# 阵列信号处理发展现状综述报告

孙梦茹

华中科技大学

**摘 要：**随着无线通信技术的不断发展，阵列信号处理技术在无线通信系统中扮演着越来越重要的角色。本文综述了当前阵列信号处理领域的最新发展趋势。本文将基于FPGA的多功能阵列信号处理系统设计[1]、基于阵列信号处理的北斗抗干扰终端设计[3]、集中式MIMO雷达阵列信号处理技术研究[4]、一种数字阵列信号处理单元的设计与实现[2]和互质阵列信号处理研究进展：波达方向估计与自适应波束成形[5]等五篇论文，探讨阵列信号处理的发展现状。通过分析相关研究成果，可以更好地理解和掌握阵列信号处理技术的最新进展。

**关键词：**阵列信号处理、FPGA、MIMO、抗干扰、自适应波束成型

## 引言

随着科技的不断发展，人们对于信号处理的需求越来越高。在信号处理领域中，阵列信号处理是一种较为常用的信号处理技术，通过使用多个接收器来接收信号，从而加强信号的抑制以及改善信噪比。

阵列信号处理技术已经被广泛应用于雷达、无线电通信、测量，以及声音和图像处理等领域。随着新一代通信技术的发展，阵列信号处理技术也得到了广泛的应用，例如5G通信系统中的MIMO技术。

阵列信号处理的基本原理是通过将多个接收器分别接收到的信号进行加权、相干、和延迟等处理，从而实现目标信号增强和干扰信号抑制的效果。

## 二、使用FPGA处理阵列信号

基于FPGA的多功能阵列信号处理系统的设计是近年来研究的重点之一。

为了适应阵列信号处理数据量大、实时性高的特点，罗欣等人[1]结合项目需求设计了一种基于 FPGA 的多功能阵列信号处理系统。通过采用先进的大规模高性能 FPGA 和多路高精度 ADC 芯片，可完成对 40 路中频信号的同步采集和数字下变频处理，并由数字波束合成运算得到 36 组波束数据。通过设置多种类型的对外接口，可实现与多个外联设备的网络数据交互、串口控制、波束控制及 MGT 高速数据传输。文中给出了系统的硬件和软件总体架构设计，并详细介绍了芯片选型、外设接口及各软件功能模块的具体实现方法。该系统采用了高速FPGA芯片和数字信号处理算法，可以实现多种信号处理功能，如滤波、降噪、压缩和解压缩等。

## 三、抗干扰方面的应用

基于阵列信号处理的北斗抗干扰终端的研究也引起了广泛的关注。白景坡[3]等人为提高北斗RDSS用户终端的抗干扰能力，设计并实现了一款基于阵列信号处理的北斗抗干扰终端。终端接收部分采用数字移项波束形成，发射部分采用射频相移波束形成技术，采用微带天线实现天线阵元。终端主机采用通用功能化DSP与专用功能化FPGA相结合的设计方案，完成抗干扰接收和低暴露发射的综合处理。通过对工程样机的测试，与北斗普通用户相比，工程样机窄带干扰容限提高36dB,宽带干扰容限提高33dB。该终端采用了多个天线组成的阵列，通过利用阵列信号处理技术来增强信号的接收能力，从而提高北斗导航系统的抗干扰性能。通过阵列信号处理，可以对信号进行分离、滤波和降噪等处理，提高北斗信号的质量和可靠性。

## 四、在集中式 MIMO 雷达阵列中的应用

集中式MIMO雷达阵列信号处理技术的研究也是当前的一个热点领域。该技术利用多个天线组成的阵列来实现多路信号的接收和处理，从而提高雷达系统的探测距离和分辨率。但同时也对信号处理技术提出了更高的要求。该技术采用了数字信号处理算法和自适应滤波技术，以进一步提高系统的性能和稳定性。对于集中式MIMO雷达阵列信号处理技术的研究，需要深入理解MIMO雷达原理，并针对其特点开展算法优化、系统设计等研究。

根据集中式多输入多输出雷达信号模型，陈涛等人[4]给出了其阵列信号处理的处理流程，对频率编码正交信号的阵列信号处理方法进行了研究。基于该正交信号的信号模型，针对其互相关及自相关性能讨论了信号参数关系。进而研究了在处理中需关注的运动补偿、接收波束展宽、发射波束合成宽带等问题。其团队分析了该正交信号阵列通道误差，给出了误差校准方法，并进行仿真验证，说明了方法的有效性。最后给出了详细的处理流程，并对主要的处理运算量进行了评估，对工程应用有指导意义。

## 五、数字阵列信号处理的硬件设计

数字阵列信号处理单元的设计也是近年来研究的一个重要方向。数字阵列信号处理单元是阵列信号处理系统的核心组成部分。该单元具有可扩展性和灵活性，可以根据不同的应用需求进行定制和优化。其设计和实现对于整个系统的性能和实时性有着至关重要的影响。

数字阵列信号处理系统包括的发射与接收通道往往几十、几百甚至上千个，随着通道数的增多，系统的体积和硬件设计的复杂度也会增大，同时在信号同步、时序等设计中也增加了很多困难，非常不便于系统应用。针对上述问题，孙宗正等人[2]基于片上射频系统芯片（radio-frequencysystem-on-chip，RFSoC）提出了一种数字阵列信号处理模块的硬件架构，该设计可实现 16 路接收通道和 16 路发射通道，模拟带宽覆盖 0-6GHz，同时也采用了标准化、模块化设计思想，使得该模块易于扩展应用，降低系统设计的复杂度。最后，通过测试，验证了该 6U 模块的各项技术指标，满足数字阵列系统的应用需求。

## 六、波达方向估计与自适应波束成形

互质阵列信号处理是一种应用于无线通信、雷达等领域的新型信号处理技术，它能够提高信号的分辨率和抗干扰性。该主题要求对互质阵列信号处理技术的发展进行梳理，并就其中的波达方向估计和自适应波束成形问题进行深入剖析。

周成伟等人[5]分别从波达方向估计和自适应波束成形这两个阵列信号处理领域的基本问题出发，介绍了互质阵列信号处理方向的研究进展。在波达方向估计方面，研究人员采用了一系列先进的算法和技术，如最小均方误差(MMSE)算法、卡尔曼滤波器和粒子滤波器等，以提高系统的精度和鲁棒性。总结了互质子阵分解方法和虚拟阵列信号处理方法等两类典型技术路线，并以此为基础介绍了压缩感知和无网格化技术在低复杂度和超分辨估计等方面的最新研究工作。在自适应波束成形方面，研究人员采用了一系列先进的算法和技术，如最小方差无偏估计(MVU)算法、线性最小二乘法(Least Squares)算法和非线性最小二乘法(Nonlinear Least Squares)算法等，以提高系统的性能和稳定性。并剖析了其与互质阵列波达方向估计问题的区别与联系，并介绍了面向互质阵列的高效鲁棒自适应波束成形设计方法。旨在通过对互质阵列信号处理研究前沿的分类归纳和总结，探讨各类方法的优势和未来的研究方向，为其在雷达等领域的产业需求和实际应用提供理论和技术参考。

## 七、总结

本文综述了当前阵列信号处理领域的最新发展趋势，包括使用FPGA来处理阵列信号、北斗信号抗干扰方面、在集中式MIMO雷达上的应用、数字阵列信号处理单元的硬件设计和自适应波束成型等方面。这些方向都具有重要的应用前景，可以帮助我们更好地理解和掌握阵列信号处理技术的最新进展。

阵列信号处理技术的发展已经迅速推动了无线通信技术、雷达技术以及声音和图像处理等领域的发展。与传统信号处理技术相比，阵列信号处理技术具有更好的性能，可以提供更高的信噪比和更好的精度。虽然阵列信号处理技术有很多优点，但是也存在一些局限性和问题。例如，信号接收的相对位置以及噪声的干扰等因素可以影响到信号处理的结果，因此需要对信号参数进行有效的控制。随着技术的不断发展，阵列信号处理技术将继续得到应用和发展，可以预见，未来它将对更多领域的信号处理产生深远的影响。

总之，阵列信号处理技术是一种有着十分广泛应用的信号处理技术，并在不断的发展和扩展中。未来随着技术的进步以及科技水平的提高，阵列信号处理技术将会得到更广泛的应用，并成为科学研究和技术发展中不可或缺的技术手段。

**参考文献**

1. 罗欣,冯武,孙卫杰等.基于FPGA的多功能阵列信号处理系统设计[J].电子科技,2023,36(03):1-6.DOI:10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2023.03.001.
2. 孙宗正,肖国尧,全英汇. 一种数字阵列信号处理单元的设计与实现[C]//中国电子学会数字信号处理专家委员会.第十三届全国DSP应用技术学术会议论文集.[出版者不详],2021:6.DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.041743.
3. 白景坡,高平,蒋炜等.基于阵列信号处理的北斗抗干扰终端设计[J].无线电工程,2021,51(04):271-276.
4. 陈涛,康猛.集中式MIMO雷达阵列信号处理技术研究[J].现代雷达,2020,42(01):51-54.DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.01.011.
5. 周成伟,郑航,顾宇杰等.互质阵列信号处理研究进展：波达方向估计与自适应波束成形[J].雷达学报,2019,8(05):558-577.