

频谱感知接收机宽带自适应射频保护

赵志远¹, 丁国如², 朱义勇¹, 周新¹, 章力¹, 朱蕾³

(1. 国防科技大学信息通信学院, 武汉 430010; 2. 陆军工程大学通信工程学院, 南京 210007; 3. 国防科技大学第63研究所, 南京 210007)

摘要: 射频电调滤波和射频干扰抵消一直是射频干扰抑制领域的研究热点, 两项关键技术的结合被认为是一种提高接收机抗已方合作干扰能力的射频保护方案。本文系统梳理现有射频保护电路的优缺点, 经过调研对射频电调滤波和射频干扰抵消的前沿技术进行归纳总结, 针对频谱感知接收机抗未知非合作干扰的应用需求, 初步提出基于感知主路与抵消辅路的频谱感知接收机宽带自适应射频保护架构, 并对重难点问题进行了探讨。

关键词: 频谱感知接收机; 射频保护需求; 宽带自适应射频保护; 射频电调滤波; 射频干扰抵消

中图分类号: TN405.95 **文献标志码:** A

Wideband Adaptive RF Protection for Spectrum Sensing Receivers

ZHAO Zhiyuan¹, DING Guoru², ZHU Yiyong¹, ZHOU Xin¹, ZHANG Li¹, ZHU Lei³

(1. College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Wuhan 430010, China; 2. College of Communications Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210007, China; 3. The 63rd Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Radio frequency (RF) tunable filtering and RF interference cancellation have always been the focus of RF interference suppression research. The combination of these two key technologies is considered to be a RF protection scheme to improve anti-known cooperative interference ability for receivers. This paper systematically sorts out the merits and drawbacks of the available RF protection circuits and summarizes the advanced technologies of RF tunable filtering and RF interference cancellation after investigation. Aiming at application requirements of anti-unknown non-cooperative interference, based on the main path of RF spectrum sensing and the auxiliary path of RF interference cancellation, the architecture of wideband adaptive RF protection (WARP) for spectrum sensing receivers is preliminarily proposed, and the difficult problems are discussed lastly.

Key words: spectrum sensing receiver; radio frequency (RF) protection requirement; wideband adaptive RF protection (WARP); RF tunable filtering; RF interference cancellation

引言

美军已将电磁频谱列为第六作战域, 并提出电磁频谱机动战、认知电子战等新型作战概念。同时,

电磁频谱作为我军新质战斗力生成的关键领域,夺取战场频谱资源使用权和控制权可为战场信息获取、传输提供可靠载体。战场电磁环境感知是电磁频谱作战中观察-调整-决策-行动(Observe-orient-decide-act, OODA)环路的首要环节,具有十分重要的作用。

当前,侦干一体^[1]、通感一体^[2]、雷达通信一体^[3-4]等所谓电磁空间一体化系统的发射机和接收机之间存在不能同时同频全双工工作的缺陷^[5],半双工分频工作造成频谱资源日趋紧张^[6],分时工作造成设备感知电磁环境的实时性较差。然而战场复杂电磁环境呈现出强对抗、大动态、高密度和难预测等特点,尤其是在强弱信号同时共存的条件下,对电磁频谱感知设备的强信号抑制、弱信号接收等能力提出更高要求。因此,亟需研究宽带自适应射频保护技术,在灵敏接收弱信号的前提下通过自适应控制实现选择性抑制强信号,从而避免接收机进入饱和和工作状态,确保宽带频谱感知设备在复杂对抗的电磁环境下能够正确感知战场频谱信息。

1 射频保护概述

射频保护是处于频谱共生环境中接收机射频域的干扰抑制能力。对于通信或雷达等无线电设备,射频保护比是为使接收机输出端的有用信号达到规定的接收质量,在规定条件下所确定的接收机输入端有用信号与无用信号的最小比值^[7]。对于频谱感知或侦测设备,射频保护比是在正确感知或侦测前提下接收机输入端的弱信号与强信号的最小比值,通常以最小功率比来表示。为防止频谱感知接收机因强信号而出现饱和甚至阻塞效应,除了空间和频率隔离技术外,接收机射频前端对输入强信号实现幅度衰减的射频保护技术手段包括衰减、限幅、滤波和抵消等。

1.1 衰减

衰减器是一种能量损耗性射频/微波器件,用于减小射频信号强度。在测量接收机中,为避免后续电路出现过载,强信号必须经过衰减。衰减器的衰减量取决于第一混频器和后续电路的动态范围,混频器输入信号电平要控制在其1 dB压缩点以下,否则会产生非线性产物,造成虚假信号^[8]。为实现射频信号电平幅度的自动控制,通常使用程控衰减器,主要包括电调衰减器(衰减量连续)和步进衰减器(衰减量离散)。

电调衰减器是在外加电流(或电压)的控制下,利用阻值受电流控制而改变衰减量的射频器件,控制与测量^[9]输入的射频信号,具有衰减量连续可调、低成本、小尺寸、易集成和低功耗等优点。一般由阻抗匹配电路、电流控制电路及二极管组成的T型或 π 型可调电阻网络,二极管包括场效应管和PIN二极管等^[10],其中PIN二极管具有承受功率大、低损耗的优点,特别是寄生电参数小,更具优势。步进衰减器是一种可编程控制不同衰减量的射频器件,通过射频开关选通多个衰减单元的不同组合,实现对输入信号的步进衰减且不易发生畸变^[11]。一般由控制电路、电磁继电器组件、连接器和多个衰减单元等级联组成,具有工作频带宽、端口驻波比小且衰减精度高等优点。其中,MOS管、PIN二极管和射频微机电系统开关可用作高速射频开关^[12-13],衰减芯片、薄膜电阻等可用作衰减单元。

衰减器是实验室频谱分析设备射频前端必不可少的器件,能够提高测量接收机的最大输入功率电平,具有宽带射频衰减、改善阻抗匹配、减小信号耦合等重要作用。由于具有频率选择性的衰减器难以实现可重构动态频率且衰减范围不够大^[10],将具有静态频率选择性的宽带衰减器作为频谱感知接收机前端的射频保护器件,在抑制某窄带强信号的同时会导致接收机扫描频段内底噪整段抬高,造成灵敏度降低而无法正确感知该频带内的弱信号。

1.2 限幅

限幅器是一种能按限定范围削平信号电压波幅的器件。限幅器(硬限幅)在接收机射频前端的主

要作用是保护低噪声放大器,以防止强信号或大功率信号进入系统时低噪声放大器进入饱和状态甚至被损坏,同时对弱信号或小功率信号仅出现较小的插损^[13-14]。限幅器实现形式通常有两种:(1)分立式,例如采用PIN二极管混合电路实现,其特点是体积大,功率容量大,插入损耗大且工作频率较低。(2)集成式,例如采用GaAs单片实现,具有体积小、插入损耗小、工作频率高等优点,但功率容量较小。根据限幅机理,通常有反射型限幅器和吸收型限幅器^[15-16]。反射型限幅器可看作一个受输入信号功率控制的可变电阻。当输入功率很小时,限幅器二极管等效电路中结电容并联于信号链路,其很大的交流阻抗带来的插入损耗很小;当输入功率很大时,限幅器二极管阻抗急剧下降造成阻抗失配,使输入信号的大部分功率被反射,只有小部分功率通过限幅器进入后级,从而实现限幅作用。但是,反射型限幅器的驻波比恶化明显造成功率容量受限,因此结合正交混合耦合器实现吸收型限幅器(平衡结构),以改善驻波比,提高功率容量。

工程实践中,在通信或雷达接收机前端加入限幅器能够有效保护后级电路免受大功率信号的破坏。但将其作为频谱感知接收机前端的射频保护器件,在强信号输入条件下将呈现非线性响应^[17],输出会包含强信号的各次谐波分量及交调产物,严重影响电磁信号的侦测质量,尤其是调幅信号将出现严重失真,导致接收机在感知频段内强弱信号共存时的总体灵敏度降低。

1.3 滤波

滤波器是一种选频器件,能使信号中的特定频率成分通过,同时选择性衰减其他频率成分。测量接收机中通常使用的模拟滤波器包括射频滤波器和中频滤波器,主要用于抑制谐波和杂散等无用信号,有助于提高接收信号的信噪比,进而提高接收灵敏度。射频滤波器是频带滤波器,也称预选器,主要功能是频率范围的选通和镜像频率的抑制。中频滤波器是信道滤波器,主要功能是特定频道的选通、带外无用信号的抑制、模数转换器(Analog-to-digital converter, ADC)之前的抗混叠。根据滤波特性是否可调谐,模拟滤波器分为静态(不可调)滤波器和动态(电可调)滤波器。

针对特定频段,选用尺寸、品质因数合理的元器件或谐振器,例如LC、声表面波、微带和腔体等谐振结构^[18-20],根据所要实现的滤波特性及其技术指标,采用基于插入损耗的滤波器网络综合法进行静态滤波器设计^[21],以实现低插损、高选择性、高带外抑制和小型化等目标。在静态或定频滤波器基础上,通过合理设计可变电抗谐振器、级间耦合和宽带输入/输出匹配电路,可以实现中心频率或带宽等传输特性电可调的动态滤波器设计^[22-23],电调形式包括谐振器机械形变实现可调,例如加入调谐螺栓、电机旋转谐振盘等^[24-25];谐振器加载可变电抗元件实现可调,例如变容二极管、开关电容/电感阵列等^[26-28];衬底、介质材料电参数变化实现可调,例如铁氧体、压电材料等^[29-30]。

采用静态滤波,仅固定使用数字接收机的一小部分带宽,能够实现良好的灵敏度。若将其作为频谱感知接收机中预选滤波器和中频滤波器,则难以充分利用接收机潜在可用带宽资源。另外,跳频通信系统的接收机可以采用动态滤波躲避强干扰,但对于需要侦测有意瞄准式或宽带阻塞式强干扰的频谱感知接收机,此时强信号进入电调滤波器的通带内会失去抑制作用,超出接收机动态范围后将无法正确感知该频段或频段的频谱信息。

1.4 抵消

射频干扰抵消器是在射频域产生与干扰(强信号)相位相反的模拟信号,在干扰(强信号)进入射频前端电路之前与其进行功率合成实现反相抵消的器件^[31]。当外界不存在使接收机进入饱和或阻塞的强信号时,射频干扰抵消器不工作;当外界存在使接收机进入饱和或阻塞的强信号时,射频干扰抵消器自动抵消强信号,防止低噪声放大器、混频器和模数转换器等组件进入饱和,以保证接收机和同址发射机在同一个频段内可以同时正常工作。

强信号经直接或间接耦合方式感测后进入接收机射频前端,随即进行射频干扰抵消。根据模拟域抵消电路结构的不同,射频干扰抵消包括幅相控制、单层或多层正交矢量合成,及基于二者的多抽头结构等设计方法^[32-36]。基于幅相控制的射频干扰抵消器通常由电调衰减器、移相器、延时器、放大器及误差控制器等组成,对移相精度和幅度控制要求非常高。为降低高精度宽带移相器的造价成本,通常采用正交矢量合成等效移相的射频干扰抵消器,一般由正交耦合器、电调衰减器、延时器、放大器和自适应控制器等组成。为提高宽带强信号的射频干扰抵消性能,单抽头结构采用宽时延变化的延时电路生成非线性群时延,以匹配宽带信号各种时延组合的形状^[35]。对于真实无线环境中的多径反射,采用多抽头结构逼近实际多径信道响应,抽头数量取决于干扰抵消比、抵消带宽以及抵消信号的重建精度等^[34]。

目前,射频干扰抵消技术主要用于抑制同时、同频收发系统之间存在的辐射自干扰,尚未见其用于解决频谱感知接收机易受强信号影响进入饱和状态的问题。而且,同时同频收发信机与频谱感知接收机对于射频干扰抵消比的需求不同,前者需要将有害干扰抵消至接收机底噪附近,即辐射自干扰抵消,实现抗扰保通;后者则将有害强信号的幅度抵消至接收机无失真动态范围以内,实现准确测量。

2 频谱感知接收机射频保护需求

在强对抗电磁环境中,保护频谱感知接收机不受有意、无意强干扰的影响对于实现认知电子战至关重要,当前电子战接收机(20 MHz~18 GHz)缺乏在有害射频信号到达接收机前端敏感器件前对其进行有效抑制的手段^[37]。针对有害强射频信号,采用单一的射频保护技术,宽带频谱感知接收机难以解决嵌入式感测、选择性衰减、自适应抵消、大动态范围等问题。

2.1 嵌入式感测需求

频谱感知接收机要实现宽带自适应射频保护,除了感知接收的主通道外,必须具备有害射频信号感测的辅助通道,为防止主通道进入饱和状态提供预警、判断、决策和控制信息。辅助通道的有害射频信号嵌入式感测器件的尺寸应尽可能小,像声音传感器采集音频噪声一样采集外界环境中超过感知主通道最大输入功率电平的强信号,通过处理后检测其工作频点、信号带宽和幅度,并识别其调制方式和工作方式。嵌入式感测将向闭环控制模块提供输入以实现闭环调谐,闭环控制模块将根据环境和/或外部刺激来调整射频电调滤波电路和射频干扰抵消电路。嵌入式感测包括诸如测量射频电调滤波器输入或输出端口甚至射频干扰抵消器内部节点参数。在器件端口或内部节点使用仪器设备进行测试,如网络分析仪、频谱分析仪或示波器,不能视为嵌入式感测。

2.2 可重构滤波需求

通过静态预选滤波能够防止工作频段外的强信号到达宽带接收机的低声噪放大器,以及采用自动增益控制(中频放大器与衰减器相配合)可以充分利用系统带宽并避免ADC进入饱和状态,在牺牲弱信号检测灵敏度的前提下提高测量动态范围,但静态滤波无法抑制进入宽带频谱感知接收机感知频段内的强信号。潜在解决方案包括:(1)使用射频可重构滤波器作为频带预选器或者可重构信道选择器,以被动方式躲避确保强信号位于带外;(2)在频带滤波的基础上使用射频电调陷波器,将进入射频前端的带内强信号衰减至可承受范围。频谱感知接收机射频前端的可重构滤波器需能够自动重新配置滤波特性以动态适应外界电磁环境,同时不降低接收机灵敏度,且调谐范围足够宽,即可重构滤波器调谐比足够大。大调谐比可重构滤波器(带通/带阻)设计的挑战包括:(1)中心频率、带宽和传输零点等全可调;(2)如何在宽频率调谐范围和高选择性的前提下,实现电调滤波-陷波的配合,以实现选择性衰减带外强信号的同时能够低损耗接收带内弱信号。

2.3 自适应抵消需求

除了天线隔离外,当强信号进入接收机频带内时,加装衰减器或宽带陷波器会造成接收机动态范围大幅下降,而加局限幅器则会产生严重的非线性。对于感知频带内出现窄带强信号的情况,采用窄带陷波的方法可以起到干扰抑制作用,但接收机射频前端陷波器会将干扰信号及其相邻的有用信号都抑制掉,造成有用信号频谱的部分损失,且陷波深度不便于调控。若感知频带内出现宽带强信号,陷波器将不再适用。因此,必须采用带宽和功率自适应的射频干扰抵消方法,以主动方式抑制隔离器泄露的发射信号或同址发射机的辐射信号。射频干扰抵消器重建的抵消信号带宽要与外界强信号带宽保持一致,抵消信号强度需根据外界强信号的变化而不断调整,即具备自适应干扰抵消能力。抵消比需要达到的目标是使强信号幅度抵消至频谱感知接收机最大输入功率电平以下,在保持动态范围的前提下确保接收弱信号的灵敏度最优。对于宽带射频干扰抵消,射频干扰抵消器必须能够匹配收发两个天线端口间辐射自干扰信道的传递函数。

2.4 大动态范围需求

接收机动态范围是同时测量的最大信号幅度和最小信号幅度的比值。通常动态范围的下限等于最小中频带宽所对应的平均噪声功率,受系统的噪声系数影响;其上限通常由第一级混频器的输入1 dB压缩点及内部程控衰减器的衰减量所决定。过去,由于受ADC带宽的限制,数字接收机一度只能是窄带接收机。然而电子战接收机既要感知雷达信号也要感知通信信号,随着5G/6G技术的发展,信号带宽越来越宽。当前ADC技术已经可实现超1 GHz的瞬时带宽,有效位数达14~16位,宽带数字接收机已成为主流。但宽带数字接收机的动态范围受限于射频链路,当周边出现强电磁干扰时,进入ADC的信号幅度过大,超出了限幅水平进入饱和状态而无法正常工作。首先,与窄带ADC相比,宽带ADC的可用输入电压摆幅通常更小,因此动态范围也更小。其次,随着带宽的增加,会观察到更多信号,这就意味着进入ADC的电压摆幅更大,会对宽带数字接收机的无失真动态范围提出更高要求。

3 宽带自适应射频保护技术发展现状

美军发现宽带数字接收机缺乏可以在强信号到达接收机敏感器件前帮助其抑制有害干扰的射频前端。2020年1月,美国国防部高级研究计划局(Defense advanced research projects agency, DARPA)正式发布“宽带自适应射频保护(Wideband adaptive RF protection, WARP)”项目需求,寻求开发宽带自适应滤波和干扰消除电路创新方案,选择性衰减干扰并保护宽带数字接收机不至于进入饱和。目前,英国BAE系统公司已获得价值500万美元的项目合同。该项目重点关注电子战增强技术,改善电磁频谱的自适应控制,在使盟军能够自由行动的同时具有拒止对手的优势。同时,L3Harris公司与DARPA签订了一份价值720万美元的WARP项目合同,该项目要求开发宽带自适应射频滤波器和干扰抵消器,以便在拥挤和对抗环境中使用软件无线电。本文重点针对射频电调滤波和射频干扰抵消等技术的研究现状和发展动态进行调查分析。

3.1 射频电调滤波技术发展现状

宽带数字接收机对集成化和可重构化提出了更高需求,针对基于平面集成的变容二极管、PIN二极管或者射频微机电系统开关变容阵列等加载的微带谐振器结构,已设计出很多可变电容加载的平面电调滤波器来自动重新配置传输响应,包括中心频率、带宽和传输零点等。为实现低损耗、小型化和高线性等更优的滤波性能,众多国内外学者正关注频率调谐范围拓展、可调且输入无反射、滤波类型可重配置等关键技术^[38-40]。

3.1.1 频率调谐范围拓展

通过压控变容二极管对滤波器的中心频率实现快速调节,这种电调滤波器易集成、易加工且实用,例如变容二极管加载开口环、梳状线及其变型结构的微带谐振器,但频率调谐范围受限于半导体变容二极管的容值变化范围和品质因数,因此研究工作主要聚焦于在给定容值变化范围的前提下,调整优化传输线谐振器结构以拓宽频率调谐范围^[41]。传统拓宽频率调谐范围的方法是采用短传输线($<\lambda/4$)作为可变电抗谐振器设计电调滤波器^[42],以及采用电调滤波器组堆叠的方式通过开关选通实现多频段拼接^[43]。文献^[44]通过在梳状线终端加载可变电抗 LC 串联谐振器实现电调滤波器的频率调谐范围拓宽。文献^[45-46]采用变容二极管加载阶跃阻抗谐振器及其缺陷地等效结构,能够实现宽调谐范围电调滤波器设计,通过理论计算阶跃阻抗线长度比的最优值以获得调谐比的最大值。文献^[47]通过高通-低通电调滤波器级联的方式,实现超宽带(调谐比达到 7.8)频率调谐范围覆盖。图 1 给出了几种典型的宽频率调谐范围电调滤波器。

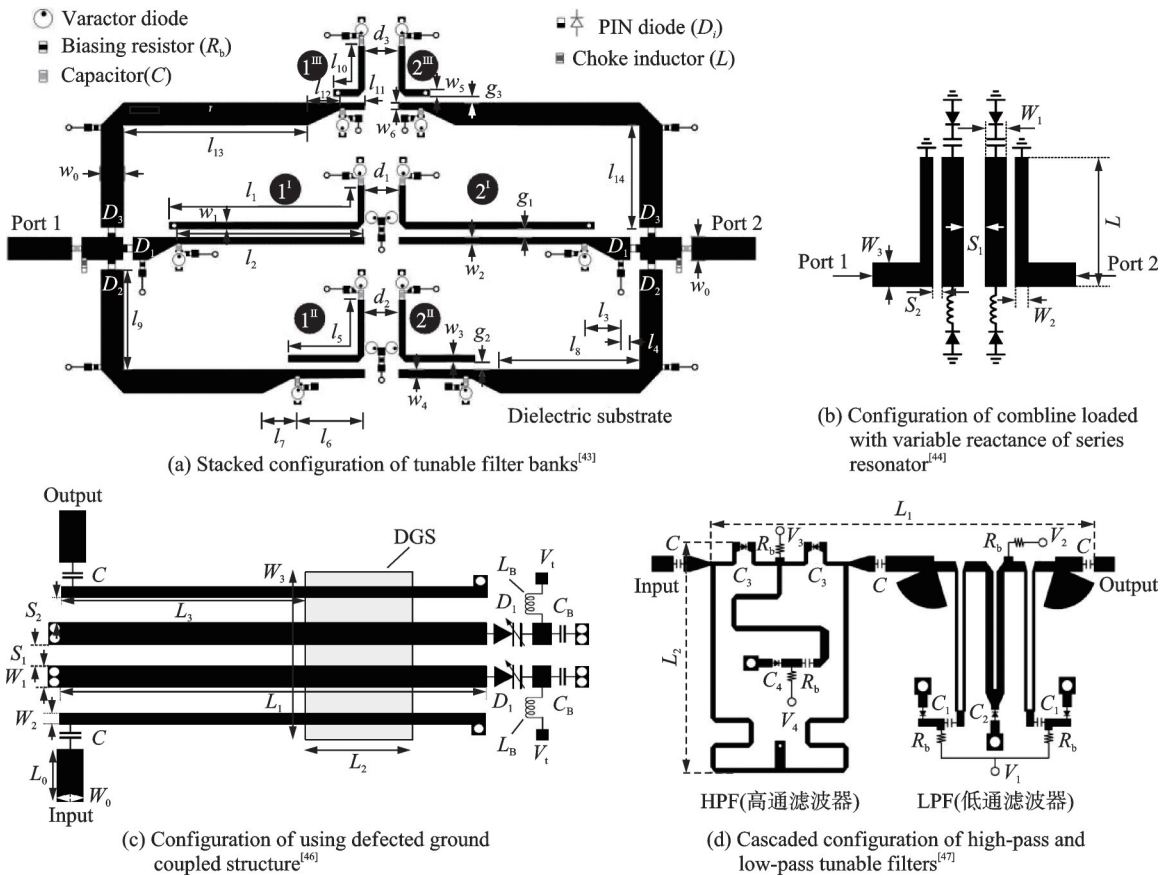


图 1 典型的宽频率调谐范围电调滤波器

Fig.1 Representative tunable filters with wide tuning range

3.1.2 可调且输入无反射

传统滤波器的通带满足阻抗匹配条件以实现带内有有用信号的传输,阻带满足阻抗失配条件,通过反射实现带外无用信号的抑制。在一些应用场景中,可重构滤波器输入端口的反射信号会对前级器件产生影响。为解决这一问题,可调且输入无反射滤波器或者吸收型滤波器应运而生。输入无反射,即

输入的射频信号在阻带直接耗散而不是反射回输入端,可以消除无用反射信号与外界信号之间的交叉调制,便于减少隔离器的使用进而减小系统的尺寸。目前实现输入无反射滤波器的方法主要包括:(1)通过设计奇偶模等效电路,使得奇模电路反射系数与偶模电路反射系数等幅反相^[48],实现反射系数为0;(2)通过正交/定向耦合器与反射式滤波器组合构成吸收式滤波器^[49]; (3)在可重构滤波器输入/输出端口加载吸收网络,例如加载带阻滤波器与耗散电阻的串联结构^[50],使得带外信号被电阻所吸收耗散。当前无反射电调滤波器的研究热点聚焦于提升无反射带宽和通带/阻带数量及性能^[51-52]。图2给出了两种典型的输入无反射电调滤波器。

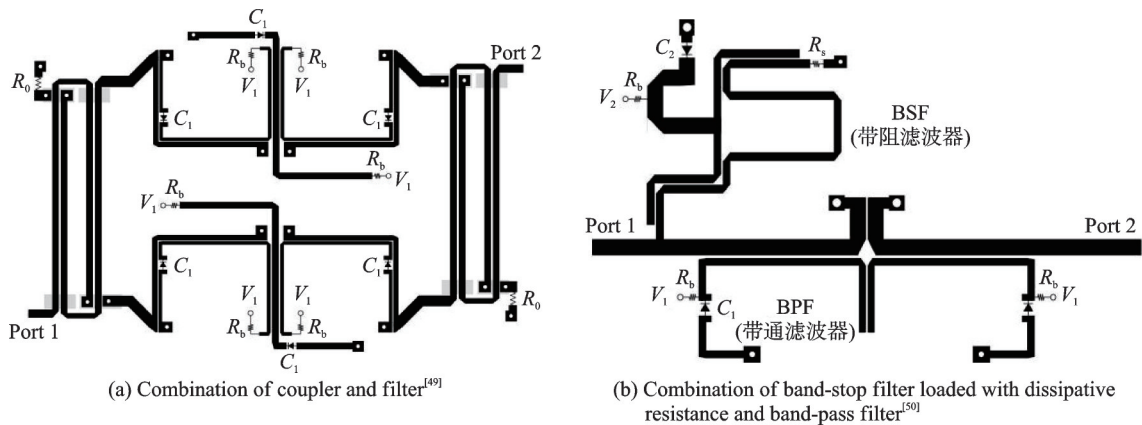


图2 两种典型的输入无反射电调滤波器

Fig.2 Two representative tunable input-reflectionless filters

3.1.3 滤波类型可重配置

为应对难以预测的电磁干扰,接收机射频前端的滤波器除了具备中心频率、带宽和传输零点等频率响应可调的能力之外,还需要具备滤波类型可重配置的能力,即滤波器传输函数类型可转换,例如带通-带阻转换、低通-高通转换,双通-单通转换、全通-带阻转换等,便于在弱干扰环境中选通接收有用信号,在强干扰环境中抑制有害信号。目前实现滤波类型可重配置的方法主要包括:(1)通过控制单刀双掷开关或PIN开关改变信号传输路径,从而实现滤波器传输函数类型转换,包括低通-高通转换^[53]、带通-带阻转换^[54]; (2)通过开关控制多模谐振器中枝节的选通改变谐振器导纳,实现双通-单通转换^[55]、宽带-窄带转换^[56]; (3)采用直通传输线与高品质因数谐振器并联的电路结构,通过变容二极管改变直通传输线相位进而实现全通-带阻转换^[57]。图3给出了几种典型的滤波类型可重构滤波器。

3.2 射频干扰抵消技术发展现状

在所有的干扰抵消技术中,射频干扰抵消被认为是最有效的技术方案之一。因为它对于防止ADC饱和尤为关键^[58],所以对于强电磁对抗条件下的频谱感知接收机,射频域干扰抵消比空域和数字域具有更重要的理论和工程价值。目前,很多工作聚焦于已知干扰信息条件下解决收发信机的自干扰抵消。针对具有同时同频全双工应用潜力的收发天线分置架构,通过建立已知干扰的参考通道,采用时域自干扰抵消、频域自干扰抵消等方法^[59],实现收发天线间辐射自干扰抵消,并不断提升抵消带宽、抵消比、抵消速度和效率等指标。

3.2.1 时域自干扰抵消

基于时域的射频干扰抵消结构将参考干扰信号分成 N 路不同的分支(抽头),每个抽头都可以独立地调整参考信号的幅度、相位和时延,然后通过加权实现线性有限脉冲响应(Finite impulse response, FIR)滤波器匹配辐射自干扰信道^[60],如图4所示。正是这种抽头延迟结构的复杂加权使得射频干扰抵

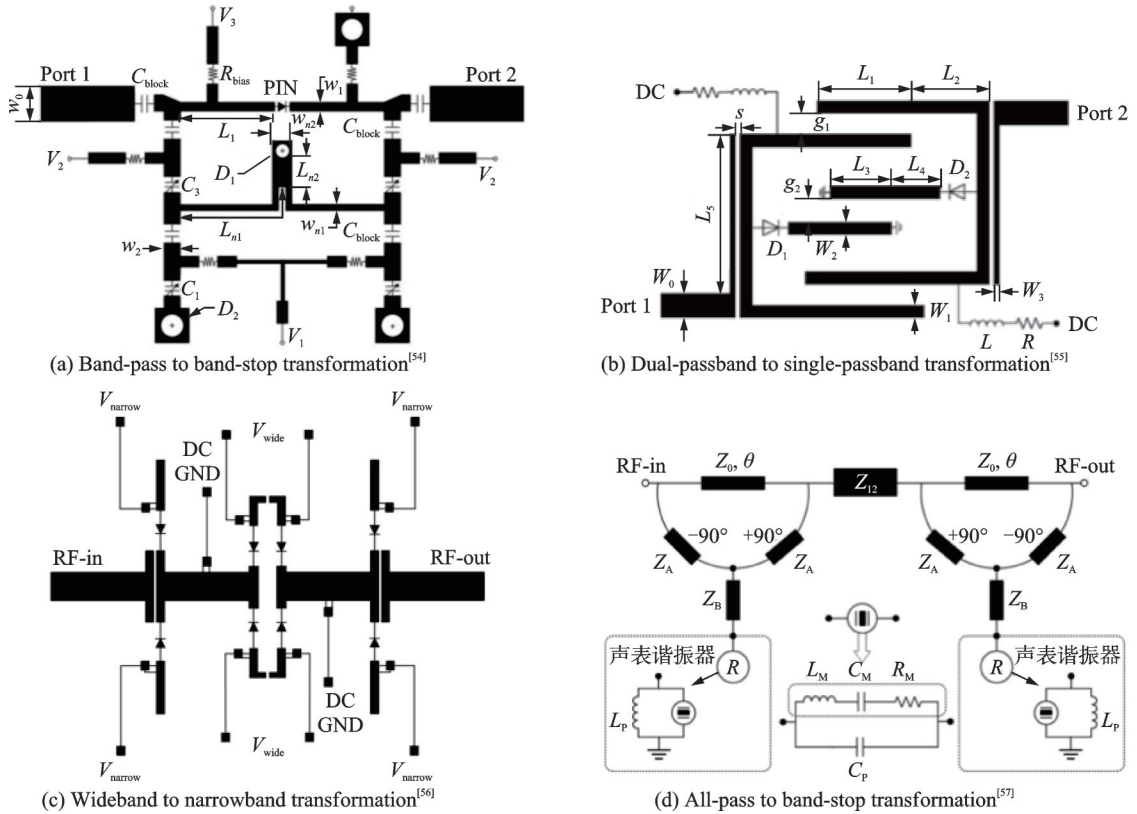


图3 典型的传输响应可重构滤波器

Fig.3 Representative tunable filters with reconfigurable transmission response

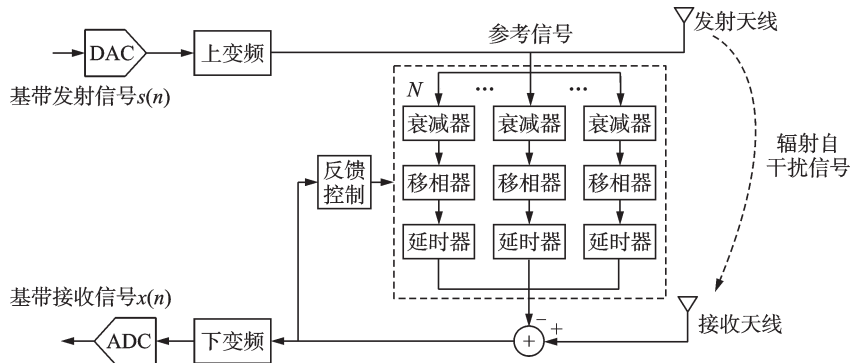


图4 时域射频自干扰抵消结构 I

Fig.4 Time-domain RF self-interference cancellation structure I

消器能够匹配外界辐射的直射路径和反射路径,并在接收机射频前端产生出与其相抵消的重建信号。针对多径延时扩展,通常采用固定延时线与可调延时器相结合的多抽头结构^[61],根据信道模型估计确定抽头权重的实数或复数初值,结合误差反馈并基于自适应滤波算法实现抽头权重调控以达到最优抵消^[62]。经过对比分析,在已知自干扰信号直射路径时延的前提下,特定抽头数量、干扰抵消比是关于最大抽头延迟的凸函数(当最大抽头延迟约等于两倍自干扰信号直射路径时延时,达到峰值);对于特定抽头延迟范围,干扰抵消比与抽头数量成正比,与自干扰抵消带宽成反比^[63-64]。

3.2.2 频域自干扰抵消

由于延时线的长度和硅基衬底的损耗,时域自干扰抵消结构在抽头数量较多的情况下难以实现小型化,因此基于频域的射频干扰抵消结构应运而生,与时域结构中每个抽头的具体电路不同。如图5所示,将电调衰减器、移相器与电调带通滤波器相连作为抽头,独立改变其幅度、相位、中心频率和品质因数等4个参量^[65],不仅可以匹配辐射自干扰信道的幅度和相位,还可以匹配其幅度和相位的斜率。频域自干扰抵消结构的显著优点是取消了每个抽头的延迟器,从而大大简化集成电路的实现复杂度,增加1个可调参量的自由度,更适用于宽带自干扰抵消。其中,基于无源谐振器的片外电调带通滤波器的拓扑结构在滤波部分已作概述;基于有源跨导的片上电调带通滤波器一般按照 N 通道滤波器拓扑结构设计,便于集成电路工艺实现^[66]。

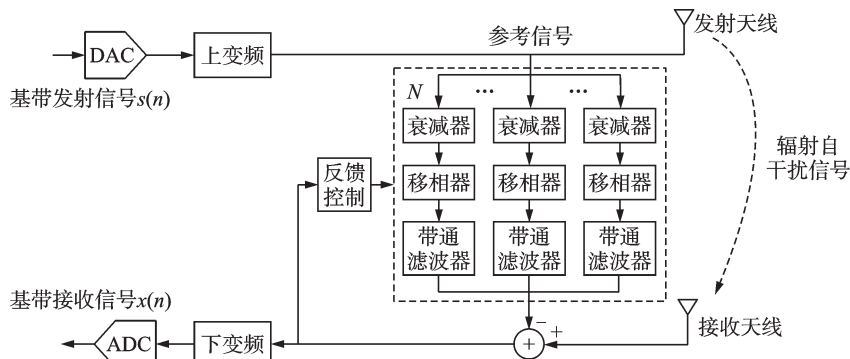


图5 频域射频自干扰抵消结构 II

Fig.5 Frequency-domain RF self-interference cancellation structure II

4 宽带自适应射频保护频谱感知接收机架构探讨

随着武器装备密集部署和侦攻防控一体化程度的提高,联合战场上越来越多己方、敌方和中立方作战实体在竞争可用频谱资源,电磁环境变得越发拥挤和不可预测。对于用频装备的射频前端,如通信和雷达等装备,必然面临己方和敌方生成信号的干扰,必须提高接收机自主抗干扰能力。对于频谱感知设备,同样需要具备自适应射频保护能力,确保在强弱信号同时共存的电磁环境中能够正常执行宽带频谱感知任务。本文以保护同址宽带数字接收机不受己方强信号影响为出发点,探索支持软件无线电接收通道的宽带自适应射频保护频谱感知接收机架构,通过有选择地衰减带外强信号和抵消带内强信号来避免其进入饱和和工作状态。

4.1 宽带自适应射频保护总体架构

基于射频电调滤波和自适应干扰抵消的研究,按照滤除带外强信号和抵消带内强信号的设计思路,提出感知主路和抵消辅路相结合的频谱感知接收机宽带自适应射频保护总体架构,如图6所示,应用场景为强弱信号同时共存的电磁环境,目标频段为超短波频段。其中, Rx_d 代表感知主路所采用的定向接收天线, Rx_c 代表抵消辅路中强信号提取所采用的全向接收天线。自适应射频保护模块包括射频干扰抵消器和射频电调滤波器,宽带数字接收机为扫频式超外差接收机。强信号检测与提取模块包括电调衰减器、幅频特性检测器、滤波网络等,当抵消辅路检测到对感知主路有害的强信号且射频电调滤波衰减不足以抑制时,开启射频干扰抵消并通过自适应控制使感知主路的动态范围达到最优状态。

4.2 模数混合的射频干扰抵消结构

由于空间中任意向量皆可由同一平面的两个正交向量合成,可以采用矢量调制器生成抵消信号并实现幅相精确控制,因此工程中经常使用正交矢量合成法,经强信号检测并控制电调滤波网络以提取

该有害强信号,将其通过正交分解生成 0° 和 90° 两路信号,对两路信号只需进行幅度精确调整即可合成与强干扰信号相位相反的抵消信号。

由于数字信号处理模块可以采用更复杂的自适应滤波算法匹配辐射自干扰信道模型并进行误差反馈控制,因此拟采用模拟-数字混合结构作为射频干扰抵消结构,如图7所示。外界电磁信号经过大功率电调衰减,然后通过强信号检测判断是否存在超出感知主路动态范围的有害射频信号,若存在则将其滤出并进入矢量调制器,矢量调制器调权参数由误差反馈控制环路产生,通过现场可编程门阵列(Field-programmable gate array, FPGA)上数模转换器产生的电压控制小步进衰减器(Digital step attenuator, DSA)实现宽带移相,结合可变增益放大器(Variable gain amplifier, VGA)的幅度调整重建射频干扰抵消信号后耦合进入感知主路,对外界强信号实现所需的射频干扰抵消比。

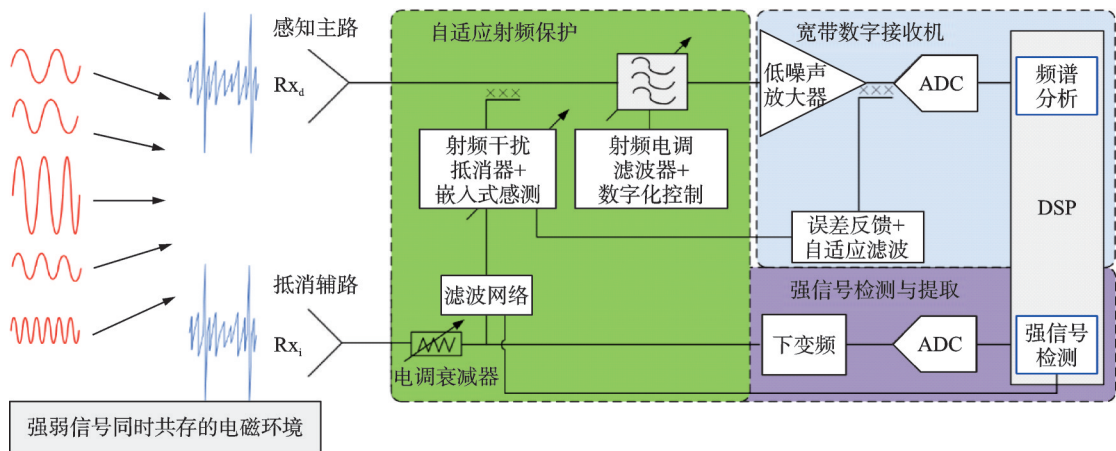


图6 典型应用场景中频谱感知接收机宽带自适应射频保护架构

Fig.6 Architecture of wideband adaptive RF protection for spectrum sensing receivers in typical application scenario

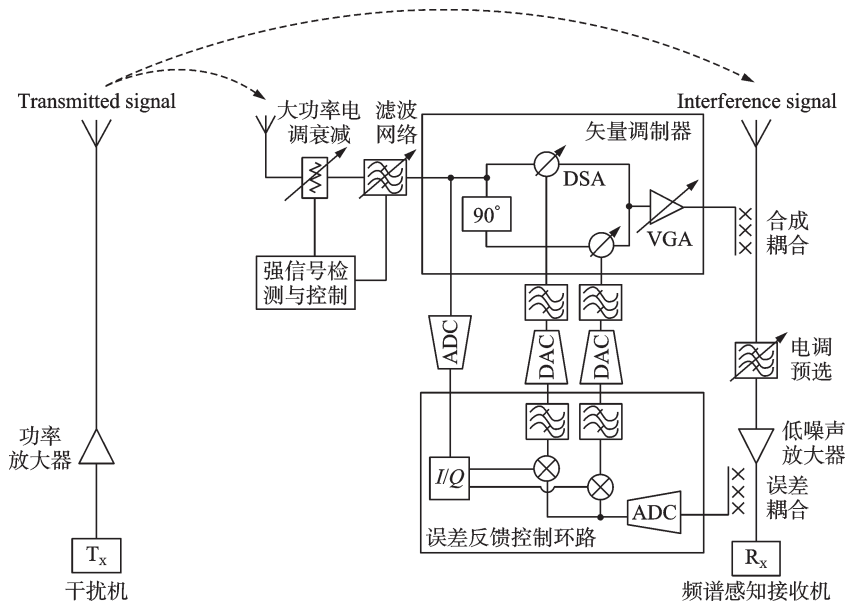


图7 所提频谱感知接收机中模数混合的射频干扰抵消结构

Fig.7 Analog-digital hybrid RF interference cancellation structure of the proposed spectrum sensing receivers

5 结束语

当前电磁频谱感知设备的复杂电磁环境适应能力不足,易受强信号影响而进入饱和状态,造成频段扫描时频谱感知结果出现底噪严重抬高、满屏幕虚假信号等现象。研究发现,宽带数字接收机的动态范围受限于射频链路,当周边出现强干扰信号时,进入模数转换器的信号幅度过大,超出其动态范围而无法正常工作,因此需要尽快研究宽带自适应射频保护关键技术。在对比分析现有的射频保护手段的基础上,提出带外滤波和带内抵消相结合的射频干扰抑制策略,并对频谱感知接收机宽带自适应射频保护架构方案进行了探索。

经过对射频电调滤波和射频干扰抵消的发展现状的归纳,建议重点关注以下问题:

(1)目前大多数集成电路类单个电调滤波器/陷波器调谐比限制在2:1或更低,无源腔体类电调滤波器调谐比限制在3:1,很少能够实现更大的调谐比。为了覆盖更宽的频率范围,设计人员通常会采用混合使用调谐滤波器组和开关滤波器组的方案,但包含多个开关的信号路径会导致额外损耗并妨碍多频带响应的产生。另外,通带/阻带的带宽可调、通带外引入传输零点、通带内引入陷波等都是接收机抑制强干扰所需的滤波器频率响应。因此,需重点研究射频电调滤波器调谐范围拓展、中心频率与带宽全可调、电调带通与陷波相配合等关键技术。

(2)根据工作频带和天线几何布局的不同,由散射和多径引起的时延会在5~50 ns范围内变化^[67]。对于宽带射频干扰抵消,这将要求抵消器具有较大的时间-带宽积。虽然相关文献已经实现了窄带干扰抵消,但通常仅使用几个频率或时间抽头,通过在固定延迟窗口的简单矢量调制实现。同时,这只能在辐射自干扰延迟扩展较短的窄频带上进行抵消,技术瓶颈在于如何对宽带信号(≥ 100 MHz)实现长可控时延,因此需要进一步创新而不是仅仅依靠延迟线级联实现所需时间-带宽积^[68]。

(3)当前射频干扰抵消重点解决的是收发信机内部的泄露干扰(收发天线共用)和辐射自干扰(收发天线分置)等合作干扰抵消问题,通常需要在发射机和接收机之间建立一条辅助通道或参考通道以重建干扰信号^[69-70],但缺少对共址台站间辐射干扰甚至敌方有意干扰等非合作干扰抵消问题的研究。因此,针对无先验信息的随机时变干扰,需重点研究无直接耦合参考通道情况下干扰快速提取、重建干扰与辐射干扰信号间的时延匹配等问题。

参考文献:

- [1] 张文旭,吴振南,陆满君,等. 电子侦察干扰一体机及国产化综述[J]. 空天防御, 2022, 5(2): 75-86.
ZHANG Wenxu, WU Zhennan, LU Manjun, et al. Review of integrated equipment for electronic reconnaissance and jamming and localization[J]. *Air & Space Defense*, 2022, 5(2): 75-86.
- [2] 潘成康. 通信感知一体化技术思考[J]. 中兴通信技术, 2022, 28(5): 53-56.
PAN Chengkang. Reflections on integrated sensing and communication technology[J]. *Zhongxing Communication Technology*, 2022, 28(5): 53-56.
- [3] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 739-750.
XIAO Bo, HUO Kai, LIU Yongxiang. Development and prospect of radar and communication integration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 739-750.
- [4] JIANG M, LIAO G, YANG Z, et al. Tunable filter design for integrated radar and communication waveforms[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(2): 570-573.
- [5] 刘永军, 廖桂生, 李海川, 等. 电磁空间分布式一体化波形设计与信息获取[J]. 中国科学基金, 2021, 35(5): 701-707.
LIU Yongjun, LIAO Guisheng, LI Haichuan, et al. Distributed integrated waveform design and information acquisition in electromagnetic space[J]. *China Science Foundation*, 2021, 35(5): 701-707.
- [6] 朱永文, 喻兰辰晖. L波段数字航空通信系统研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(4): 700-714.
ZHU Yongwen, YU Lanchenhui. Overview of L-band digital aeronautical communication system[J]. *Journal of Nanjing Univer-*

- sity of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(4): 700-714.
- [7] 工业和信息化部. 中华人民共和国无线电频率划分规定[EB/OL]. (2023-06-27). https://www.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/122621123_3/attach/20236/pdf.
- [8] POISEL R A. Electronic warfare receivers and receiving systems[M]. Boston: Artech House, 2014.
- [9] 张嘉毫, 李毅, 唐健, 等. 基于正交电桥的短波双极性电调衰减器的设计[J]. 船电技术, 2014, 34(2): 17-20.
ZHANG Jiahao, LI Yi, TANG Jian, et al. Design of a bipolar electronic-controlled attenuator based on quadrature bridge in short-wave band[J]. Marine Electric Technology, 2014, 34(2): 17-20.
- [10] KNOWLES J M, SIGMARSSON H H, MCDANIEL J W. Generalized theory and realization of continuously loss-programmable bandpass filtering attenuators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(12): 5280-5294.
- [11] 南雪莉, 张斌珍, 杨昕, 等. MEMS开关宽频程控步进衰减器设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1-5.
NAN Xueli, ZHANG Binzhen, YANG Xin, et al. Design and implementation of MEMS switch broadband programmable step attenuator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10): 1-5.
- [12] LI Nayu, ZHANG Zijiang, LI Min, et al. A DC 28 GHz 7 bit high-accuracy digital-step attenuator in 55 nm CMOS[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(2): 157-160.
- [13] 孙俊峰, 姜理利, 刘水平, 等. 一种晶圆级封装的MEMS数控衰减器[J]. 固体电子学研究与进展, 2023, 43(4): 353-358.
SUN Junfeng, JIANG Lili, LIU Shuiping, et al. A wafer-level packaged mems digital attenuator[J]. Research & Progress of SSE, 2023, 43(4): 353-358.
- [14] 王冬冬, 邓峰, 郑生全, 等. PIN二极管限幅器的电磁脉冲损伤特性试验[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(2): 65-69.
WANG Dongdong, DENG Feng, ZHENG Shengquan, et al. Experimental investigation on the EMP damage characteristics of PIN diode limiters[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(2): 65-69.
- [15] 钟立平, 章国豪, 黄国宏, 等. 一种应用于射频前端接收机的毫米波自适应限幅器:CN202010522032.3[P]. 2020-09-11.
ZHONG Liping, ZHANG Guohao, HUANG Guohong, et al. A millimeter-wave adaptive limiter applied to RF front-end receivers:CN202010522032.3[P]. 2020-09-11.
- [16] LI Shifeng, WANG Leiyang, WU Bang, et al. High power X-band monolithic GaAs pin balanced limiter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(12): 5280-5294.
- [17] DENG Shixiong, GAO Changzheng, CHEN Shubin, et al. Research on linearity improvement of silicon-based pin diode limiters[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(1): 62-65.
- [18] HAGELAUER A, RUBY R, INOUE S, et al. From microwave acoustic filters to millimeter-wave operation and new applications[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2023, 3(1): 484-508.
- [19] YANG Li, ZHU Xi, GÓMEZ-GARCÍA R. High-order quasi-elliptic-type wideband bandpass filter with ultrabroad input-reflectionless stopband range[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2023, 33(6): 655-658.
- [20] SANDHU M Y, AFRIDI S, LAMECKI A, et al. Miniaturized inline bandpass filters based on triple-mode integrated coaxial-waveguide resonators[J]. IEEE Access, 2023, 11(8): 81196-81204.
- [21] CAMERON R J. Microwave filters for communication systems fundamentals, design and applications[M]. New Jersey: Wiley-Interscience, 2007.
- [22] ZHAO Zhiyuan, CHEN Jiang, YANG Lin, et al. Three-pole tunable filters with constant bandwidth using mixed combline and split-ring resonators[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(10): 671-673.
- [23] GOWRISH B, RAAFAT R M. A novel bandwidth reconfigurable waveguide filter for aerospace applications[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(6): 577-580.
- [24] GOWRISH B, RAAFAT R M. A tunable quarter-wavelength coaxial filter with constant absolute bandwidth using a single tuning element[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 31(6): 658-661.
- [25] GOWRISH B, RAAFAT R M. Design methodology of a high-Q tunable coaxial filter and diplexer[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(12): 5005-5015.
- [26] 赵志远, 杨霖, 陈昆和, 等. 基于混合梳状线谐振器的三阶恒定带宽电调微带滤波器研究[J]. 电子学报, 2015, 43(1): 140-144.
ZHAO Zhiyuan, YANG Lin, CHEN Kunhe, et al. Three-pole tunable filters with constant bandwidth using mixed combline

- and quasi-combine resonators[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(1): 140-144.
- [27] 田登尧, 冯全源, 向乾尹. 374~747 MHz数字可调谐微带滤波器[J]. *通信学报*, 2016, 37(8): 129-135.
TIAN Dengyao, FENG Quanyuan, XIANG Qianyin. 374—747 MHz digital tunable microstrip filter[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(8): 129-135.
- [28] ZHAO Zhiyuan, CHEN Jiang, YANG Lin, et al. High-power VHF tunable filters with high selectivity[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(19): 1356-1358.
- [29] ASHLEY A, PSYCHOGIOU D. RF co-designed bandpass filter/circulator with tunable center frequency, bandwidth, and out-of-band isolation[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2021, 31(7): 845-848.
- [30] 曹良足, 殷丽霞. 压电换能器电调介质滤波器设计与实现[J]. *电子学报*, 2017, 45(8): 1964-1969.
CAO Liangzu, YIN Lixia. The implementation and design of piezoelectric transducer-tuned dielectric filter[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(8): 1964-1969.
- [31] ZHANG Jiahao, HE Fangmin, LI Wei, et al. Self-interference cancellation: A comprehensive review from circuits and fields perspectives[J]. *Electronics*, 2022, 11(2): 172-192.
- [32] 吴飞, 马万治, 邵士海, 等. 多抽头延迟设置与幅相误差对全双工射频自干扰消除的影响[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(7): 1538-1543.
WU Fei, MA Wanzhi, SHAO Shihai, et al. Impact of delay setting, amplitude and phase errors on multi-tap self-interference cancellation in full-duplex system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(7): 1538-1543.
- [33] 刘建成, 全厚德, 李召瑞, 等. 多路延迟正交合成的多径信道射频干扰抵消[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(3): 655-660.
LIU Jiancheng, QUAN Houde, LI Zhaorui, et al. RF interference cancellation based on multi-tap delay and orthogonal combination in multipath channel[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(3): 655-660.
- [34] ABOLMAGD H, SUBBARAMAN R, ESMAEELI O, et al. A hierarchical self-interference canceller for full-duplex LPWAN applications achieving 52—70 dB RF cancellation[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2023, 58(5): 1323-1336.
- [35] LEE D, MIN B W. 2×2 MIMO in-band full-duplex radio front-end with delay shapable single-tap RF cancellers[J]. *IEEE Access*, 2023, 11(10): 106476-106484.
- [36] 李明阳. 抽头三通道辐射干扰自适应抵消系统性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
LI Mingyang. Research on the performance of tap three-channel radiation interference adaptive cancellation system[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.
- [37] 应延治, 杨洪丰, 李波. 多功能综合射频系统设计[J]. *舰船电子对抗*, 2022, 45(3): 113-116.
YING Yanzhi, YANG Hongfeng, LI Bo. Design of multi-functional integrated radio frequency system[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2022, 45(3): 113-116.
- [38] DONG J, XU K, SHI J. A voltage-controlled tunable differential dual-band bandpass filter with compact size and wide tuning range[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(10): 9952-9962.
- [39] CAO Z, BI X, XU Q. Tunable reflectionless filter with independently controllable dual passbands and absorbed harmonic signals[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(11): 3416-3420.
- [40] FAN M, SONG K, FAN Y. Reconfigurable low-pass filter with sharp roll-off and wide tuning range[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, 30(7): 649-652.
- [41] LIM T, ANAND A, CHEN J. Design method for tunable planar bandpass filters with single-bias control and wide tunable frequency range[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(1): 221-225.
- [42] HUNTER I C, RHODES J D. Electronically tunable microwave bandpass filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, 30(9): 1354-1360.
- [43] CHEN Chifeng. Design of a microstrip three-state switchable and fully tunable bandpass filter with an extra-wide frequency tuning range[J]. *IEEE Access*, 2020, 8(4): 66438-66447.
- [44] WANG X G, CHO Y H, YUN S W. A tunable combline bandpass filter loaded with series resonator[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(6): 1569-1576.
- [45] QIN W, CAI J, LI Y L, et al. Wideband tunable bandpass filter using optimized varactor-loaded SIRs[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(9): 812-814.

- [46] LIU Yun, LIU Lingyun, LIANG Chen, et al. Compact planar tunable filter with constant absolute bandwidth and wide-frequency tuning range using DGS coupling structure[J]. *IEEE Access*, 2021, 9(12): 157259-157266.
- [47] FAN Maoyu, SONG Kaijun, FAN Yong. Reconfigurable bandpass filter with wide-range bandwidth and frequency control[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(6): 1758-1762.
- [48] MORGAN M A, BOYD T A. Theoretical and experimental study of a new class of reflectionless filter[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, 59(5): 1214-1221.
- [49] FAN Maoyu, SONG Kaijun, YANG Li, et al. Frequency-tunable constant-absolute-bandwidth single/dual-passband filters and diplexers with all-port-reflectionless behavior[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(2): 1365-1377.
- [50] FAN Maoyu, SONG Kaijun, YANG Li, et al. Frequency-reconfigurable input-reflectionless bandpass filter and filtering power divider with constant absolute bandwidth[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(7): 2424-2428.
- [51] GÓMEZ-GARCÍA R, MUÑOZ-FERRERAS J M, PSYCHOGIOU D. Dual-behavior resonator-based fully reconfigurable input reflectionless bandpass filters[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2019, 29(1): 35-37.
- [52] CAO Zilan, BI Xiaojun, XU Qinfen. Tunable reflectionless filter with independently controllable dual passbands and absorbed harmonic signals[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(11): 3416-3420.
- [53] CHO Y H, REBEIZ G M. Tunable 4-Pole noncontiguous 0.7—2.1 GHz bandpass filters based on dual zero-value couplings[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(5): 1579-1586.
- [54] FAN Maoyu, SONG Kaijun, ZHU Yu, et al. Compact bandpass-to-bandstop reconfigurable filter with wide tuning range[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2019, 29(3): 198-200.
- [55] LUI B, WEI F, SHI X. Switchable bandpass filter with two-state frequency responses[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(1): 196-197.
- [56] LUGO J C, PAPAPOLYMEROU J. Electronic switchable bandpass filter using PIN diodes for wireless low cost system-on-a-package applications[J]. *IEE Proceedings Microw Antennas Propagation*, 2004, 151(6): 497-502.
- [57] PSYCHOGIOU D. Reconfigurable all-pass-to-bandstop acoustic-wave-lumped-element resonator filters[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, 30(8): 745-748.
- [58] 孟进, 张磊, 赵治华. 新型舰船系统电磁干扰分析、测量与防护[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
MENG Jin, ZHANG Lei, ZHAO Zhihua. Electromagnetic interference analysis, measurement and protection of new ship system[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2021.
- [59] 郭文博. 频谱共生系统中的同频干扰抑制关键技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
GUO Wenbo. Key technologies of co-frequency interference cancellation in spectrum symbiosis systems[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [60] WAGNER E, LARocca T, VERDERBER M, et al. A 31 tap reconfigurable analog fir filter using heterogeneously integrated polystrata delay-lines[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2022, 32(6): 648-651.
- [61] 吕宇琦. 同时同频全双工自干扰抑制可变延时器研究与验证[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
LV Yuqi. Research and verification of variable delay of CCFD self-interference rejection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [62] NAGULU A, GAONKAR A, AHASAN S, et al. A full-duplex receiver leveraging multiphase switched-capacitor-delay based multi-domain FIR filter cancellers[C]//*Proceedings of IEEE RFIC*. [S.l.]: IEEE, 2020: 43-46.
- [63] NAGULU A, GAONKAR A, AHASAN S, et al. A full-duplex receiver with wideband multidomain FIR cancellation based on stacked-capacitor, N-path switched-capacitor delay lines achieving $> +54$ dB SIC across 80 MHz BW and $> +15$ dBm TX power handling[C]//*Proceedings of IEEE ISSCC*. [S.l.]: IEEE, 2021: 100-102.
- [64] 唐友喜, 许林, 吴飞, 等. 电磁频谱伞罩[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(7): 911-931.
TANG Youxi, XU Lin, WU Fei, et al. Electromagnetic spectrum umbrella[J]. *SCIENTIA SINICA Informations*, 2019, 49(7): 911-931.
- [65] CHEN T J, GARİKAPATI S, NAGULU A, et al. A survey and quantitative evaluation of integrated circuit-based antenna

interfaces and self-interference cancellers for full-duplex[J]. IEEE Open Journal Communications Society, 2021, 2(7): 1753-1776.

[66] KOLODZIEJ K E. In-band full-duplex wireless systems handbook[M]. London: Artech House, 2021.

[67] 孙慧贤, 刘建成, 崔佩璋, 等. 基于多通道最小均方算法的多发单收同车电台射频干扰对消[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 557-562.

SUN Huixian, LIU Jiancheng, CUI Peizhang, et al. RF interference cancellation based on multi-channel least mean square for multi-transmits and single-receive co-vehicle radios[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(3): 557-562.

[68] 霍晓磊, 赵宏志, 刘颖, 等. 基于抵消技术的邻道干扰抑制[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2611-2618.

HUO Xiaolei, ZHAO Hongzhi, LIU Ying, et al. Adjacent channel interference suppression based on cancellation technology [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(11): 2611-2618.

[69] 吴灏, 康颖, 葛松虎, 等. VHF/UHF 通信电台接收链路中的干扰抑制合并方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(3): 1014-1021.

WU Hao, KANG Ying, GE Songhu, et al. Interference rejection combining method in receive chain of VHF/UHF communication radio[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(3): 1014-1021.

[70] 苟川杰, 赵治华, 孟进, 等. 基于射频耦合与数字重建的同址干扰对消[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 58-63.

GOU Chuanjie, ZHAO Zhihua, MENG Jin, et al. Co-site interference cancellation based on RF coupling and digital reconstruction[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(2): 58-63.

作者简介:



赵志远(1986-),男,博士,副研究员,研究方向:射频电调滤波器、跳频收发信机、电磁频谱感知等, E-mail: zhaozhiyuan1986@sina.com。



丁国如(1986-),男,教授,博士生导师,研究方向:认知无线电、电磁频谱感知等。



朱义勇(1980-),男,副研究员,研究方向:通信与信息系统、无人机等。



周新(1987-),通信作者,男,硕士,讲师,研究方向:压缩感知、大数据等, E-mail: zhouxin_yy1987@163.com。



章力(1993-),男,博士,助理研究员,研究方向:认知干扰评估、故障诊断等。



朱莹(1983-),女,副研究员,研究方向:数字射频调制、智能抗干扰等。

(编辑:陈珺)