

宽带数字信道化接收机综述

龚仕仙, 魏玺章, 黎 湘

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙, 410073)

摘 要: 宽带数字信道化接收机以其高性能在电子战和无线电通信中有着重要的运用. 本文基于复杂电磁环境下电子战的运用需求, 分析了信道化接收机系统的发展现状和趋势; 研究了目前的数字信道化接收机技术的主要系统结构及其发展趋势; 重点分析了信道化接收机技术的发展历程和发展趋势. 根据目前的信道化接收机系统和数字信道化接收机技术的现状可以看出, 数字信道化接收机发展的一个趋势是: 宽带数字化(大量子信道)和非均匀信道化接收机及动态信道化接收机.

关键词: 数字信道化接收机; 电子战; 发展趋势; 非均匀信道化接收机

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)05-0949-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.019

Review of Wideband Digital Channelized Receivers

GONG Shi-xian, WEI Xi-zhang, LI Xiang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Wideband digital channelized receivers have an important application in Electronic Warfare (EW) and wireless communication, especially in Electronic Intelligence systems (ELINT) and Radar Warning Receiver (RWR) systems. This paper introduces the channelized receiver systems and the structures of the channelized technique. And base on the analysis of the development history of the channelized Receivers, we can see that the channelized Receivers system trend towards wideband digital and the digital channelized technique trend towards nonuniform channelized to make channelized Receivers more suitable to the modern EW.

Key words: channelized receivers; electronic warfare (EW); development history; nonuniform channelized receiver

1 引言

电子战是现代信息化战争的重要组成部分, 对战争的胜负有着决定性作用. 接收机作为电子战中无线电信号接收的重要系统, 具有重要的研究价值, 但日益复杂的战场电磁环境对接收机的性能提出了更高的要求. 首先, 现代电子战中战争场景中同时存在着大量的无线传感器, 即存在着不同强弱的信号、不同调制形式信号、时域重叠的信号等, 使得接收机每秒接收到的脉冲数可达到百万个以上^[1,2], 且接收信号在频域的分布范围很广(雷达和通信系统的工作频率一般在 2 ~ 18GHz 的范围)^[3~5]; 其次, 在信息化战争条件下, 无线电传感器为了提高生存能力采用了多种方式提高抗截获和抗干扰能力, 如多收多发体制雷达可降低信号的功率, 提高抗截获能力^[6]; 频率捷变、脉宽捷变等信号体制提高抗干扰能力^[7,8]. 电子战接收机要适应如此复杂的电磁环境

必须具备以下性能: 大瞬时带宽、实时信号接收、大的动态范围、高灵敏度和频率分辨率、时域重叠信号的接收和处理^[9~11].

1.1 传统的宽带接收机体制

传统的宽带接收机体制有: 晶体视频接收机、瞬时测频接收机、超外差式接收机、信道化接收机、压缩接收机和布拉格盒式接收机, 文献[12]在对上述几种接收机的系统性能、对各种体制的信号的接收能力和优缺点进行了详细统计分析(表1).

通过表1的对比分析可以看出, 布拉格盒式接收机、压缩接收机和信道化接收机的整体性能很好, 但布拉格盒式接收机采用光学布拉格盒信号进行频谱分离, 系统的复杂度高、动态范围和灵敏度很低; 压缩接收机用色散延迟线把输入射频信号压缩成一窄带脉冲, 数据处理率很高, 而且信号压缩产生的旁瓣会影响系统的检测性能和丢失信号的脉内调制信息^[13~15]. 信道化接收

表 1 接收机性能对比

	瞬时带宽	频率分辨率	灵敏度	动态范围	抗干扰能力	可实现的接收频率范围(GHz)	重量和体积	成本
晶体视频接收机	很大	差	差	一般	差	0.5-40	小	低
瞬时测频接收机	很大	好	差	好	差	0.5-40	小	中等
超外差式接收机	一般	差	一般	一般	差	0.5-18	中等	中等
压缩接收机	大	好	很好	一般	好	0.5-8	中等	中等
布拉格盒式接收机	一般	好	好	差	好	0.5-4	小	低
信道化接收机	大	一般	好	好	好	0.5-60	很大	很高

机通过模拟或数字滤波器组对接收信号进行频域信道划分,可实现不同频率信号的分离,能接收时域重叠信号,具有高灵敏度和频率分辨率,截获概率接近 100%,选择性和抗干扰能力强,保真度与超外差接收机相近^[16,17],是目前唯一实用且满足电子战需求的宽带接收机结构^[18~21],主要的缺点是其结构复杂、体积大、系统重量大、功耗和成本高,一定程度上限制了其发展,然而随着 ADC、数字集成电路和数字信号处理技术的不断发展,使得接收机在不断的数字化,从而弥补了早期信道化接收机的缺点。

1.2 数字信道化接收机

上个世纪 70 年代国外已经开始进行信道化技术的研究,早期的信道化接收机的各部分都是由模拟器件组成,信道均衡性差,硬件消耗和体积随信道数目增加而急剧增加^[22]。随着 ADC 和集成电路技术的发展,上个世纪 90 年代数字接收机开始出现,信道化接收机的数字化逐渐成为信道化接收机的研究热点^[23~26]。到本世纪初,现代信息化战争的需求和软件无线电的发展促进了数字信道化接收机技术的研究。数字化是目前各种电子设备发展的必然趋势,具有良好的稳定性,能够完整的保存信号中的信息和够灵活的运用各种先进的数字信号处理技术^[27],且通过各种集成电路和芯片实现的数字电路减小了系统的成本、体积和功耗,因而未来电子战必然属于数字接收机^[28~30]。数字信道化接收机(图 1)结合了信道化和数字化的优点,既具有信道化接收机的高的综合性能,又能够通过数字化提高接收机的稳定性和灵活性,减少接收机的功率消耗、体积和成本,同时输出信号带宽小,降低了后端数据的处理速率。

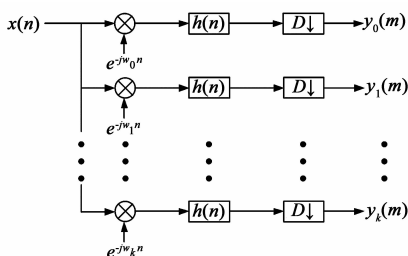


图 1 数字信道化接收机的一般机构

统的公开文献较少,相关研究有:美国空军研究院^[25,27,31-33]的 James B Y Tsui 等人研究了基于 FFT(Fast Frequency Transform)数字信道化、模拟下变频的中频数字信道化和 DFT(Discrete Frequency Transform)的瞬时测频数字信道化的接收机;美国海军研究院^[1]的 Cheng Ming-Jen 研究了数字 ESM(Electronic Support Measures)信道化接收机的互调失真;美国加利福尼亚大学^[34~39]的 Won Namgoong 等人进行了宽带中频数字信道化接收机技术研究及其信道误差分析;圣地亚哥州立大学^[40,41] Fredric J Harris 研究了基于 DFT 多相滤波结构的数字信道化接收机;西班牙马德里大学^[11,42] Lopez-Risueno G 等人研究了基于 FFT 和 STFT(Short-Time Fourier Transform)的数字信道化接收机;德国德累斯顿大学^[43]的 Hentschel T 对比分析了基于单通道、DFT 滤波器组和 Goertzel 滤波器组的数学信道化接收机的性能;新加坡南洋理工大学^[44~51]的 A P Vinod 等人研究了基于高效的数字非均匀滤波器组实现的数字信道化接收机;英国 RF 公司^[52,53]推出了多款面向无线通信的数字信道化内核,可实现大量子信道划分;HYPRES 公司^[54]为美国空军研制了一款采用超导电路实现的超宽带数字信道化接收机。

国内有关信道化接收机的研究起步比较晚,数字信道化接收机的相关研究在 2000 年后才有很大发展:成都电子科技大学^[2,14,15,55]张嵘、何伟等人进行了有关基于 FFT、树形结构和 WOLA(Weighted overlap-add)的数字信道化接收机的研究;北京理工大学雷达技术研究所^[56,57]研制了采用 FPGA 的基于多相滤波结构的数字信道化侦察接收系统;哈尔滨工程大学^[58~60]的张文旭、朱晓研究了无盲区的数字均匀信道化接收和动态信道化接收机结构;中国人民解放军信息工程大学^[61]的李冰分析了基于滤波器组的均匀信道化技术和非均匀信道化技术;国防科学技术大学^[62]李坡等人研究了数字信道化的一些基本结构并分析了其在信号侦察等环境中的应用;南京航空航天大学^[63]王旭东等人研制了基于 FPGA 的均匀数字信道化接收机;清华大学^[64]等研究人员也对数字信道化的一些基本结构进行了研究和分析。由于电子战和无线电通信的发展需求,数字信道化接收机也在不断的发展完善中,国内外已经有上

目前,国内外有关数字信道化接收机的电子战系

百篇相关学术论文和数十篇硕士、博士论文发表。

本文主要针对在电子战的应用需求,分析了目前基于信道化接收机的电子战系统的研究现状及其发展的趋势,研究了数字信道化接收机技术研究现状和其研究发展趋势,并对信道化接收机系统和数字信道化接收机技术的发展现状和趋势进行了总结。

2 信道化接收机系统的发展现状和趋势

根据国外相关报道,1981年美国就有信道化接收机专利^[22],1994年就有数字信道化接收机专利^[65],1997年和2001年又有两项关于信道化接收机专利^[24,66]。2005年,美国加利福尼亚大学的 Kyongsu Lee 和 Won Namgoong 教授研制的中频数字信道化接收机^[36]采用模拟混频器和低通滤波器进行下变频与信道划分,输入带宽可达 12.5GHz,通过 IQ 正交下变频和 ADC 时域交错采样技术对单路信道的采样率可达 2.5GHz。2007年 Ali Medi 和 Won Namgoong 研制的三通道中频数字信道

化接收机/发射机^[39]的输入频带为 3.25 ~ 4.75GHz,子信道的带宽为 500MHz,采样率为 1GHz,阻带衰减为 37dB,相邻信道隔离度为 47dB。

2007年, HYPRES 公司为美国空军研制的多波段多通道数字信道化接收机^[54](图 2)采用低温模拟电路技术、超导数字电路技术和半导体技术实现,其超导 ADC 采样时钟可达 40GHz,并通过两级信道划分实现信道化接收:第一级用数字下变频(DDC, Digital Down Convert)和数字抽取滤波器(DDF, Digital Decimation Filters)进行信道粗划分;第二级用 FPGA 数字信号处理电路进行信道细分和信号处理。该系统的一次实验中,ADC 的采样时钟为 20GHz,接收信号的频率为 33MHz 和 33.025MHz,子信道数可达 256 个,子信道带宽为 78.125MHz,实验结果证明该系统对这两个信号的信道化接收,并且能够将它们分辨,即该系统能够进行超宽带信道化接收且具有很高的频率分辨率。

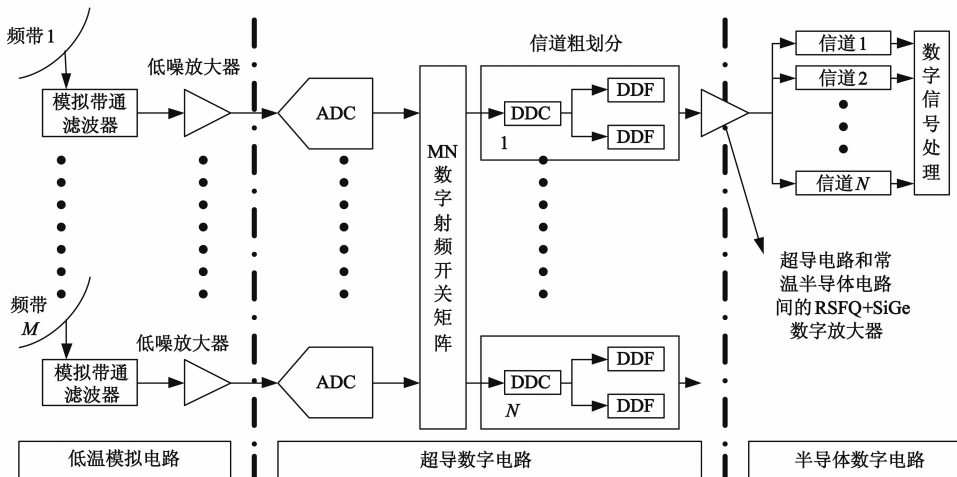


图2 多频带、多信道数字射频信道化接收机结构

英国的 RF 公司进行了大量关于无线通信的数字信道化接收机技术的研究,并研制了多款数字信道化接收机的内核:如基于 DDC 的 64 通道数字信道化接收机内核、基于多相 DFT 的数字均匀信道化接收机、基于 PFT (Pipelined Frequency Transform) 和 TPFT (Tunable Pipelined Frequency Transform) 的带宽及滤波器特性可调的数字信道化接收机内核,能在单片 FPGA 内实现 1024 个信道,子信道带宽在 100K 至 400KHz^[52,53,67]。

根据文献^[30]和^[68]在 2011 年的调查显示,目前国外很多先进的雷达预警、电子支援和电子情报侦察系统采用了信道化接收机,如:美国 Sierra Nevada 公司的 SS-505 和 SS-2005 系统;德国的 ASIS(Air Surveillance Intelligence System)系统;法国的 CATS(Compact Airborne Threat Surveyor)系统等;文献^[69]统计的 2011 年国外无线通信情报侦察接收机和侧向接收的系统:美国 TCI 公

司的 802C 和 803C 等高频宽带侧向接收机;美国 SwRI 研制的 MPB-475 和 WBM-625 等通信侦察和侧向系统;Raytheon 公司的 Model 1240 TITAN、Model 570X SIREN 和 Model 680 等也采用信道化接收。这些采用信道化接收接收机系统中大部分实现了部分数字化,少量系统已实现全数字化,其中具有代表性有 Raytheon(Applied Signal Technology)公司的 PEGASUS 电子支援和情报侦察系统^[70]、Raytheon 公司的 AN/ALR-67(V)3^[71]和 ALR-69A(V)数字雷达预警接收机^[72]。PEGASUS 采用宽带数字信道化接收机,工作频率为 VHF-Ku(30MHz ~ 18GHz),瞬时带宽为 500MHz,灵敏度为 -95dBm,动态范围为 75dB,可检测和识别复杂环境下的弱信号和新型调制信号,可提供辐射源的被动侦察、精确识别和定位,具有自动工作模式和人工操作模式,系统体积、重量和功率消耗小,可适用于飞机平台,系统易于升级;AN/ALR-67(V)3

通过 22 个并联滤波器组来实现数字信道化接收,工作频率为:0.65-18GHz,28-40GHz,具有高稳定性、可靠性抗干扰性能,能在稠密的信号环境中截获雷达信号,主要运用于美国海军作战飞机的雷达预警;ALR-69A(V)的工作频率为 0.5~20GHz,可有效抑制敌防空雷达系统,具有高灵敏度、宽的频谱和空间覆盖范围,能适应稠密的信号环境,具有良好的灵活性和扩展性,主要面向于美国空军作战平台,是世界上第一部全数字信道化雷达预警接收机系统。

国内一些研究所和高校也进行了数字信道化接收机系统的研究和设计,但主要为利用专业信道化内核或可编程 FPGA 实现:武汉大学^[73]和北京理工大学^[74]利用 INTERSIL 公司的四通道可编程数字下变频器(HSP50216)实现信道化接收;2009 年,国防科学技术大学王永明等人利用 FPGA 实现了基于 DFT 多相滤波结构的数字信道化接收机,其有 16 个均匀划分的子信道^[75];2010 年,北京理工大学雷达技术研究所也利用 FPGA 实现了基于的 DFT 多相滤波结构的数字信道化接收机系统,输入带宽为 1.5GHz,具有 64 个的均匀划分分子信道,该成果已应用于侦察卫星上进行宽带信号侦察^[57]。从目前的信道化接收系统及其应用可以看出信道化接收机在电子战中具有重要的运用价值,其通过多通道的信号接收为各种电子战系统提供大的工作带宽,通过对接收机系统的数字化来提高系统的稳定性、可靠性和灵活性,降低系统的成本、重量和体积,因此信道化接收系统发展趋势必然是宽带数字信道化。

3 数字信道化接收机技术研究现状和趋势

数字信道化接收机技术的核心为数字信道化滤波器组的结构设计,根据其采用的实现结构可分为:基于单通道的数字信道化接收机,采用了简单的多部接收机并联形成多个信道接收的思想建立信道化接收机;基于 FFT 的数字信道化接收机,利用 FFT 或 STFT 实现信号频域信道划分;基于 WOLA 或多相滤波的数字信道化接收机,利用加权数字滤波或多相滤波高效结构来实现信道化接收;其他结构的数字信道化接收机,提高信道化接收机的灵活性和计算效率。

3.1 信道化接收机技术的发展历程

上个世纪七十年代电子战的发展使得对电子战接收机性能需求不断提高:高灵敏度、高截获概率、大动态范围、高分辨率^[9]、时域重叠信号处理能力等。信道化接收机拥有晶体视频接收机和瞬时测频接收机的高信号截获概率,具有超外插接收机的高灵敏度、高分辨率,还有同时到达信号的处理能力^[76],因此成为电子战接收机的热门研究技术,同时 SAW(Surface Acoustic Waves)、BAW(Bulk Acoustic Wave)、MSW(Magneto

Static Wave)和 AO(Acousto-Optic)等技术的发展也促进了信道化接收机的发展^[77,78]。最近几十年,随着 ADC、数字信号处理、微处理芯片和集成电路技术的飞速发展,使得信道化接收机的实现更为容易,且体积和复杂度不断降低,数字信道化接收机已经电子情报侦察、电子对抗、电子反对抗和电子支援等现代电子战中发挥着重要作用,而且软件无线电的发展也促进了信道化接收机技术的研究和发展。

通过本文 1.2 节的分析可得到信道化接收机的发展历程如表 2 所示,可以看出国外有关信道化接收机研究起步早,已经大量运用于各种电子战系统,而国内只到 2000 年以后才有相关信道化接收机研究,通过大量科研人员的努力,与国外技术的差距不断缩小,但由于在硬件水平上还很落后,数字信道化系统的研制水平远落后国外。

表 2 信道化接收机的发展历程

时间	研究的主要内容	系统的特点
1970~1980	模拟信道化接收机 ^[13,79,80] ,包括基于 SAW、BAW、MSW 和 AO 的信道化接收机。	可接收同时到达信号,具有很好的接收性能,但系统结构复杂,体积大,造价昂贵,信道均衡性和一致性差。
1990~2000	数字信道化接收机 ^[24,25] ,包括:基于 FFT 滤波器组;加窗 FFT 滤波器组的信道化接收机;数字信道化瞬时测频接收机。	可实现大量子信道的接收,稳定性高,但采用均匀信道划分方式,存在接收盲区,对一般信号的接收能力适应性差。
2000~2010	非均匀数字信道化接收机;基于 PFT 技术的 PFT 信道化和 TPFT 信道化接收机 ^[81] ;宽带中频数字信道化接收机 ^[34,37,82,83] ;树形结构信道化接收机 ^[44] 。	信道非均匀划分,接收机带宽增加,但信道划分方式固定,不适应复杂电磁环境下电子战的需求。
2010—	全数字宽带信道化接收机;非均匀信道化接收机;并且有关研究涉及到动态信道化接收机。	适应日益复杂电磁环境的应用需求,信道化接收机的性能和灵活性不断提高。

3.2 数字信道化接收机的系统结构

(1) 基于单通道的数字信道化接收机

基于单通道的信道化接收机采用多部接收机并联形成多信道接收的思想构建多通道数字信道化接收,其每个子信道具有完整的接收机结构,主要分为:(1)中频数字信道化接收,用模拟混频器和滤波器实现信道划分,然后进行采样和数字信号处理,降低了系统对 ADC 的要求,但系统的稳定性和灵活性差^[32,33,37,84];(2)基于 DDC 的数字信道化接收机,直接对射频信号采样后通过数字混频和滤波实现信道划分,能充分发挥数字电路和数字信号处理的优势^[85],但系统接收带宽和

动态范围受限于 ADC 的性能. 本文主要分析基于 DDC 的数字信道化接收机, 其主要包括: 数控振荡器 (Numerical Control Oscillator, NCO), 级联梳状抽取滤波器或半带抽取滤波器、可编程 FIR 滤波器等, 可根据其提取的子信道信号的带宽大小分为: 宽带数字下变频技术和窄带数字下变频技术. 窄带数字下变频的子信道信号带宽窄, 数据的抽样率比宽带数字下变频大, 工程上一般采用级联的多级滤波器实现^[86].

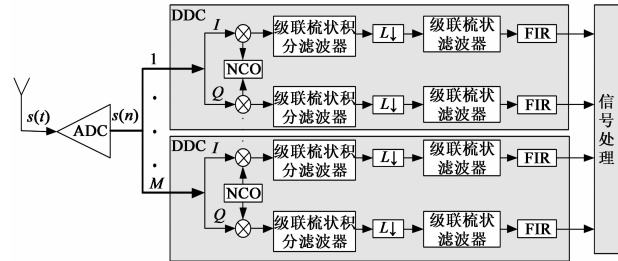


图3 基于DDC的窄带数字信道化接收机

基于单通道的数字信道化接收机的子信道相互独立, 因此子信道可独立设计, 灵活性高, 但系统的硬件资源使用效率低, 当所需的子信道数目很多时, 系统的硬件资源消耗大, 且结构复杂, 因此基于单通道的数字信道化接收机运用于只需要少量子信道的系统中.

(2) 基于 FFT 的数字信道化接收机

快速傅里叶变换 (FFT) 是最常用的频率信道化技术, 利用 FFT 可建立频域滤波器组来实现频域信道分离术^[1, 10], 但其频域滤波器组的频率响应为 Sinc 函数, 阻带衰减低, 因此可通过时域加窗的方法提高滤波器组性能, 即基于 STFT 的信道化接收机^[11, 60, 63], 离散 STFT 为:

$$\text{STFT}_x^{(w)}(n, k) = \sum_{m=n}^{n+(L-1)} x(m)w(m-n) \cdot \exp(-j2\pi km/L) \quad (1)$$

基于 FFT 的数字信道化结构运算效率很高且系统结构简单, 可实现均匀分布的、有大量子信道的接收机, 且不需要抽样率转换系统即可实现输入输出信号采样率的转换, 但其频域滤波器的性能有限, 频域信道划分的灵活性不足, 即子信道的位置和带宽不能够灵活设置.

(3) 基于 WOLA 和多相 DFT 的数字信道化接收机

数字信道化接收机的基本结构中, 设输入信号为 $x(n)$, 信道输出为 $y_k(m)$, 子信道数为 K , $h(n)$ 为滤波器, L 为滤波器的长度, 信号的降采样为 D , 每个信道的位置和带宽在频域是均匀分布的, 即: $\omega_k = \frac{2\pi}{K}$, 令, $r = n - mD$, $\tilde{x}_m(r) = h(-r)x(r + mD)$, 则可以利用周期性对 $\tilde{x}_m(r)$ 先分组求和再做 DFT:

$$\tilde{y}_k(m) = \sum_{r=0}^{K-1} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{x}_m(r + lK) e^{-j\omega_k r} \quad (2)$$

该过程即为基于 WOLA 的信道化接收机结构^[53, 59, 87] (图 4), 其滤波器长度不受限制, 因而滤波器组的性能比基于 FFT 的信道化结构好, 同时也不需要额外的抽样率转换系统即可实现信号抽样率的灵活转换, 但系统的计算量和复杂度增加.

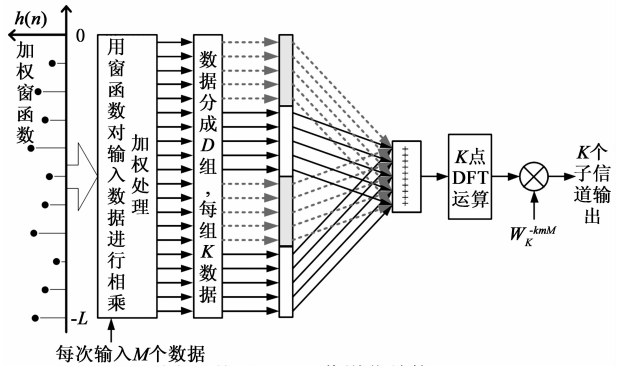


图4 基于WOLA信道化结构

当 $K = D$ 时, 令 $p_i(n) = h(nK - i)$, ($q = -\infty \rightarrow +\infty$; $p = 0, 2, \dots, K-1$), 式可以简化为:

$$y_k(m) = \sum_{p=0}^{K-1} [h_p(n) * x_p(n)] e^{-j\omega_k p} \quad (3)$$

该运算的实现即为多相 DFT 滤波结构 (图 5)^[25, 56]:

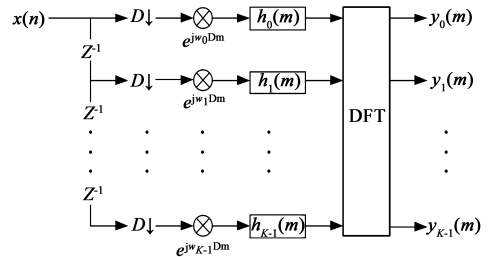


图5 数字信道化的基于DFT的多相滤波结构

基于多相 DFT 的信道化结构为基于 WOLA 的信道化接收机的一种特殊情况, 其实现采用了多相滤波结构从而提高运算效率, 相对于数字下变频滤波器结构, 硬件和功率消耗更小, 在系统对数据的采样率没有特殊要求时一般采用多相 DFT 结构实现信道化^[43]. 基于 WOLA 或多相 DFT 的数字信道化结构只能均匀划分信道才能满足 DFT 计算的条件, 即系统信道的灵活差, 在对未知参数信号的接收时, 信号的位置可能处于两个信道的中间点或带宽有可能大于信道带宽, 导致一个信号同时出现在多个信道, 不能够满足对未知参数信号的侦察要求.

(4) 其他数字信道化接收机结构

上文介绍的数字信道化接收机的三种基本结构运用早且技术成熟, 但它们在系统灵活性和高效性上各有优缺点. 电子战和无线通信中的电磁信号在频域的分布是不均匀的, 因而必须根据信号位置和带宽对接收频带进行信道划分, 三种基本结构很难满足信号脉

冲密度大,频域分布范围广,频域位置和带宽非均匀分布等应用需求,因而相关学者提出了其他结构的信道化接收机。

基于树型结构的数字信道化接收机结构:基于树形结构的信道化侦察接收机结构(图 6)^[44,55,88],采用多级级联滤波器组的方式实现信道化分,各级的滤波器组之间是相互独立的,其主要的优点提高了系统的灵活性,即各级的信道划分的滤波器组既可共用又可以互相独立,如果共用则只需要一个只有少量信道的高性能滤波器组就可以实现具有大量信道的数字信道化接收,降低了数字滤波器组的复杂度;如果相互独立,则可以根据接收信号设计滤波器组,可实现系统信道的非均匀划分。缺点为:增加了系统的复杂度和延迟,没有解决未知参数信号接收时的跨信道问题。

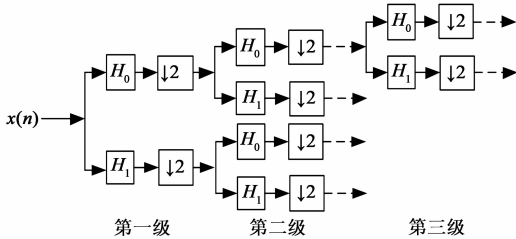


图6 基于树形结构的信道化接收机结构

基于 PFT/TPFT 的数字信道化接收机结构:英国 RF Engines 的创始人和 CEO John Lillington 根据 PFT 提出了基于 PFT 和 TPFT 的信道化接收机结构^[52,53,81,89],其与树形结构一样采用多级级联实现,但各级的信道化分是通过 PFT 技术和 TPFT 技术实现,主要是面向无线通信信号的接收。该系统优点和树形数字信道化结构相似,基于 PFT 的数字信道化结构通过 PFT 技术可以实现信道的非均匀划分,而基于 TPFT 的数字信道化结构通过可调 PFT 技术能够实现信道位置的精确设置,从而

确保无线通讯信号的准确接收。系统的缺点为复杂度和延迟增加,子信道带宽小,不适应电子战的运用环境。

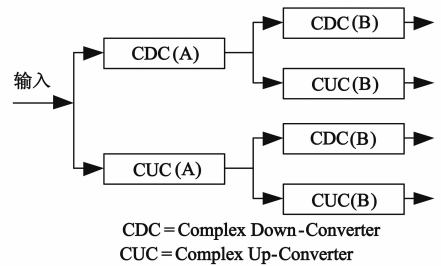


图7 基于PFT和TPFT结构的信道化接收

基于非均匀滤波器组的数字信道化接收机结构^[61]:基于分均匀滤波器组的数字信道化接收机结构主要利用 FRM(Frequency Response Masking)和 CDFB(Coefficient Decimation Filter Bank)技术设计信道非均匀划分的滤波器组来实现数字信道化接收^[49,50,90,91],提高了系统的计算效率。其主要优点为:信道化分方式为非均匀数字信道化;缺点为:非均匀滤波器组需要根据接收信号的参数进行设计,即需要接收信号的先验信息。

基于分析和综合滤波器组的数字信道化接收机:基于分析和综合滤波器组的数字信道化接收机^[59~61,92],利用分析滤波器组对信号频谱进行均匀划分,然后利用综合滤波器合并相邻信道,实现信道的非均匀划分(图 8),该结构的关键工作为满足信号重构精度的滤波器组的优化设计。目前主要运用的滤波器有基于可完全重构(Perfect Reconstruction, NP)或近似完全重构(Nearly Perfect Reconstruction, NNP)的余弦调制滤波器组(Cosine-Modulated Filter Bank, CMFB)、正弦调制滤波器组(Sine-Modulated Filter Bank, SMFB)、复指数调制滤波器组(Complex-Exponential Modulation Filter bank, CEMFB)、调制 DFT 滤波器组(MDFTFB)和 DFT 滤波器组(DFTFB)。

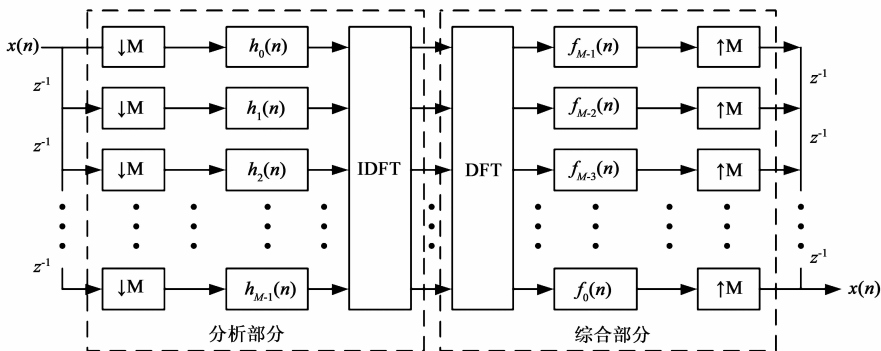


图8 基于多相滤波结构的分析和综合滤波器组

非均匀信道化接收在对复杂电磁环境中未知参数的信号进行接收时,信号位置和带宽的随意性还是会

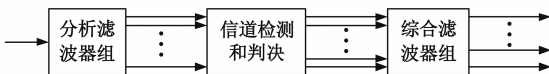


图9 数字动态信道化接收机

导致信号可能同时出现在多个信道,影响后端信号的参数估计。因而国内有关学者在 Wajih A. Abu-Al-Saud 等人提出的可完全重构复指数调制滤波器(PR-CEMFB)的非均匀数字信道化技术^[93]研究的基础上进行了数字信道化接收机的动态信道划分技术的研究。

数字信道化接收机的动态信道划分技术就是在数字均匀信道接收机或非均匀信道化接收结构的基础上,通过对数字滤波器组的优化设计,使滤波器组满足重构条件,经过信道的检测和判决,进行信道合并或实时修改综合滤波器参数实现信道的动态划分,主要体现在均匀信道化接收或非均匀信道化接收后的信号处理^[94],但目前动态信道化接收机的信道检测和判决,及根据判决结果进行信道重构方式研究还不够深入^[59~62],且国外还没有关于数字信道化接收机的动态信道划分的报道,因此动态信道化接收机存在的问题

和具体实现还有待进一步的研究,

3.3 数字信道化接收机技术的发展趋势

通过上节对数字信道化接收机结构的分析,可以得到数字信道化接收机的各种结构的对比分析如表 3 所示,从该表可以看出数字信道化接收机技术的发展是伴随着需求的发展而发展的,早期信道化接收机主要为了通过多通道提高接收机的工作带宽,解决同时到达信号的接收,因而采用基于单通道的信道化接收机结构,基于 FFT 的信道化接收机结构、基于 WOLA 或多相 DFT 的信道化接收机结构。

表 3 数字信道化接收机的性能对比

数字信道化结构	子信道数	划分方式	系统特点	运用环境
基于单通道的数字信道化接收机	少	任意设置	灵活性高,利用效率低	无线通信和电子侦察
基于 FFT 的数字信道化接收机	很多	均匀划分	灵活性低,计算效率高,相邻信道隔离度低	电子侦察
基于 WOLA 和多相 DFT 的数字信道化接收机	多	均匀划分	灵活性低,计算效率高	电子侦察
基于树型结构的数字信道化接收机	多	非均匀划分	灵活性低,系统延迟增加	无线通信
基于 PFT/TPFT 的数字信道化接收机	多	非均匀划分	灵活性低,计算效率高	无线通信
基于非均匀滤波器组的数字信道化接收机	一般	非均匀划分	灵活性低,计算效率高	无线通信
基于分析和综合滤波器组的数字信道化接收机	多	均匀或非均匀划分	灵活性高,计算量和延迟增加	无线通信和电子侦察

随着运用环境和需求的发展,为了进一步提高数字信道化接收机的灵活性,解决数字信道化接收机技术在跨信道和频域位置和带宽非均匀分布的信号接收的问题,数字信道化接收机技术的发展趋势必然为:

(1) 数字信道化接收机的非均匀信道划分技术. 针对目前的运用环境需求可知,接收机接收的信号带宽为频域位置一般为非均匀分布,虽然目前已经有很多非均匀的信道化接收系统,但这些结构都是针对通信系统的,在电子战的复杂电磁环境下的非均匀信道化接收还将是数字信道化接收机的研究热点.

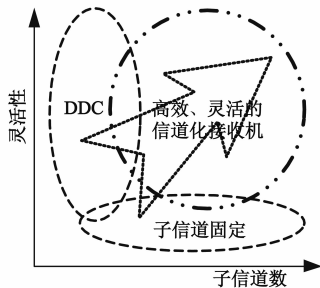


图10 数字信道化接收机的发展需求

(2) 数字信道化接收机的动态信道划分技术. 目前研究的大量非均匀数字信道化接收机技术虽然能够很好的实现对不同带宽信号的接收,但需要根据接收信号的先验信息进行非均匀的信道设计和划分,能够适应无线多标准无线通信的需求,但复杂电磁环境下的电子战中不可能获得信号先验信息,非均匀信道划分技术也不能适应需求,即数字信道化接收机的灵活性还需要进一步的提高.

4 总结

信息化条件下的电子战对战争具有决定性的作用,接收机作为各种电子战系统的重要设备是研究的一个热点. 数字信道化接收机以其高综合性能在各种电子战系统中发挥着重要作用,也必然是接收机研究的重点,信道化接收机经过三十多年时间的发展,已经取得很大的进步,在电子战和无线电通信领域有着重要运用,但随着电子战的发展,信道化接收机的宽带数字化和灵活性还有待进一步的提高才能适应需求,即还存在一些需要解决的问题. 本文对信道化接收机的研究背景进行了详细分析,分析了目前的一些信道化接收机系统的技术实现和性能,研究了数字信道化接收机技术的结构和发展历程. 通过对信道化接收机系统的发展历程和现状的分析,可以很容易得到信道化接收机系统的发展趋势为宽带数字化. 通过对数字信道化接收机技术的研究现状和发展历程可以看出,随着无线通信中的多标准通信信号的接收和电子战中未知参数信号的接收的需求的促进,数字信道化接收机技术必然不断的向非均匀化信道接收及可根据输入信号自适应调整信道划分方式的方向发展.

参考文献

- [1] Cheng M. Intermodulation in channelized digital ESM receivers [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School. 1996.
 - [2] 张嵘. 宽带高灵敏度数字接收机[D]. 四川成都: 电子科技大学, 2002.
- Zhang Rong. Wideband high sensitivity digital receiver [D].

- Chengdu, Sichuan: University of Electronic science and technology of China, 2002. (in Chinese)
- [3] James B. Tsui. Digital Techniques for Wideband Receivers [M]. Raleigh, North Carolina: SciTech Publishing Inc. 2004.
- [4] Devlin L M, Pearson G A, Dearn A W, et al. A 2-18GHz ESM receiver front-end [A]. 32nd European Microwave Conference [C]. Milan. 2002. 1 - 4.
- [5] Stolarski Z. A wideband receiver module of the ESM system [A]. 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON-2004 [C]. Warsaw, Poland. 2004. 924 - 927.
- [6] Phillip E Pace. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar [M]. Norwood, MA: Artech House. 2009.
- [7] Richard G Wiley. The Interception and Analysis of Radar Signals [M]. Norwood, MA: Artech House. 2006.
- [8] R M E M. van Heijster. Universal precision ESM receiver based on software defined radio technology [A]. 8th European Conference on Wireless Technology [C]. Paris, France. 2005. 419 - 422.
- [9] Jonathan Schuenger, Garmatyuk D. Deception jamming modeling in radar sensor networks [A]. IEEE Military Communications Conference [C]. San Diego. 2008. 1 - 7.
- [10] Scafe G. Techniques employed in ESM receiving systems for signal detection, frequency measurement and direction finding in the 1 GHz to 20 GHz frequency range [A]. 4th Microwave Conference [C]. European. 1974. 151.
- [11] Lopez-Risueno G, Grajal J, Sanz-Osorio A. Digital channelized receiver based on time-frequency analysis for signal interception [J]. IEEE Transactions on AES. 2005, 41 (3): 879 - 898.
- [12] Naval Air Warfare Center. Electronic warfare and radar systems engineering handbook [R]. Washington, D. C. 1999.
- [13] James Bao-Yen Tsui. Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications [M]. New York: JOHN WILEY & SONS. 1986.
- [14] 何伟. 新型宽带数字接收机——短数据高速测频研究 [D]. 四川成都: 电子科技大学. 2003.
He Wei. A dew wide-band digital receiver——high-speed frequency estimation with short-length data [D]. Chengdu, Sichuan: University of Electronic science and technology of china. 2003. (in Chinese)
- [15] 王洪. 宽带数字接收机关键技术研究及系统实现 [D]. 四川成都: 电子科技大学, 2007.
Wang Hong. Research on wideband digital receiver and system implementation [D]. Chengdu, Sichuan: University of Electronic science and technology of china, 2007. (in Chinese)
- [16] Phillip E. Pace. Advanced Techniques for Digital Receivers [M]. Norwood, MA: Artech House. 2000.
- [17] 陈伯孝, 陈多芳, 张红梅, 等. 双/多基地综合脉冲孔径地波雷达的信道接收技术研究 [J]. 电子学报, 2006, 34 (9): 1566 - 1569.
- Chen Bai-xiao, Chen Duo-fang, Zhang Hong-mei, Zhang Shou-hong. Channelized receiver for Bi/Multi-static synthetic impulse and aperture ground-wave radar [J]. Acta Electronica Sinica. 2006, 34(9): 1566 - 1569. (in Chinese)
- [18] Anthony E Spezio. Electronic warfare systems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 633 - 644.
- [19] Frank B Gross, Kenny Chen. Comparison of detectability of traditional pulsed and spread spectrum radar waveforms in classic passive receivers [J]. IEEE Transactions on AES, 2005, 41(2): 746 - 751.
- [20] Ardoino R, Megna A. LPI Radar detection: SNR performances for a dual channel Cross-Correlation based ESM Receiver [A]. European Radar Conference [C]. Rome, Italy. 2009. 113 - 116.
- [21] 张永顺, 董宁宁, 赵国庆. 雷达电子战原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [22] Donald E Bailey N P C. Channelized receiver system [P]. US98883. 1981 - 11 - 17.
- [23] Donald E Maurer, Roxaneh Chamlou, Kimberly O. Genovese. Signal processing algorithms for electronic combat receiver applications [J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1997, 18 (1): 69 - 78.
- [24] Timothy W Fields, Daniel R Zahirniak, David L. Sharpin. hardware efficient digital channelized receiver [P]. US006085077A. 2000 - 07 - 04.
- [25] Daniel R Zaffirmiak, David L. Sharpin, Timothy W. Fields. A hardware-efficient, multi rate, digital channelized receiver architecture [J]. IEEE Transactions on AES, 1998, 34(1): 137 - 152.
- [26] Bryan Thomas Burke. Subband channelized radar detection and bandwidth estimation [D]. Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1998.
- [27] James B Y Tsui, James P Stephens. Digital microwave receiver technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 699 - 705.
- [28] David L Adamy. Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation [M]. Norwood, MA: Artech House, 2003.
- [29] Manz B. Radar warning receivers——the digital revolution [J]. Journal of Electronic Defense, 2010, 33(10): 68.
- [30] Holt O. Technology survey——elint receiver technology [J]. Journal of Electronic Defense, 2011, 34(3): 48.
- [31] Scott M Rodrigue, Jerry L Bash, Mark G Haenni. Next generation broadband digital receiver technology [A]. The 15th Annual AESS/IEEE Dayton Section Symposium [C]. Fairborn, OH. 1998. 13 - 20.
- [32] Mims W H, Temple M A, Mills R F, et al. Spectral sensing

- ultra wideband signals using a down-converting channelized receiver[A]. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Baltimore, MD USA. 2005. 706 – 709.
- [33] Willie H Mims. Wideband signal detection using a down-converting channelized receiver[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2006.
- [34] Won Namgoong. A channelized digital ultrawideband receiver [J]. IEEE Transactions on wireless communications, 2003, 2 (3): 502 – 510.
- [35] L Feng, W Namgoong. An oversampled channelized UWB receiver[A]. International Workshop on Joint UWBST & IWUWBS[C]. Kyoto, Japan. 2004. 410 – 414.
- [36] Kyongsu Lee, Won namgoong. A 0.25 μm CMOS 3b 12.5 GS/s frequency channelized receiver for serial-links [A]. IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Maine. 2005. 336 – 337.
- [37] W Namgoong, L. Feng. Digitizing of UWB signals based on frequency channelization[A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. Kobe, Japan. 2005. 61 – 64.
- [38] Feng L. Frequency channelized receiver for ultra-wideband and serial-link systems[D]. California: University of Southern California, 2006.
- [39] Medi A, Namgoong W. A 108/98 pJ/b 1Gbps fully integrated interference tolerant frequency channelized UWB transmitter/receiver[A]. 2007 Symposium on VLSI Circuits, Digest of Technical Papers[C]. Honolulu, Hawaii. 2007. 58 – 59.
- [40] Harris F J, Dick C, Rice M. Digital receivers and transmitters using polyphase filter banks for wireless communications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2003, 51(4): 1395 – 1412.
- [41] Harris F, Dick C, Chen X, et al. Wideband 160-channel polyphase filter bank cable TV channeliser [J]. IET Signal Processing, 2011, 5(3): 325 – 332.
- [42] Miguel A Sanchez, Mario Garrido, Marisa Lopez-Vallejo, et al. Implementing FFT-based digital channelized receivers on FPGA platforms [J]. IEEE Transactions on AES. 2008, 44 (4): 1561 – 1585.
- [43] Hentschel T. Channelization for software defined base-stations [J]. Annals of Telecommunications. 2002, 57(5 – 6): 386 – 420.
- [44] A P Vinod, E M-K Lai, A B Premkiimar, et al. A reconfigurable multi-standard channelizer using QMF trees for software radio receivers[A]. The 14th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication Proceedings[C]. IEEE Press. 2003. 119 – 123.
- [45] R Mahesh, A P Vinod, B Y Tan, et al. A tree-structured non-uniform filter bank for multi-standard wireless receivers[A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. Taipei, Taiwan. 2009. 213 – 216.
- [46] R Mahesh, A P Vinod, Edmund M-K. Lai, et al. Filter bank channelizers for multi-standard software defined radio receivers[J]. Journal of signal processing systems. 2011. 157 – 171.
- [47] Zhao Chang, A P Vinod, P K Meher. Reconfigurable architectures for low complexity software radio channelizers using hybrid filter banks[A]. 10th IEEE International Conference on communication systems[C]. Singapore. 2006. 1 – 5.
- [48] M D Lin, A P Vinod, et al. A new flexible filter bank for low complexity spectrum sensing in cognitive radios[J]. Journal of signal processing systems for signal image and video technology. 2011, 62(2): 205 – 215.
- [49] R Mahesh, A P Vinod. Reconfigurable frequency response masking filters for software radio channelization [J]. IEEE Transactions on Circuits and System II-Express Brief, 2008, 55(3): 274 – 278.
- [50] Mahesh R, Vinod A P. Low complexity flexible filter banks for uniform and non-uniform channelisation in software radios using coefficient decimation[J]. IET Circuits Devices & Systems, 2011, 5(3): 232-242.
- [51] Michael N, Vinod A P, Moy C, et al. Design of multistandard channelization accelerators for software defined radio handsets [J]. IEEE Transactions on signal processing. 2011, 59(10): 4767-4780.
- [52] John Lillington. So many callers, so little time: PFT engine slices wideband frequency channels[J]. Wireless Systems Design. 2003. 39 – 40, 42, 44 – 46.
- [53] John Lillington. Comparison of wideband channelization architectures[A]. International Signal Processing Conference[C]. Dallas. 2003.
- [54] Deepnarayan Gupta, Timur V Filippov, Alexander F Kirichenko. Digital channelizing radio frequency receiver [J]. IEEE Transactions on applied superconductivity. 2007, 17(2): 430 – 437.
- [55] Hong Wang, Youxin Lu, Wang X. Tree structure for channelized digital receivers[A]. International Conference on Radar, Shanghai[C]. China. 2006. 1 – 3.
- [56] Shichao X, Guoman L, Meiguo G. Design and implementation of digital channelized receiver in multi-FPGA[A]. ICISE[C]. Nanjing, China. 2009. 178 – 181.
- [57] Xu S, Liu G, Gao M, et al. Design and Implementation of a 1.5Gbps digital channelized receiver[A]. 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science (ICIECS)[C]. Wuhan, China. 2010. 1 – 4.
- [58] Wenxu Z. Design and simulation of wideband channelized receiver[A]. Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing (IITA-GRS) [C]. Qingdao, China. 2010. 575 – 578.

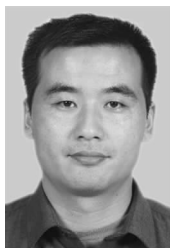
- [59] 张文旭. 被动雷达导引头数字信道化接收机研究及实现 [D]. 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工程大学. 2009.
Zhang Wen-xun. Research and implementation of digital channelized receiver in passive radar seeker [D]. Haerbin, Heilongjiang: Harbin Engineering University. 2009. (in Chinese)
- [60] 朱晓. 新型宽带数字接收机及脉冲压缩雷达信号参数估计算法研究 [D]. 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工程大学. 2008.
Zhu Xiao. A new wideband digital receiver and parameter estimation of pulse compression radar signal [D]. Haerbin, Heilongjiang: Harbin Engineering University. 2008. (in Chinese)
- [61] 李冰. 软件无线电中的信道化技术研究 [D]. 江苏南京: 中国人民解放军信息工程大学. 2007.
Li Bing. Research on channelization techniques for software defined radio [D]. Nanjing, Jiangsu: PLA Information Engineering University. 2007. (in Chinese)
- [62] 李 坡. 宽带数字侦察接收系统关键技术研究及实现 [D]. 湖南长沙: 国防科学技术大学. 2010.
Li Po. Research and realization on key techniques of wideband digital reconnaissance receiving system [D]. Changsha, Hunan: National University of Defense Technology. 2010. (in Chinese)
- [63] 王旭东. 基于 FPGA 的雷达信号侦察数字接收机关键技术研究 [D]. 江苏南京: 南京航空航天大学. 2007.
Wang Xu-dong. Key technologies of radar signal reconnaissance digital receiver based on FPGA [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. 2007. (in Chinese)
- [64] 阳志明, 周坡, 曹志刚. 一种基于复指数调制精确重构滤波的宽带星载数字信道化器 [J]. 电子与信息学报. 2010, 32(11): 2554 - 2559.
Yang Zhi-ming, Zhou Po, Cao Zhi-gang. CEM PRFB-based digital channelizer for broadband satellite communications [J]. Journal of Electronics and Information Technology. 2010, 32(11): 2554 - 2559. (in Chinese)
- [65] James B Tsui. Digital Channelized IFM Receiver [P]. US005499391A. 1996 - 03 - 12.
- [66] Edward Rumsey Oates, John Paul Johnston, Tom Bell Chamberlain. Channelized Receiver system [P]. US007006474B2. 2006 - 02 - 28.
- [67] Channeliser cores [EB/OL]. <http://www.rfel.com/channeliser-cores.aspx>. 2012.
- [68] Ollie Holt. Technology survey——RWR and radar ESM systems [J]. Journal of Electronic Defense. 2011, 03: 48 - 55.
- [69] Ollie Holt. Technology survey——a sampling of comint and DF receivers [J]. Journal of Electronic Defense. 2011, 11: 69 - 80.
- [70] PEGASUS tactical ESM/ELINT systems [EB/OL]. <http://www.appsig.com/PEGASUS>——Tactical-ESM/ELINT-Systems. 2012.
- [71] AN/ALR-67(V)3 radar warning receiver [EB/OL]. <http://www.raytheon.com/capabilities/products/alr67/index.html>. 2012.
- [72] AN/ALR-69A(V) radar warning receiver [EB/OL]. <http://www.raytheon.com/capabilities/products/alr69/index.html>. 2012.
- [73] 万显荣, 柯亨玉, 杨子杰. HSP50216 在高频地波雷达数字 IF 接收机中的应用 [J]. 现代雷达. 2003, 25(11): 50 - 53.
Wan Xian-rong, Ke Heng-yu, Yang Zi-jie. Application of HSP50216 in digital if receiver for HFCWR [J]. Modern Radar. 2003, 25(11): 50 - 53. (in Chinese)
- [74] 李炯亮, 吴嗣亮. HSP50216 在数字中频接收机中的应用 [J]. 电视技术. 2002, 42(3): 32 - 34.
Li Jiong-liang Wu Si-liang. Application of HSP50216 in digital if receiver [J]. Telecommunication Engineering. 2002, 42(3): 32 - 34. (in Chinese)
- [75] 王永明, 王世练, 张尔扬. 1.2GSPS 数字信道化接收机的设计与实现 [J]. 系统工程与电子技术. 2009, 31(6): 1324 - 1327.
Wang Yong-ming, Wang Shi-lian, Zhang Er-yang. Design and implementation of a 1.2GSPS digital channelized receiver [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(6): 1324 - 1327. (in Chinese)
- [76] Hofmann C B, Baron A R. Wideband ESM receiving systems (II) [J]. Microwave Journal, 1981, 24: 57 - 61.
- [77] T Higgins. Channelized receivers come of age [J]. Microwave Systems News. 1981. 80 - 91.
- [78] D E Allen. Channelised receiver——a viable solution for EW and ESM systems [J]. IEE Proceedings, Part F——Communications, Radar and Signal Processing. 1982, 129(3): 172-179.
- [79] Jeffrey H Collins, Peter M Grant. Review of current and future components for electronic warfare receivers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1981, 29(5): 395-403.
- [80] Gordon Wood Anderson, Denis C Webb, Anthony E Spezio, et al. Advanced channelization technology for RF, microwave, and millimeterwave applications [J]. Proceedings of the IEEE. 1991, 73(3): 355 - 388.
- [81] Lillington J. The tuneable pipelined frequency transform——a new filter-bank technique [EB/OL]. <http://www.eetimes.com/design/analog-design/4017942/The-Tuneable-Pipelined-Frequency-Transform-151-A-New-Filter-Bank-Technique>. 2002.
- [82] Feng L, Nampong W. An oversampled channelized UWB receiver with transmitted reference modulation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(6): 1497 - 1505.
- [83] Feng L, Namgoong W. Oversampled channelized receiver for transmitted reference UWB system in the presence of narrow-

- band interference[J]. 2004 IEEE Workshop on signal processing systems design and implementation proceedings, 2004. 48 – 52.
- [84] Lie J P, See C M, Ng B P. Ultra wideband direction finding using digital channelization receiver architecture [J]. IEEE Communications letters, 2006, 10(2): 85 – 87.
- [85] Deepnarayan Gupta, Timur V. Filippov, Alexander F. Kirichenko. Digital channelizing radio frequency receiver [J]. IEEE Transactions on applied superconductivity, 2007, 17(2): 430 – 437.
- [86] Lee. Pucker. Channelization techniques for software defined radio [EB/OL]. <http://www.spectrumsignal.com/channeltech2niques/channelization-paper-SDR-forum.pdf>, 2003.
- [87] Wang H, Lu Y X, Wang X G. Channelized receiver with WOLA filterbank [A]. International Conference on Radar [C]. Shanghai, China. 2006. 1791 – 1793.
- [88] Narendar M, Vinod A P, Madhukumar A S, et al. A tree-structured DFT filter bank based spectrum sensor for estimation of radio channel edge frequencies in military wideband receivers [A]. 10th International Conference on Information Sciences Signal Processing and their Applications [C]. Kuala Lumpur, Malaysia. 2010. 534 – 537.
- [89] John Lillington. Slice and Dice Chunks of Radio Spectrum [EB/OL]. http://www.rfel.com/download/P04027%20-%20WSD0257_Slice_and_dice.pdf. 2003.
- [90] Mahesh R, Vinod A P. An area-efficient non-uniform filter bank for low overhead reconfiguration of multi-standard software radio channelizers [J]. Journal of signal processing systems for signal image and video technology. 2011, 64(3): 413 – 428.
- [91] Mahesh R, Vinod A P. Reconfigurable low area complexity filter bank architecture based on frequency response masking for nonuniform channelization in software radio receivers [J]. IEEE Transactions on AES. 2011, 47(2): 1241 – 1255.
- [92] 张子敬, 焦李成. M 带余弦调制滤波器组的设计 [J]. 电子学报, 2001, 29(1): 84 – 86.
- Zhang Zi-jing, Jiao Li-cheng. D sign of M-band cosine-modulated filter banks [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(1): 84 – 86. (in Chinese)
- [93] Wajih A. Abu-Al-Saud, Gordon L. Stüber. Efficient wideband channelizer for software radio systems using modulated PR filterbanks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing. 2004, 52(10): 2807 – 2820.
- [94] 李冰, 郑谨, 葛临东. 基于 NPR 调制滤波器组的动态信道化滤波 [J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1178 – 1182.
- LI Bing, Zheng Jin, Ge Lin-dong. Dynamic channelization based on NPR modulated filter banks [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1178 – 1182. (in Chinese)

作者简介



龚仕仙 (通讯作者) 男, 1984 年 10 月出生
于湖北随州. 2007 年 6 月、2009 年 12 月毕业于国防科技大学电子对抗专业获学士学位、信息与通信工程专业获硕士学位, 现为国防科技大学信息与通信工程专业在读博士生. 主要研究方向为雷达目标识别、雷达信号处理、电子对抗.
E-mail: gsx263642571@gmail.com



魏玺章 男, 1976 年 4 月出生
于河北吴桥. 2002 年 12 月毕业于国防科技大学信息与通信工程专业获博士学位. 现为国防科技大学电子科学与工程学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为雷达目标识别、雷达信号处理.
E-mail: liweier@nudt.edu.cn

黎湘 男, 1967 年生, 博士, 教授. 1989 年于西安电子科技大学电子工程专业获学士学位, 1995 年和 1998 年于国防科学技术大学分别获得通信与信息系统专业硕士学位和博士学位. 已发表学术论文四十余篇. 目前主要从事精确制导、雷达信息处理、非线性信息处理等领域的研究工作.