

数字阵列雷达中多通道数字收发技术分析

闻华荣

四创电子股份有限公司 安徽 合肥 230093

摘要：数字阵列雷达作为现代雷达技术前沿，采用阵列天线、阵列信号处理及现代数字技术融合，展现出卓越性能。多通道数字收发系统是其核心，设计要求包括发射通道功率、增益及幅相一致性，接收通道增益、幅相稳定性及可靠性。实现技术涉及I/Q基带信号分离、大容量数据传输解决、通道均衡与校准，以及系统稳定性与幅相一致性保障。未来，该技术将向更高性能、智能化及更广泛应用场景拓展。

关键词：数字阵列雷达；多通道数字收发技术；实现与挑战

引言：数字阵列雷达，作为现代雷达技术的集大成者，正以其高精度、多任务和自适应抗干扰等显著优势，引领雷达系统的发展潮流。其中，多通道数字收发技术作为数字阵列雷达的关键组成部分，对于提升雷达系统的性能至关重要。本文将深入分析多通道数字收发技术的核心原理、设计要求及其在实际应用中的挑战，旨在为该领域的理论研究和科技进步贡献一份力量，推动数字阵列雷达技术的进一步发展和应用。

1 数字阵列雷达技术概述

1.1 数字阵列雷达的定义与基本原理

(1) 阵列天线技术。数字阵列雷达(DAR)是基于阵列天线技术发展而来的新型雷达系统。阵列天线技术通过排列多个天线单元，形成具有特定方向性的波束，

增强了雷达在特定方向上的探测能力。(2) 阵列信号处理技术。数字阵列雷达的核心在于其阵列信号处理技术。该技术通过数字方式对每个天线单元接收到的信号进行加权、延迟和叠加，从而实现了数字波束形成。这一过程能够灵活调整波束的指向和形状，使得雷达系统能够在复杂电磁环境中精确探测目标。(3) 现代数字技术融合。数字阵列雷达融合了现代数字技术，如直接频率合成、高速数据传输和高性能信号处理等。这些技术的应用使得雷达系统具有更高的精度、灵活性和可靠性，同时也降低了功耗和复杂度。

1.2 数字阵列雷达的性能特点与应用优势

(1) 性能特点：

性能特点	具体描述	优势体现
波束扫描速度快	数字阵列雷达的波束扫描速度极快，通常低于微秒量级。	能够使雷达系统对目标变化做出迅速响应，尤其适用于对高速目标进行精确跟踪。比如在追踪高速飞行的导弹或战机时，快速的波束扫描能实时获取目标的位置信息，保证跟踪的准确性。
可同时发射与接收多个波束	该雷达具备同时发射和接收多个波束的能力。	极大地提升了雷达系统的多任务处理能力。在同一时间内，能够对多个目标进行探测、跟踪和识别，有效提高了雷达的工作效率和信息获取量。例如在复杂的空战环境中，可以同时监测多个敌方目标的动向。
自适应抗干扰能力强	采用数字方式处理信号，能够自适应地抑制各种干扰。	即使处于复杂的电磁环境中，也能保持稳定的探测性能，有效抵御敌方的干扰措施，保障雷达系统的正常运行。如在电子战环境下，可通过自适应调整信号处理方式来排除干扰信号的影响。

(2) 在军事与民用领域的应用实例：在军事领域，数字阵列雷达广泛应用于地面防空反导监视、机载预警雷达和战场监视等方面。在民用领域，数字阵列雷达也展现出巨大的应用潜力，如气象观测、空中交通管制和海洋监测等。

2 多通道数字收发系统的基本设计要求

2.1 发射通道设计要求

(1) 功率一致性：在多通道数字收发系统中，每个

发射通道的输出功率必须保持一致，这是确保系统整体性能稳定的关键。功率不一致会导致信号传输的不均匀，从而影响雷达或通信系统的探测或通信距离。因此，设计过程中需对发射通道的功率进行精确控制，并通过校准和测试来验证其一致性。(2) 增益一致性：增益一致性是指各个发射通道的增益值在相同条件下应保持一致。增益的不一致会导致信号强度的差异，从而影响信号的接收效果。为了实现增益一致性，需要在设计

过程中对每个通道的增益进行精确测量和调整,以确保其在工作频段内保持恒定^[1]。(3)幅相稳定性:幅相稳定性是指发射通道在长时间工作过程中,其幅度和相位应保持相对稳定。这是确保信号质量的重要因素。为了实现幅相稳定性,需要采用高质量的元器件和稳定的电路设计,并通过严格的测试来验证其性能。

2.2 接收通道设计要求

(1)增益一致性与幅相稳定性:接收通道需确保多路增益一致性和幅相稳定性,这对系统整体性能至关重要。设计时应选用高质量滤波器和放大器,保证信号准确传输与处理。同时,需精确测量和调整接收通道的增益和相位,以满足系统对信号质量的严格要求。(2)中频采样与模拟接收通道可靠性:中频采样通道作为接收关键,其可靠性影响信号采样质量和系统性能。设计时需选用高性能ADC和采样电路,确保信号准确采样转换。此外,多路模拟接收通道的可靠性亦需重视,可通过冗余设计和故障检测机制提升可靠性,及时发现并处理潜在故障。(3)满足批量生产要求的性能:在满足技术要求基础上,多通道数字收发系统还需具备批量生产所需的性能特性。这涵盖设计的可扩展性、元器件易获取性、生产工艺可行性及成本控制等方面。为实现批量生产,设计过程中应充分考量生产工艺和成本,采用标准化设计方法和测试流程,确保产品质量一致。通过综合考量这些因素,可提升系统整体性能和生产效率,满足市场需求。

3 多通道数字收发技术的实现与挑战

3.1 I/Q基带信号的分离与数字化接收机技术

(1)I/Q信号的生成与处理:I/Q基带信号是多通道数字收发系统的核心,由同相(I)和正交相(Q)分量构成复数信号。生成阶段,通过数字信号处理(DSP)算法产生I/Q信号,经数字上变频器(DUC)转为模拟射频信号发射。接收端的数字化接收机技术是关键,先将射频信号转换为中频信号,再经模数转换器(ADC)变为数字信号,最后通过数字下变频器(DDC)转换为I/Q基带信号,便于后续DSP处理,实现信号数字化与可编程性,赋予系统高灵活性与扩展性^[2]。(2)数字化接收机技术的应用。数字化接收机技术在多通道数字收发系统中具有广泛的应用。首先,它使得系统能够接收和处理多通道信号,提高了系统的并行处理能力。其次,通过数字信号处理算法,可以对接收到的信号进行滤波、解调和解码等操作,从而提高了系统的抗干扰能力和信号质量。此外,数字化接收机技术还使得系统能够自适应地调整参数,以应对不同的通信环境和需求。

3.2 大容量数据传输问题的解决

(1)数据传输速率的提升。多通道数字收发系统需要处理大量的数据,因此数据传输速率的提升是技术实现的关键。为了应对这一挑战,可以采用先进的通信协议和数据压缩技术来优化数据传输。此外,通过使用高速的模数转换器(ADC)和数模转换器(DAC),以及高带宽的数字接口(如PCIe、JESD204B等),可以显著提升数据传输速率,从而满足系统对高数据吞吐量的需求。(2)数据处理算法的优化。除了提升数据传输速率外,数据处理算法的优化也是解决大容量数据传输问题的重要手段。通过采用高效的数字信号处理算法,如快速傅里叶变换(FFT)、滤波和自适应算法等,可以实现对信号的快速、准确处理。此外,通过并行处理和分布式计算等技术手段,可以进一步提高数据处理的速度和效率。

3.3 通道均衡与校准技术

(1)通道均衡技术的原理与实现。在多通道数字收发系统中,各通道因频率响应、相位偏移、增益失配等差异,会降低信号质量。通道均衡技术通过补偿差异,确保各通道输出信号一致。其原理是调整各通道传输特性,使频率响应和相位特性相同,一般通过数字滤波器实现,滤波器依据预先测量的通道差异设计。实际应用中,该技术能有效提升系统信号质量与通信性能。(2)互耦校准技术(MCT)在通道校准中的应用。多通道数字收发系统存在互耦效应,一个通道信号会干扰其他通道,致使信号质量变差、通信性能降低。MCT技术通过测量通道间互耦效应,依据结果补偿调整通道。此校准方法显著增强系统抗干扰能力,提升信号质量,优化通信性能。而且,MCT技术具备自适应性和可编程性,能根据不同通信环境与需求灵活调整,是通道校准的先进技术方^[3]案。

3.4 系统稳定性与幅相一致性保障

(1)稳定性与幅相一致性的重要性。系统稳定性与幅相一致性是多通道数字收发系统性能的关键因素。稳定性是指系统在面对外部干扰和内部变化时能够保持其性能的稳定。幅相一致性则是指各通道之间的幅度和相位差异应保持在一定范围内,以确保系统的信号质量和通信性能。系统稳定性和幅相一致性的重要性在于它们直接决定了系统的通信质量和可靠性。如果系统不稳定或幅相一致性差,那么就会导致信号质量的下降和通信性能的恶化。因此,在设计和实现多通道数字收发系统时,必须充分考虑这两个因素。(2)相关保障措施与技术手段。为了保障系统的稳定性和幅相一致性,可以采

取以下措施和技术手段：使用高质量的元件和稳定的电路设计，以减少内部噪声和干扰的影响；对系统进行严格的测试和校准，以确保各通道的性能符合规格要求；采用先进的自适应滤波和均衡技术，以实时调整通道的传输特性并补偿外部干扰；实施温度控制和电源管理策略，以减少环境变化对系统性能的影响；定期维护和更新系统，以确保其长期稳定运行^[4]。

4 未来发展趋势与展望

4.1 数字阵列雷达技术的创新方向

(1) 跨学科融合创新：数字阵列雷达技术的发展离不开多学科知识的融合。未来，随着计算机科学、信息论、材料科学等学科的深入发展，数字阵列雷达将实现更精细化的波束控制、更高效的信号处理和更强大的数据处理能力。例如，通过引入人工智能和机器学习技术，数字阵列雷达可以自动优化波束形成，提高目标检测和跟踪的精度。(2) 新技术融合创新：随着5G通信技术、量子技术等新兴技术的不断成熟，数字阵列雷达将迎来新一轮的技术革新。5G通信技术的高带宽、低延迟特性将为数字阵列雷达提供更快的数据传输速度和更稳定的通信链路，从而支持更复杂的雷达网络和数据融合。量子技术的引入则可能为数字阵列雷达带来革命性的性能提升，如利用量子纠缠实现超精密的测量和定位。(3) 面向实际应用创新：数字阵列雷达的创新将更加注重实际应用需求。例如，针对军事领域的隐身目标探测、电子战等需求，数字阵列雷达将发展出更高效的目标检测和识别算法，以及更强大的电子对抗能力。在民用领域，数字阵列雷达将广泛应用于气象观测、空中交通管制、微波遥感等领域，为社会提供更为精准的服务和保障。

4.2 多通道数字收发技术的未来发展趋势

(1) 高性能、高可靠性的收发系统设计：随着通信技术的不断发展，多通道数字收发系统需要满足更高的性能指标和可靠性要求。未来，收发系统将采用更先进的半导体器件、多功能芯片和新型材料，以提高系统的集成度、功耗效率和信号处理能力。同时，通过优化电

路设计、提高制造工艺水平等手段，将进一步提升系统的可靠性和稳定性。(2) 智能化、自适应的通道校准与均衡技术：为了实现多通道数字收发系统的高性能通信，智能化、自适应的通道校准与均衡技术将成为未来发展的重要方向。通过引入人工智能和机器学习算法，系统可以自动识别和补偿通道之间的差异和干扰，实现更精确的校准和均衡。这将有助于提高系统的通信质量和稳定性，降低维护成本。(3) 更广泛的应用场景拓展：随着5G、物联网等技术的普及和应用，多通道数字收发技术将拓展到更广泛的领域。例如，在智能家居、智慧城市、智能制造等领域，多通道数字收发技术将为实现万物互联提供强有力的支持。同时，随着技术的不断发展和成本的降低，多通道数字收发技术也将逐渐进入普通消费者的日常生活，为人们带来更加便捷和智能的通信体验。

结束语

综上所述，多通道数字收发技术在数字阵列雷达中扮演着至关重要的角色，不仅决定了雷达系统的性能上限，也为应对复杂电磁环境提供了有力保障。随着技术的不断进步和创新，未来的数字阵列雷达将更加智能化、自适应，而多通道数字收发技术也将持续演进，以适应更高性能、更广应用场景的需求。我们有理由相信，在多通道数字收发技术的推动下，数字阵列雷达将在更多领域发挥重要作用，为人类社会的发展贡献更多智慧与力量。

参考文献

- [1]管胜果.数字阵列雷达收发组件自动测试技术研究
与实现[J].文化科学,2020,(10):104-105.
- [2]朱庆明.数字阵列雷达述评[J].信号与信息处理,2020,(03):31-32.
- [3]王,乐,张诗煜,刘振兴.数字阵列雷达技术研究[J].建筑技术科学,2023,(08):86-87.
- [4]陈聪.数字阵列雷达DBF模块设计与实现[J].建筑技术科学,2025,(04):40-41.