

# 二次雷达数字收发应答信号处理技术研究

王志鸿 闻华荣

四创电子股份有限公司 安徽 合肥 230093

**摘要:** 二次雷达数字收发应答信号处理技术是现代空管与军事侦察领域的核心技术,该技术通过数字信号处理手段实现询问-应答信号的生成、调制、解调及目标信息提取,突破了传统模拟雷达在精度、抗干扰能力及多目标处理方面的局限。基于此,本文针对二次雷达数字收发应答信号处理技术进行了研究,涉及数字收发系统架构、数字收发关键技术、信号生成与发射、空间传播与接收、应答信号解调与译码等方面,旨在为下一代智能雷达系统的研发提供理论参考。

**关键词:** 二次雷达; 数字收发; 应答信号处理

引言: 二次雷达(ATCRBS)作为空中交通管制与军事目标识别的核心设备,通过“询问-应答”机制实现目标身份、高度及速度信息的精确获取。传统模拟雷达受限于硬件电路的固定性,在多目标处理、抗干扰能力及系统升级方面存在显著短板。随着数字技术的突破,数字收发架构逐渐成为二次雷达的主流方向,数字技术通过软件定义功能,实现了信号处理算法的灵活配置。

## 1 二次雷达数字收发技术基础

### 1.1 数字收发系统架构

数字收发系统架构是二次雷达实现高效信号处理的核心框架,其设计需兼顾发射与接收的协同性、信号处理的实时性以及系统整体的稳定性。(1)发射机部分以数字调制为起点,通过基带信号生成与数字上变频技术将低频数据流映射至高频载波,这一过程依赖直接数字频率合成器实现载波频率的精确控制。功率放大环节通过多级放大器级联提升信号强度,并在末级采用线性化设计以抑制邻道干扰,最终输出信号经滤波器抑制带外噪声后通过天线辐射至空间。(2)接收机部分从天线捕获的微弱回波信号开始,首先由低噪声放大器对信号进行初级放大,其噪声系数直接影响系统灵敏度,因此需采用高电子迁移率晶体管或砷化镓场效应管等低噪声器件<sup>[1]</sup>。混频环节通过本地振荡器与输入信号相乘实现频谱搬移,将高频信号转换至中频或基带,此过程中镜像频率抑制是关键技术指标,通常采用正交混频结构结合多相滤波器实现。中频处理模块进一步对信号进行放大与滤波,通过自动增益控制动态调整信号幅度以适应模数转换器的输入范围。(3)数字信号处理器作为系统核心,采用FPGA与DSP协同架构实现高速并行计算,FPGA负责实现实时性要求高的信号预处理任务,包括脉冲检测、门限比较、匹配滤波等,其可重构特性支持多

模式工作切换。DSP则承担复杂算法运算,如译码、目标跟踪、数据关联等,通过优化指令集与流水线设计提升处理效率。两者通过高速总线互联,构建起从信号采集到信息提取的完整处理链条,确保系统在复杂电磁环境下仍能保持低延迟、高可靠性的运行状态。

### 1.2 数字收发关键技术

(1)直接数字频率合成技术通过相位累加器生成离散相位序列,经波形查找表转换为幅度值,再由DAC和低通滤波器输出平滑模拟信号,其核心优势在于频率分辨率高、转换时间短且相位连续可控,通过调整频率控制字可实现纳秒级频率切换,同时支持线性调频、跳频等多种调制方式,广泛应用于雷达、通信等领域。(2)零中频接收技术通过正交混频器将射频信号直接下变频至基带,省略中频处理环节,利用同相和正交两路信号保留完整信息,其结构简化降低了硬件复杂度与成本,支持单片集成。但需解决直流偏移、本振泄漏及I/Q不平衡等技术缺陷,通常采用数字校准算法进行补偿,现已成为智能手机、Wi-Fi等设备的主流架构。(3)软件无线电架构以通用硬件平台为基础,通过软件编程实现信号调制解调、信道分离等功能,其核心在于将A/D转换器尽可能靠近射频前端,利用DSP的强大处理能力实现多标准兼容。该架构支持灵活的功能重构与升级,可适应不同通信协议需求,典型应用包括军事通信、卫星通信及5G基站设备。(4)高速ADC/DAC技术是数字收发的关键接口,其中ADC负责将模拟信号转换为数字信号,DAC则实现数字信号到模拟信号的逆变换,随着通信带宽扩展至GHz级,对ADC/DAC的采样率、分辨率及动态范围提出更高要求。现代设计采用JESD204B高速串行接口提升数据传输效率,并通过交织、平均等技术进一步优化性能,其在雷达信号处理、卫星通信等领域发挥着不可

替代的作用。

### 1.3 数字收发优势分析

数字收发技术的核心优势集中体现在灵活性、精度与集成度三个维度。(1)灵活性方面,其通过软件定义功能实现多模式、多频段的动态切换能力,无需硬件重构即可支持不同通信协议或雷达体制的兼容运行。这种特性源于数字信号处理的可编程性,系统可通过更新算法或配置参数快速适应任务需求变化,例如在军事侦察中同时实现搜索、跟踪与识别模式切换,或在民用通信中无缝兼容5G与卫星通信频段。(2)精度提升是数字收发的另一关键优势,其通过减少模拟环节有效抑制了噪声与失真的累积效应。传统模拟收发链路中,混频器、滤波器等器件的非线性特性会引入相位噪声、谐波失真等问题,而数字技术将信号处理集中在数字域完成,仅保留必要的模拟前端,从源头上降低了信号劣化风险<sup>[2]</sup>。数字下变频技术通过精确的采样与量化,避免了模拟混频中的镜像频率干扰,配合数字滤波与校准算法,可实现微弱信号的高保真提取,显著提升雷达的测距精度与通信的误码率性能。(3)集成度方面,数字收发通过功能模块的数字化重构大幅压缩了系统体积与功耗。软件无线电架构将混频、滤波等传统模拟功能转化为数字算法,减少了分立器件的使用数量,结合先进封装技术可实现单芯片集成,例如将射频前端与基带处理集成于同一SoC芯片中。这种高度集成不仅降低了硬件复杂度,还通过优化信号路径缩短了传输延迟,同时减少了模拟器件的静态功耗。

## 2 二次雷达应答信号处理流程

### 2.1 信号生成与发射

(1)询问信号编码作为信息承载的基础,需根据不同模式需求设计脉冲序列结构。A模式采用固定间隔的脉冲对编码,通过脉冲位置差异区分不同询问类型;C模式在A模式基础上扩展为三脉冲结构,增加高度信息编码维度;S模式则引入24位地址码与数据块组合,支持点名式询问与扩展信息传输,其脉冲序列设计需满足时序精度与抗干扰要求,通过优化脉冲宽度与间隔降低多目标冲突概率。(2)数字调制技术将编码后的基带信号映射至高频载波,BPSK调制通过相位反转实现二进制数据传输,具有抗噪声能力强、解调简单的特点,适用于远距离通信场景<sup>[3]</sup>。QPSK调制通过双比特符号映射将频谱效率提升一倍,在保持相同带宽下传输更多信息,但需更精确的载波同步以避免相位模糊。两种调制方式均通过数字上变频技术实现基带信号与载波的频谱搬移,利用数控振荡器生成精确的本地载波,配合数字混频器

完成信号调制,其优势在于相位连续性可控且参数调整灵活,可适应不同频段与调制速率需求。(3)发射功率控制与旁瓣抑制是确保系统性能的关键技术,功率控制通过动态调整发射机增益实现信号强度与传播距离的匹配,避免近距离过载或远距离衰减,并降低对其他设备的干扰。旁瓣抑制采用间歇照射同步技术,通过在主波束发射期间周期性关闭旁瓣方向的发射信号,抑制非目标方向的应答响应,其核心在于精确控制发射时序与波束指向,结合天线方向图优化设计,将旁瓣电平压缩至主瓣以下,从而减少虚假目标数量并提升信噪比。

### 2.2 空间传播与接收

(1)电磁波在空间传播过程中遵循特定物理模型,其路径损耗受频率、距离及环境因素共同影响。自由空间传播模型假设信号在理想无损耗介质中扩散,损耗仅与传播距离和频率相关,而实际场景中需考虑地面反射、大气吸收及障碍物遮挡等效应,这些因素会导致信号能量衰减加速并产生多径干扰。路径损耗计算需综合环境参数,通过经验模型或射线追踪法评估信号强度变化,为接收机灵敏度设计提供依据,尤其在复杂地形或城市环境中,多径效应可能引发信号相位抵消或增强,需通过分集接收技术降低影响。(2)天线方向图决定了空间能量分布特性,其主瓣宽度与旁瓣电平直接影响信号覆盖范围及抗干扰能力。波束形成技术通过调整天线阵列中各单元的相位与幅度,实现波束指向的动态控制,在发射端可集中能量于目标方向以提升增益,在接收端则通过空间滤波抑制非目标方向干扰。数字波束形成技术进一步扩展了灵活性,通过实时计算各通道权重,支持多波束同时形成及自适应零陷生成,有效对抗有意干扰或强杂波环境,同时保持对弱信号的检测能力。(3)接收信号预处理是数字接收链路的关键环节,需在模数转换前完成信号调理与频谱搬移。滤波环节通过带通滤波器抑制带外噪声与干扰,其带宽设计需兼顾信号保真度与邻道抑制需求,通常采用表面声波滤波器或集成滤波器实现低插损、高选择性特性。低噪声放大器对微弱信号进行初级放大,其噪声系数直接影响系统灵敏度,需采用高电子迁移率晶体管或低噪声场效应管等器件,并通过级联设计优化整体噪声性能。下变频环节将高频信号转换至中频或基带,通过正交混频器实现同相与正交分量分离,避免镜像频率干扰,确保后续模数转换器工作在线性区。

### 2.3 应答信号解调与译码

(1)数字下变频技术将中频或射频信号直接转换至基带,通过正交混频器生成同相与正交分量,避免模拟

混频中的镜像干扰,并利用数控振荡器实现载波频率的灵活调整,配合数字滤波器完成信道选择与噪声抑制,为后续处理提供低噪声、高保真的基带信号。而载波同步则是通过锁相环或反馈控制算法实现,其核心是消除收发端频率偏移与相位误差,确保解调信号与本地载波严格对齐,避免因相位跳变导致的数据错误,尤其在高速移动场景下需采用自适应算法动态跟踪载波变化。

(2) 脉冲检测环节通过匹配滤波或能量检测算法识别信号起始位置,匹配滤波器利用已知脉冲形状进行相关运算,在噪声背景下实现峰值检测,而能量检测则通过设定动态门限区分信号与噪声,门限值需根据噪声功率实时调整以避免误检或漏检<sup>[4]</sup>。门限比较后生成的脉冲位置信息进入译码模块,A模式译码通过解析脉冲对的间隔差异识别询问类型,C模式译码则进一步提取三脉冲序列中的高度编码信息,其核心在于时序对齐与状态机设计,确保在多目标环境下准确捕获有效脉冲。(3) 整个译码过程需兼顾实时性与准确性,通过流水线设计优化处理时延,同时集成错误检测与纠错机制,如奇偶校验或前向纠错编码,提升系统在低信噪比条件下的可靠性。此外,译码模块还需支持多模式兼容,通过软件配置实现A/C/S模式自动切换,满足不同场景下的任务需求。

#### 2.4 目标信息提取

(1) 距离测量基于时间延迟计算原理,通过测量询问信号发射时刻与应答信号接收时刻的时间差,结合电磁波传播速度推导目标距离,但需补偿系统内部处理时延、天线切换时延及传输线损耗引入的误差。(2) 方位测量采用单脉冲比幅测角技术,利用天线阵列中多个通道接收信号的幅度差异计算目标方向,和差波束形成是关键环节,通过同时产生和波束与差波束,比较两者幅度比值确定目标偏离天线主瓣轴线的角度,该技术具有测角精度高、响应速度快的特点,且无需机械扫描即可实现全空域覆盖,但需解决通道不平衡及相位误差对测角结果的影响,通常通过数字校准算法进行补偿。(3)

高度信息提取在C模式下通过解析应答信号中的脉冲编码实现,其编码规则将高度值映射为特定脉冲间隔组合,接收端通过时序测量与译码算法还原高度数据,但受编码位数限制,C模式高度分辨率较低;S模式则通过扩展数据块直接传输目标高度信息,采用更高精度的二进制编码格式,并支持气压高度与几何高度双重模式,满足不同应用场景需求<sup>[5]</sup>。(4) 速度信息提取依赖多普勒效应原理,当目标与雷达存在相对运动时,应答信号频率会发生偏移,通过测量频率偏移量可计算目标径向速度,但在传统二次雷达中,由于询问周期较长,多普勒频率测量精度受限,通常需结合S模式扩展数据中的速度字段进行修正,S模式通过周期性更新目标速度信息,并采用更高采样率的测量方式,显著提升了速度估计的准确性。

#### 结语

综上所述,二次雷达数字收发应答信号处理技术通过数字化重构传统雷达链路,实现了从信号生成到目标信息提取的全流程优化。未来,随着5G通信、人工智能等技术的融合,二次雷达将向更高集成度、更强智能化方向发展,数字收发技术不仅是二次雷达性能跃升的关键,更为空管系统、军事侦察等领域的数字化转型奠定了基础。

#### 参考文献

- [1]黄鑫.航管二次雷达假目标的产生与抑制[J].数字通信世界,2020,(07):67+69.
- [2]王文秀.民航二次雷达无时标数据时延监控研究[J].电子制作,2021,(03):69-70.
- [3]田百全.二次雷达数据重演分析系统设计[J].信息技术与信息化,2022,(06):168-171.
- [4]车达升,刘成,王东.风廓线雷达维修设备监理[J].设备监理,2020,(01):12-14.
- [5]杨贵.GFE(L)1型二次测风雷达的维护与维修[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021,(09):9.