

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.018

## 无盲区数字信道化频谱检测方法

马定坤, 靳一, 徐常志, 王苏君, 平一帆, 张建华

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

**摘要:** 传统数字信道化模型存在信道间盲区和混叠, 难以满足现代非合作接收机中全概率检测的任务要求, 本文提出一种通带重叠的数字信道化高效模型, 在频域对各通道输出信号进行了无缝“拼接”, 解决了跨信道信号的全概率检测问题。本文对提出的算法进行了原理仿真, 利用测试数据对定点化后的算法性能验证, 测试结果表明高效算法模型可以应用于非合作宽带信号无盲区、全概率检测的场合。

**关键词:** 宽带信号接收机; 全概率检测; 无盲区; 抗混叠; 信道重叠划分

**中图分类号:** TN971      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2021)S-0107-05

### Digital Channelization Technique Without Blind Zone

MA Dingkun, JIN YI, XU Changzhi, WANG Sujun, PING Yifan, ZHANG Jianhua

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Since blind zones and overlaps exist in the traditional digital channelization model, it is hard to meet the requirements of total probability detection in modern electronic reconnaissance receiver. This paper proposes a overlapping digital channelization model. The processed signals are joint together seamlessly in the frequency domain, and the detection of cross channelization signals becomes possible. The proposed algorithm is simulated and tested by real data. The results demonstrate that the proposed algorithm is high efficient, and can be applied to the place of total probability detection for non-cooperation signal receiving.

**Key words:** broad-band signal receiver; total probability detection; no-blind-zone; no-overlap; channel division with overlap

非合作接收机是电子侦察装备体系的重要组成部分, 可以截获、分析和识别战场区域内的目标辐射源, 在现代电子对抗中“扮演”了一个极其重要的角色<sup>[1-2]</sup>。理想的非合作接收机要求能在全频带范围内能以 100% 的截获概率精确地检测各种信号, 并能达到实时处理, 基于数字信道化技术的接收机为这种应用需求提供了解决的可能<sup>[3]</sup>。

本文所研究的数字信道化实现技术, 采用了多信道并行处理的方式, 其提高了单台数字接收机的处理容量, 高效的多相滤波器组和 FFT 变换降低

了算法的复杂度, 增强了系统的实时处理能力。同时算法利用了信道重叠和通道频域拼接技术有效地解决了通道之间的盲区问题, 同时避免了滤波器的边界效应, 使得接收机具备了全带宽全概率截获能力, 在接收性能上产生了质的飞跃, 具有广阔的发展空间和应用前景。

### 1 算法原理

#### 1.1 无盲区重叠信道划分

信道划分和堆积形式的选择是数字信道化算

**基金项目:** 国家自然科学基金(61801377)资助项目。

**收稿日期:** 2021-05-10; **修订日期:** 2021-06-10

**通信作者:** 马定坤, 男, 博士, E-mail: madingkun@163.com。

**引用格式:** 马定坤, 靳一, 徐常志, 等. 无盲区数字信道化频谱检测方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S): 107-111. MA Dingkun, JIN Yi, XU Changzhi, et al. Digital channelization technique without blind zone[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S): 107-111.

法设计中的关键环节,直接影响到后续信号处理算法的难易程度,甚至会影响数字接收机的性能<sup>[4-5]</sup>。为建立实信号多信道接收机的数学模型<sup>[6-8]</sup>,对实信号的数字谱做信道划分

$$\omega_k = [k - (2D - 1)/4] \times 2\pi/D$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, D - 1 \quad (1)$$

式中: $\omega_k$ 为第 $k$ 信道的归一化中心角频率; $D(D=8)$

为数据抽取率,是实现接收机无盲区的无盲区截获能力。避免滤波器的过渡带特性,最直观的想法利用实信号的频谱对称性<sup>[9-10]</sup>,采用奇信道划分方式,适当拓宽滤波器带宽,使得“相邻”信道在频域上重叠,缩减接收盲区,合理选择正负频谱中的一个进行提取。根据抽取理论,如果降低抽取率,然后再拓宽滤波器,这样信道间就可以避免混叠<sup>[11]</sup>,实信号的无盲区重叠信道划分如图1所示。

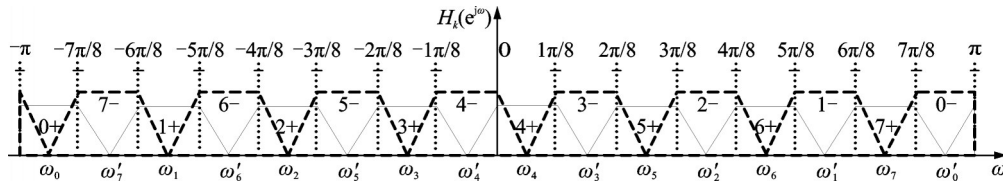


图1 实信号的信道划分方法

Fig.1 Channel division method of real signal

1.2 无盲区数字信道化算法的原理

无盲区信道化算法的基本原理如下

$$y_k(m) = \{ [x(n) e^{j\omega_k n}] \cdot h(n) \} | n = mD =$$

$$\left\{ \sum_{i=-\infty}^{+\infty} [x(n-i) e^{j\omega_k(n-i)}] \cdot h(i) \right\} | n = mD =$$

$$\sum_{i=-\infty}^{+\infty} [x(mD-i) e^{j\omega_k(mD-i)}] \cdot h(i) =$$

$$\sum_{p=0}^{D-1} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} [x(mD-iD-p) e^{j\omega_k(mD-iD-p)}] \cdot h(iD+p) \quad (2)$$

令输入信号  $x_p(m) = x(mD - p)$ , 滤波器系数  $h_p(m) = h(mD + p)$ , 将式(2)代入, 则有

$$y_k(m) = \sum_{p=0}^{D-1} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} x_p(m-i) e^{j\omega_k(m-i)D} \cdot h_p(i) e^{-j\omega_k p} =$$

$$\sum_{p=0}^{D-1} \{ [x_p(m) e^{j\omega_k m D}] \cdot h_p(m) \} \cdot e^{-j\omega_k p} =$$

$$\sum_{p=0}^{D-1} \left\{ [x_p(m) e^{j\omega_k m D}] \cdot h_p(m) \right\} e^{j \frac{(2D-1)\pi}{2D} p} e^{-j \frac{2\pi}{D} k p} =$$

$$\text{DFT} \left\{ [x_p(m) e^{j\omega_k m D}] \cdot h_p(m) \right\} e^{j \frac{(2D-1)\pi}{2D} p} \quad (3)$$

无盲区信道化算法结构图如图2所示。图中第1个乘法器的乘积项  $e^{j\pi m}/2$  为  $D$  取偶数的情况; 当  $D$  为奇数时, 应改为  $(-1)^m e^{j\pi m}/2$ 。假定接收机指标要求的子频带带宽为  $B_w$ , 则算法信道数  $D = f_s/2B_w$ , 相邻信道之间的频域间隔为  $2\pi/D$ 。

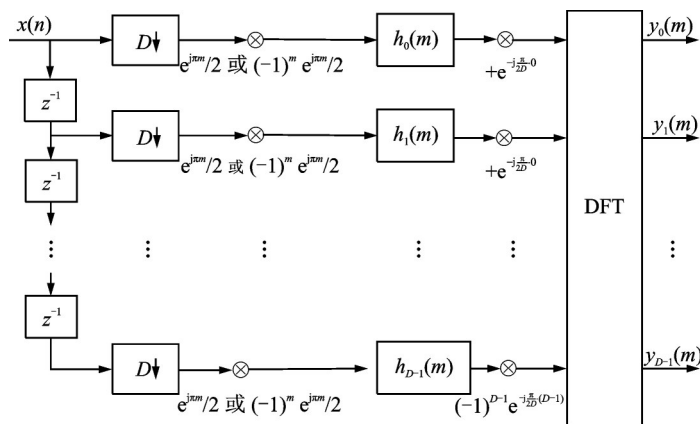


图2 无盲区信道化算法结构图

Fig.2 Structure of digital channelization technique without blind zone

图2中各通道输出需要经过一定的预处理才能得到真正的信号。首先,各信道之间不存在混叠失真但有频率重复,其盲区也就是频率重复区,所以在频域上可以通过直接去掉盲区得到真正的信号。其次,由于此算法分离出的信道与实际顺序不

符,可以通过编程很容易把顺序调整过来。(1)当信道数  $D$  是偶数时,第1、3、5、...、 $D-1$ 子频带对应的信道数分别是  $D/2$ 、 $D/2+1$ 、...、 $D-1$ 。第2、4、6、...、 $D$ 子频带对应的信道数分别是  $D/2-1$ 、 $D/2-2$ 、...、0。(2)当信道数  $D$  是奇数时,第1、3、5、

…、 $D-1$ 子频带对应的信道数分别是 $(D-1)/2$ 、 $(D-1)/2-1$ 、…、 $0$ 。第 $2, 4, 6, \dots, D$ 子频带对应的信道数分别是 $(D+1)/2, (D+1)/2+1, \dots, D-1$ 。为从频域对跨信道信号进行全概率检测,得到接收信号的一个全局谱分布情况。需要对图2所得到的信道化结果进行一个“拼接”,以满足电子侦查接收机的宽带范围内全概率接收要求,其基本原理如图3所示。

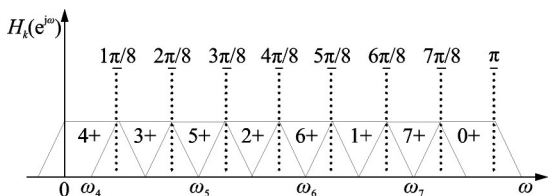


图3 宽带范围内的信道化全景分析方式

Fig.3 Digital channelization panoramic analysis in broad frequency domain

## 2 实验验证

本节分别利用线性调频信号和A/D实际采样信号,对算法的频域全概率检测能力进行验证。

### 2.1 线性调频信号

由于FPGA中浮点数实现比较复杂,且资源占用比较高,为提高算法的实现效率,在MATLAB中对该算法进行整型化处理,产生采样率为512 MHz,信号为 $1:0.5:256$  MHz的线性调频信号。为分析方便,信号的频率与该分量的信号幅度相等,多相滤波器 $16 \times 8$ 阶,每通道64 MHz,定点化的无盲区信道化实验结果如图4所示。

由图4可以看出,对于线性调频测试信号,经过各个子信道化无盲区拼接后,形成的幅度响应基本反映了输入信号的特点,拼接后的幅度误差在2.5%以内,具有较高的精度,不存在个别线谱丢失的现象,满足全概率检测的要求。同时,在同等FFT点数的处理能力条件下,相对于整个频带单次FFT频谱分析,无盲区数字信道化( $D=8$ )拼接后全景谱的频率分辨率提高了4倍,借用数字信道化拼接技术,算法可以满足高采样率、有限FFT点数条件下高频率、分辨率应用场合,解决了单次FFT点数过低的问题。

### 2.2 实测混合信号

原始信号经由ADC对基带混合信号进行采样得到,采样率70 MHz,混合信号主要由BPSK、AM、QPSK、16QAM和窄带BPSK信号组成,多相滤波器 $16 \times 8$ 阶,每通道4.375 MHz,信道化实验结果如图5所示。

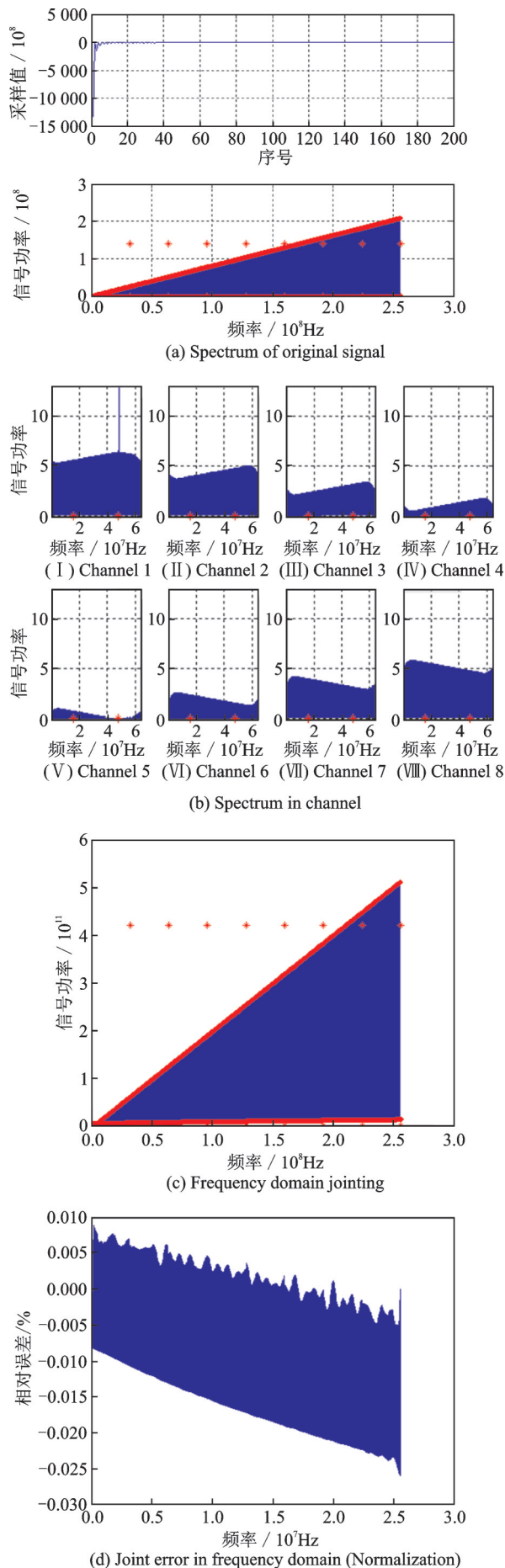


图4 无盲区信道化分析的结果

Fig.4 Result of digital channelization without blind zone

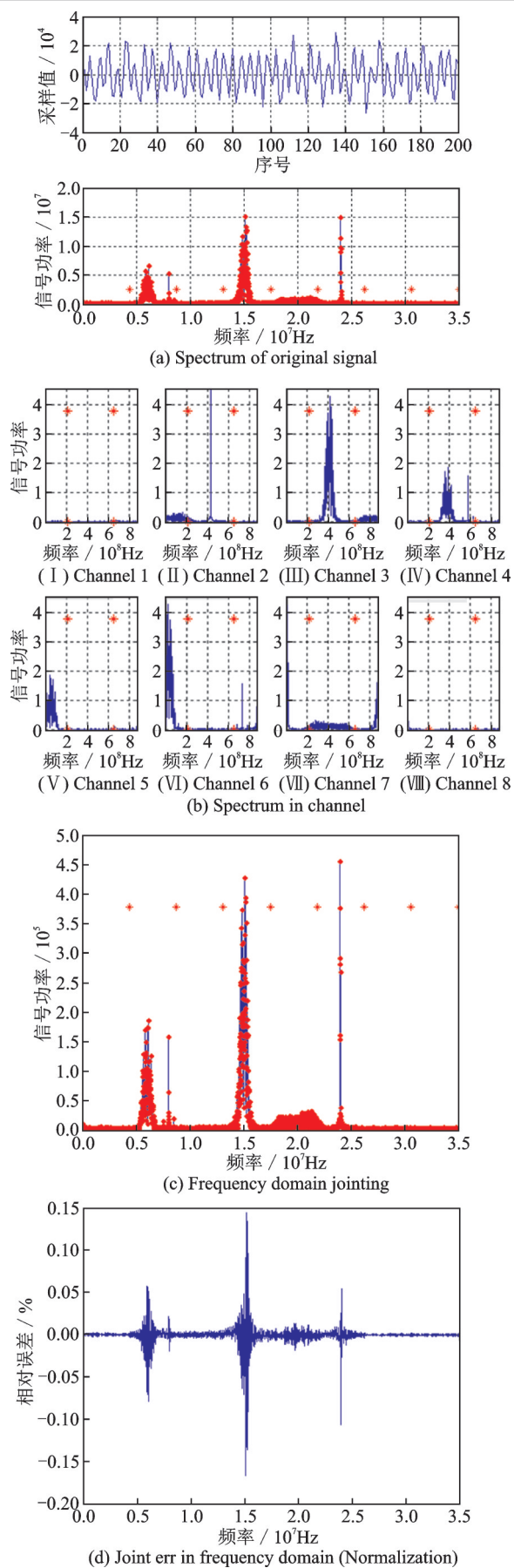


图5 实测信号的无盲区数字信道化

Fig.5 Result of actual signal digital channelization without blind zone

由图5可以看出,对于输入的实测信号,经整型数字信道化频域拼接后,其结果基本反映了原始信号的频域结构,其相对误差见图5(d)。需要说明的是,由于信号在频域分布并不均匀,而归一化以能量集中部分的最大值为基准,导致误差偏大的部分正处于信号能量集中部分。

### 3 结 论

本文研究了一种无盲区抗混叠的数字信道化高效算法,其采用了50%的信道重叠划分方法,解决了宽带信号频域全概率检测的问题;算法采用了DFT结构,降低了硬件实现的复杂度,解决了无盲区数字信道化的高效实现问题。信道化算法采用的信道化结构,在频域上对信号进行了预分选,降低了时域信号流密度和对数字处理器件的处理速度要求,可以直接工作在较低时钟上,降低了系统的处理速率压力。本文利用Matlab建立仿真模型,验证了模型的正确性,对A/D采样实测信号进行定点化后的算法仿真分析,结果表明,该算法满足非合作宽带信号频谱态势连续监测与检测的要求。

### 参考文献:

- [1] 周欣,吴瑛. 一种基于多相滤波的高效信道化算法研究及改进[J]. 信号处理,2008,24(1):45-48.  
ZHOU Xin,WU Ying. The research and improvement of a high efficient channelized algorithm based on poly-phase filter[J].Signal Processing,2008,24(1):45-48.
- [2] 陈海红,汪欣. 基于FPGA的宽带数字信道化接收机的设计[J]. 现代雷达,2009,31(12):73-76.  
CHEN Haihong,WANG Xin.A design method of digital channelized wideband receiver based on FPGA[J]. Modern Radar,2009,31(12):73-76.
- [3] JAMES T. 宽带数字接收机[M]. 杨小牛,陆安南,金飏,译. 北京:电子工业出版社,2002.  
JAMES T. Digital techniques for wideband receivers [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2002.
- [4] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2003.  
HU Guangshu. Digital signal processing [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University,2003.
- [5] 王甲峰,葛晓琦. 无盲区数字信道化实现方法[J]. 通信技术,2009,42(3):7-9,24.  
WANG Jiafeng,GE Xiaoqi.Realization of digital channelization without blind zone[J]. Communications Technology,2009,42(3):7-9,24.

- [6] 邹俊锋,王振宇,闫朋展. 数字信道化接收机高效结构的优化方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(7): 68-71.  
ZOU Junfeng, WANG Zhenyu, YAN Pengzhan. Optimization of channelized digital receiver [J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(7): 68-71.
- [7] 丁世谱,夏厚培. STFT 数字信道化的雷达脉冲参数测量改进算法[J]. 现代防御技术, 2017, 48(3): 133-138.  
DING Shipu, XIA Houpei. Improved algorithm of radar pulse parameter measurement based on STFT digital channelization[J]. Modern Defence Technology, 2017, 48(3): 133-138.
- [8] 何迪,文飞,应忍冬,等. 数字信道化器子信道滤波器技术研究[J]. 通信学报, 2017, 38(Z1): 53-57.  
HE Di, WEN Fei, YING Rendong, et al. Research of sub-channel filter technique in the digital channelization [J]. Journal on Communications, 2017, 38(Z1): 53-57.
- [9] 刘寅,黄秀琼,王亚涛. 波形对数字信道化接收机测频性能影响分析[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(10): 2531-2535.  
LIU Yin, HUANG Xiuqiong, WANG Yatao. Impact of waveforms on frequency measurement performance for digital channelized receivers [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(10): 2531-2535.
- [10] 张勇强,汤建龙. 基于数字信道化接收机的聚类分选算法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(2): 143-148.  
ZHANG Yongqiang, TANG Jianlong. Clustering sorting algorithm based on digital channelized receiver [J]. Journal of CAEIT, 2017, 12(2): 143-148.
- [11] 桂佑林,王本君. 数字信道化及虚假信号问题研究[J]. 现代雷达, 2016, 38(3): 23-27.  
GUI Youlin, WANG Benjun. A study on digital channelization and false signals [J]. Modern Radar, 2016, 38(3): 23-27.

(编辑:刘彦东)