

雷达信号处理中过采样技术的应用方法

李浩然 赵施斌

上海航天电子技术研究所 上海 201109

摘要: 随着现代雷达系统对目标探测精度与抗干扰能力要求的持续提升,过采样技术已成为突破传统信号处理瓶颈的关键手段。本文聚焦雷达信号处理中的过采样技术。首先阐述过采样技术在提高目标检测精度、增强抗干扰能力、优化数字信号处理流程等方面的优势。接着详细介绍其应用方法,包括模拟前端设计、高速ADC选择与应用等多个环节。同时指出该技术面临数据量增加、硬件成本与技术要求提升、算法复杂度增加等挑战。最后针对这些挑战,提出优化数据处理架构、推动硬件技术发展与创新、优化与改进算法等应对策略,为雷达信号处理中过采样技术的有效应用提供参考。

关键词: 雷达信号处理; 过采样技术; 应用方法; 挑战与对策

引言: 雷达作为重要的探测设备,在军事、民用等诸多领域发挥着关键作用。雷达信号处理的质量直接影响其性能,而过采样技术是提升信号处理效果的重要手段。随着科技发展,对雷达的探测精度、抗干扰能力等要求日益提高。过采样技术通过提高采样频率,能够获取更丰富的信号信息,为后续处理提供更有力的支持。深入研究过采样技术在雷达信号处理中的应用方法,有助于充分发挥其优势,克服应用过程中面临的挑战,推动雷达技术不断进步,更好地满足各领域对雷达性能的需求。

1 过采样技术在雷达信号处理中的优势

1.1 提高目标检测精度

过采样技术通过以远高于奈奎斯特频率的速率对雷达回波信号进行采样,能获取更丰富的信号细节。在目标检测中,这些细节信息至关重要。例如,在检测微弱目标时,常规采样可能遗漏目标的关键特征,导致漏检。而过采样可捕捉到目标信号的细微变化,使目标在信号中的特征更明显。同时,更多的采样点能更精确地描绘目标信号的波形,提高对目标位置、速度等参数的估计精度,降低估计误差,从而显著提升雷达在复杂环境下对各类目标的检测能力,为后续的决策提供更准确的依据。

1.2 增强抗干扰能力

雷达在实际应用中会受到各种干扰,如杂波干扰、人为干扰等。过采样技术为增强抗干扰能力提供了有效途径。一方面,更高的采样率能更准确地捕捉信号的瞬时特征,使雷达可以区分出真实目标信号与干扰信号在细微特征上的差异,从而更有效地抑制干扰。另一方面,过采样增加了信号的冗余度,利用数字信号处理算

法,如自适应滤波等,可以从大量采样数据中提取出真实目标信号,削弱干扰的影响。即使在强干扰环境下,也能保证雷达对目标的有效检测和跟踪,提高雷达系统的稳定性和可靠性^[1]。

1.3 优化数字信号处理流程

过采样技术在雷达数字信号处理流程中具有显著的优化作用。首先,更多的采样数据为后续处理提供了更丰富的信息基础,使得一些复杂的信号处理算法,如高分辨率的频谱分析算法,能够更准确地实施,提高信号分析的精度。其次,过采样有助于降低量化噪声对信号的影响,在后续的数字滤波等处理环节中,可简化滤波器的设计,降低滤波的复杂度。此外,过采样产生的冗余数据可通过合理的降采样策略进行处理,在保证信号质量的前提下,减少数据量,提高整个数字信号处理流程的效率和实时性,使雷达系统能够更快速地响应目标变化。

2 过采样技术在雷达信号处理中的应用方法

2.1 模拟前端设计

在雷达信号处理中运用过采样技术,模拟前端设计是极为关键的起始步骤,其设计优劣直接影响后续信号处理效果。(1)天线设计至关重要。天线作为接收雷达回波信号的“耳目”,需依据雷达的工作频段、探测目标特性等因素精心设计。要确保天线具有合适的增益和波束宽度,以高效接收目标反射的微弱信号,同时减少外界无关信号的干扰,为过采样提供丰富且准确的目标信息来源。(2)低噪声放大器(LNA)的选择与布局不容忽视。LNA紧邻天线,其作用是将接收到的微弱信号进行放大。在过采样场景下,LNA必须具备极低的噪声系数,以避免在放大信号过程中引入过多噪声,影响信号

质量。同时,要保证其增益稳定性,防止因增益波动导致信号失真。(3)滤波器的设计是模拟前端的关键环节。过采样会产生大量数据,其中可能混杂各种噪声和干扰信号。合理设计滤波器,如采用带通滤波器,能够精准滤除带外噪声和干扰,只允许目标信号所在频段的信号通过,从而提高信号的信噪比,为后续的高速模数转换器(ADC)采样提供干净、准确的模拟信号,保障过采样技术在雷达信号处理中有效发挥作用。

2.2 高速ADC的选择与应用

在雷达信号处理采用过采样技术时,高速模数转换器(ADC)的选择与应用是核心环节,对系统性能起着决定性作用。(1)采样速率是选择高速ADC的关键指标。过采样要求ADC的采样速率远高于信号最高频率的两倍,以获取更丰富的信号细节。需根据雷达的工作频段和信号特性,精确计算所需采样速率,确保能完整捕捉目标信号的瞬时变化,避免因采样不足导致信号失真,影响后续处理对目标特征的准确提取。(2)分辨率不容忽视。分辨率决定了ADC将模拟信号转换为数字信号时的精度。高分辨率的ADC能够更细腻地量化信号幅度,减少量化误差,提高信号的保真度。在雷达信号处理中,这有助于更精确地检测微弱目标信号,提升目标检测的灵敏度和准确性。(3)ADC的动态范围和线性度也至关重要。动态范围决定了ADC能处理的最大和最小信号幅度之比,良好的动态范围可确保ADC在面对强弱不同的雷达回波信号时都能正常工作。而高线性度能保证ADC在整个输入范围内输出与输入呈严格的线性关系,避免非线性失真对信号质量的破坏,保障过采样技术在雷达信号处理中稳定、高效地运行。

2.3 数字滤波与处理

在雷达信号处理中运用过采样技术时,数字滤波与处理是精准提取目标信息、提升信号质量的关键环节。(1)选择合适的数字滤波器类型至关重要。过采样会产生大量包含噪声和干扰的数据,有限脉冲响应(FIR)滤波器因其线性相位特性,能保证信号在滤波过程中不产生相位失真,适用于对相位要求严格的雷达信号处理,可有效滤除带外噪声。无限脉冲响应(IIR)滤波器则具有计算量小、效率高的优点,在实时性要求较高的场景中能快速处理信号,去除特定频段的干扰。(2)优化滤波器参数是提升滤波效果的关键。要根据雷达信号的频谱特性和噪声分布,精确设计滤波器的截止频率、通带波纹和阻带衰减等参数。通过合理调整这些参数,使滤波器在最大程度保留目标信号的同时,有效抑制噪声和干扰,提高信号的信噪比。(3)采用先进的数字信号处理算

法。例如,自适应滤波算法能根据输入信号的统计特性自动调整滤波器参数,在复杂多变的电磁环境中,实时跟踪并抑制干扰。此外,小波变换等时频分析方法可对非平稳雷达信号进行多尺度分析,准确提取信号中的瞬态特征,为后续的目标检测和识别提供更丰富的信息^[2]。

2.4 时钟同步与相位噪声抑制

在雷达信号处理采用过采样技术时,时钟同步与相位噪声抑制是保障系统性能稳定、信号质量可靠的核心要点。(1)时钟同步是确保过采样系统各模块协调工作的基础。过采样涉及多个高速数据采集与处理单元,若时钟不同步,会导致数据采样时间错位,使后续信号拼接与分析出现误差,严重影响目标检测与参数估计的准确性。因此,需采用高精度的时钟分配网络,将主时钟信号精准分发至各个子系统,同时利用锁相环(PLL)技术对时钟信号进行频率和相位锁定,保证各模块时钟的高度一致性,实现数据的同步采集与处理。(2)相位噪声抑制对于提升信号质量至关重要。相位噪声会使采样信号的相位产生随机波动,导致信号频谱展宽,降低信号的信噪比和分辨率。为抑制相位噪声,一方面要选用低相位噪声的时钟源,如高稳定度的晶体振荡器或原子钟,从源头上减少噪声引入;另一方面,在信号处理链路中插入相位噪声滤波器,通过数字信号处理算法对相位噪声进行估计和补偿,削弱其对信号的影响,从而提高过采样信号的纯净度和可靠性,为雷达准确探测目标提供有力支撑。

2.5 自适应降采样与数据压缩

在雷达信号处理运用过采样技术的过程中,自适应降采样与数据压缩是优化系统资源利用、提升处理效率的关键手段。自适应降采样能够依据雷达信号的实时特征动态调整采样率。过采样会生成海量数据,其中部分数据可能对目标检测和识别贡献有限。通过分析信号的频谱特性、能量分布等信息,自适应算法可判断哪些时段或频段的信号包含关键目标信息,在这些区域保持较高采样率以精准捕捉细节;而对于信息量较少的区域,则降低采样率,减少不必要的的数据量。这样既能保证对重要目标的可靠检测,又能显著降低后续数据处理负担。数据压缩则进一步对采样后的数据进行优化。采用无损压缩算法,如霍夫曼编码,可在不丢失任何信息的前提下,减少数据存储空间和传输带宽需求。对于一些对精度要求稍低的场景,有损压缩算法如小波压缩,能在可接受的误差范围内,大幅压缩数据量。通过自适应降采样与数据压缩的协同作用,可有效缓解过采样带来的数据压力,使雷达系统在有限的硬件资源下,实现更

高效的目标探测与跟踪,提升整体作战效能。

3 过采样技术在雷达信号处理中面临的挑战

3.1 数据量增加带来的处理压力

过采样技术大幅提高了采样频率,导致雷达接收到的数据量呈几何级数增长。海量数据对雷达系统的处理能力提出严峻挑战,现有信号处理单元可能因数据吞吐量过大而出现处理延迟,影响实时性。存储系统也面临巨大压力,需要更大容量的存储设备来保存数据,不仅增加成本,还可能因存储速度跟不上数据产生速度,造成数据丢失。

3.2 硬件成本与技术要求的提升

实现过采样,需采用高速、高精度的模数转换器(ADC)等硬件设备。这类高性能硬件的研发与生产成本高昂,直接推高了雷达系统的硬件成本。同时,过采样对硬件的技术指标要求极为严苛,如ADC需具备极快的转换速度和低噪声特性,时钟源要提供高度稳定和精确的时钟信号。

3.3 算法复杂度增加

过采样产生的大量数据使得传统雷达信号处理算法难以直接适用,需要开发更复杂、高效的算法来处理。例如,在目标检测与参数估计方面,要设计能处理海量数据并准确提取目标信息的算法,这涉及复杂的数学运算和模型构建。在抗干扰算法上,为从大量数据中有效分离出干扰和目标信号,算法的复杂度大幅上升。

4 过采样技术在雷达信号处理应用的对策策略

4.1 优化数据处理架构

为应对过采样技术带来的数据处理压力,优化数据处理架构势在必行。可采用分布式处理架构,将庞大的数据处理任务分配到多个处理单元并行执行,提高数据处理效率。例如,将雷达信号的预处理、特征提取和目标识别等环节分配给不同模块,各模块协同工作,减少单点处理负担。同时,引入流水线处理技术,使数据在不同处理阶段连续流动,提高数据吞吐量。此外,设计高效的数据缓存和管理机制,合理调度数据,避免数据拥堵和丢失。通过优化数据处理架构,能够充分利用系统资源,提升整体处理能力,确保在处理过采样产生的大量数据时,系统仍能保持高效、稳定的运行状态,满足雷达信号处理的实时性要求。

4.2 硬件技术的发展与创新

硬件技术的发展与创新是推动过采样技术在雷达信号处理中有效应用的关键。一方面,要不断提升模数转换器(ADC)的性能,研发更高采样速率、更低噪声和更高精度的ADC芯片,以满足过采样对高速、高精度数据采集的需求。另一方面,加强时钟源技术的研发,提供更稳定、精确的时钟信号,确保过采样系统的同步性和稳定性。此外,探索新型存储技术,提高数据存储的速度和容量,解决海量数据存储问题。

4.3 算法优化与改进

针对过采样技术带来的算法复杂度增加问题,算法优化与改进是重要策略。在目标检测算法方面,研究基于机器学习和深度学习的算法,利用其强大的特征提取和分类能力,从海量数据中准确检测目标,降低算法复杂度。在抗干扰算法上,开发自适应抗干扰算法,根据干扰环境的变化自动调整算法参数,提高抗干扰效果的同时减少计算量。此外,对现有算法进行优化,采用更高效的数值计算方法和数据结构,提高算法的执行效率^[1]。

结束语

在雷达信号处理领域,过采样技术的应用为提升系统性能开辟了新路径。从模拟前端精心设计以捕获高质量信号,到高速ADC精准采样与转换;从数字滤波与处理有效去除噪声干扰,到时钟同步与相位噪声抑制保障信号稳定性;再到自适应降采样与数据压缩优化资源利用,各环节紧密配合,充分发挥了过采样技术的优势。未来,随着技术的持续进步,过采样技术将不断优化,与其他先进技术深度融合,进一步提升雷达信号处理的精度、速度与可靠性,为国防安全、航空航天等领域提供更强大的技术支撑,推动雷达技术迈向新的发展高度。

参考文献

- [1]曹舒雅,张文旭,赵桐,马丹.基于DQN的雷达智能干扰决策方法[J].制导与引信,2024,45(02):11-19.
- [2]王洋.雷达通信一体化共享信号技术探讨[J].信息通信,2020(07):203-204.
- [3]韩潇弘毅,刘平,姬伟杰,吴君辉,刘映希.DS-OFDM雷达通信一体化共享信号性能分析[J].电光与控制,2021,24(10):90-95+101.