broadband Reconnaissance Receiver Based on Morphological Filter[J]. JOURNAL OF APPLIED SCIENCES, 2009, 27(4): 343 ~ 347. (in Chinese)
- [5] 马启明,王宣银,杜栓平. 基于频谱幅度起伏特性的微弱信号检测方法研究[J]. 电子与信息学报,2008,30(11):2642-2645.
Ma Qi-ming, Wang Xuan-yin, Du Shuan-ping. Research of the Method for the Weak Signal Detection Based on the Amplitude Fluctuation Property of the Frequency Spectrum [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(11): 2642-2645. (in Chinese)
- [6] Tektronix Company. 实时频谱分析仪中的数字荧光技术基础知识[M/CD],2008:4-9.
Tektronix Company. Fundamentals of Real-time Spectrum Analysis[M/CD]. 2008: 4-9. (in Chinese)
- [7] 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):113-117.
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): 113-117. (in Chinese)
- [8] 张鹏,丁镇. 实时频谱仪在雷达对抗中的应用[J]. 现代雷达,2007,29(3):84-89.
Zhang Peng, Ding Zhen. Application of Real-time Spectrum Analyzer in Radar Countermeasure[J]. Modern Radar, 2007, 29(3): 84-89. (in Chinese)
- [9] 李坡,刘万全,宿绍莹,陈曾平. 数字荧光技术在电子侦

察中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2008,22(12): 342-346.

Li Po, Liu Wanquan, Su Shaoying, Chen Zengping. Implementation of Digital Phosphor Technique in Electronic Reconnaissance [J]. JOURNAL OF ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENT, 2008, 22(12): 342-346. (in Chinese)

作者简介



郭仕剑,男,博士研究生,主要研究方向为电子对抗和雷达信号处理。

E-mail: sjguo@nudt.edu.cn



李 坡,男,博士,助理研究员,主要研究方向为电子对抗和信号侦察处理。

E-mail: lp1979_lp@163.com



胡昆明,男,博士研究生,主要研究方向为通信技术和信号处理。

E-mail: kmhu218@hotmail.com



陈曾平,男,教授,博士生导师,863-703 专家组专家,目前主要从事信号处理、目标识别等领域研究。

E-mail: atrchen@sina.com