

脉冲压缩技术在空管一次雷达中的应用

查 伟

四创电子股份有限公司 安徽 合肥 230000

摘 要：脉冲压缩技术通过发射宽脉冲并在接收端进行压缩处理，显著提升空管一次雷达的探测距离和距离分辨力。该技术采用线性调频（LFM）、非线性调频及相位编码等多种实现方式，解决了传统雷达在远距离探测中的能量分散与分辨力不足问题。在空管一次雷达中，脉冲压缩技术的应用增强了系统性能，为空中交通管理提供了更精确、更高效的飞行器监视手段。

关键词：脉冲压缩技术；空管一次雷达；应用

引言：随着航空业的蓬勃发展，空中交通流量急剧增加，对空管系统的精准度和效率提出了更高要求。空管一次雷达作为空中交通监控的关键设备，其性能直接影响到航空安全与效率。脉冲压缩技术，以其卓越的探测性能提升能力，被广泛应用于空管一次雷达中。该技术通过优化雷达信号的处理方式，实现了在不增加发射功率的前提下，显著提升雷达的作用距离和分辨力，为空管系统带来了革命性的进步。

1 脉冲压缩技术基本原理

1.1 脉冲压缩技术概述

脉冲压缩技术，作为一种先进的雷达信号处理技术，其核心目标在于提高雷达系统的探测性能和分辨能力。该技术通过发射具有较大时间宽度的脉冲信号，并在接收端采用特定方法处理回波信号，使得输出的脉冲信号在时间上被“压缩”变窄，从而在不增加发射机峰值功率的前提下，有效提升雷达的作用距离和距离分辨力。脉冲压缩技术的这一特性使其在现代雷达系统中，尤其是空管一次雷达中，得到了广泛应用。脉冲压缩技术的发展历程可以追溯到二战后期，随着雷达技术的快速发展，对雷达性能的要求也日益提高。传统的窄脉冲雷达虽然具有较高的距离分辨力，但受限于发射机的峰值功率，其作用距离往往受到限制。而宽脉冲雷达虽然能够增加作用距离，但距离分辨力却显著降低。为了克服这一矛盾，脉冲压缩技术应运而生，并逐渐成为雷达信号处理领域的研究热点。目前，脉冲压缩技术已经发展出了多种实现方式，包括线性调频脉冲压缩（LFM）、非线性调频脉冲压缩以及相位编码脉冲压缩等，这些技术在不同的雷达应用场景中发挥着重要作用。

1.2 脉冲压缩技术的基本思想

脉冲压缩技术的基本思想可以概括为“发射宽脉冲，接收窄脉冲”。具体来说，雷达系统首先发射一个

具有较大时间宽度的脉冲信号，这个信号通常被称为“宽脉冲”。当宽脉冲信号遇到目标并反射回雷达接收机时，接收机会接收到一个包含目标信息的回波信号。随后，通过采用特定的信号处理技术对回波信号进行处理，可以将其中的有效信息提取出来，并输出一个时间宽度远小于原发射脉冲的窄脉冲信号。这个窄脉冲信号不仅保留了目标的位置信息，还大大提高了雷达的距离分辨力。大时宽与大带宽信号的应用是脉冲压缩技术得以实现的关键。通过发射大时宽的脉冲信号，可以在不增加发射机峰值功率的前提下，增加雷达的作用距离。同时，通过引入大带宽的调制方式（如线性调频、非线性调频或相位编码等），可以在接收端实现脉冲信号的压缩，从而获得较高的距离分辨力。这种大时宽与大带宽信号的结合使用，使得脉冲压缩技术在雷达系统中具有独特的优势。

1.3 实现途径

（1）线性调频脉冲压缩（LFM）。线性调频脉冲压缩是最常见的脉冲压缩技术之一。在这种技术中，发射的脉冲信号其频率随时间线性变化，形成一个频率调制的宽脉冲。线性调频信号具有较大的时宽带宽积，这使得在接收端可以通过匹配滤波器实现脉冲信号的压缩。匹配滤波器是一种与发射信号波形相匹配的滤波器，它能够接收到的回波信号中的特定频率成分进行放大并压缩成窄脉冲输出。线性调频脉冲压缩技术的实现相对简单且效果显著，因此在雷达系统中得到了广泛应用。

（2）非线性调频脉冲压缩。与非线性调频脉冲压缩不同，非线性调频脉冲压缩技术中发射的脉冲信号其频率变化不再是线性的，而是根据特定的非线性函数进行调制。这种非线性调频方式可以使得信号具有更加复杂的频谱结构，从而在接收端实现更为精细的脉冲压缩。然而，非线性调频脉冲压缩的实现相对复杂，且对信号处理设

备的要求也较高。因此,在实际应用中相对较少见。

(3) 相位编码脉冲压缩。相位编码脉冲压缩技术则是通过改变发射脉冲信号的相位来实现脉冲压缩的。在这种技术中,发射的脉冲信号被分为多个子脉冲,每个子脉冲的相位根据特定的编码规则进行调制。接收端则通过采用与发射信号相位编码相匹配的解码器来恢复出目标的真实信息。相位编码脉冲压缩技术具有抗干扰能力强、易于实现多目标检测与跟踪等优点,在雷达系统中也具有一定的应用前景。然而,该技术的实现需要较为复杂的编码与解码算法支持,且对信号同步精度要求较高^[1]。

2 脉冲压缩技术在空管一次雷达中的应用

2.1 空管一次雷达概述

2.1.1 一次雷达的定义

空管一次雷达,作为空中交通管理系统的核心组成部分,是一种主动式雷达系统,不依赖于飞行器上的应答机或其他信号发射设备,而是直接通过发射无线电波并接收来自目标的反射回波来探测空中飞行目标。这种雷达系统能够实时提供目标的距离、速度、高度及方位角等关键信息。

2.1.2 一次雷达的作用

一次雷达在空管中扮演着至关重要的角色。它是空中交通管制员监控飞行活动、预防航空冲突、确保航空安全的主要工具。通过连续扫描空域并实时更新飞行器的位置信息,一次雷达为管制员提供了清晰、直观的空中交通态势图,支持其做出准确的决策和指挥。此外,一次雷达还能够在恶劣天气条件下或飞行器应答机失效时,提供必要的备份监视手段,确保空中交通的顺畅与安全。

2.1.3 一次雷达的工作原理

一次雷达的工作原理基于电磁波的传播与反射原理。雷达系统通过发射天线向空中发射一束无线电波脉冲,这些脉冲在空间中传播并遇到飞行器时会发生反射。反射回来的电磁波(即回波)被雷达的接收天线捕获,并经过一系列复杂的信号处理后,提取出飞行器的距离、速度、高度及方位角等信息。具体来说,雷达通过测量发射脉冲与接收回波之间的时间差来计算目标的距离,利用多普勒效应来测量目标的速度,并通过天线的方向性来确定目标的方向和高度。

2.1.4 一次雷达在空管中的重要性及应用场景

一次雷达在空管系统中的重要性不言而喻。它是空中交通管理的基石,为管制员提供了不可或缺的飞行器监视信息。无论是在繁忙的商业航空空域,还是在偏远的通用航空区域,一次雷达都发挥着不可替代的作用。此外,一次雷达还广泛应用于边境监视、海洋监视、灾难救援

等多种场景,为国家的安全与发展提供了有力支持。

2.2 脉冲压缩技术在一次雷达中的具体应用

2.2.1 脉冲压缩技术的实际效果

脉冲压缩技术通过发射宽脉冲信号并在接收端进行压缩处理,显著提升了雷达的作用距离和分辨力。这一技术解决了传统雷达在远距离探测时面临的能量分散和分辨力不足的问题。通过增加发射脉冲的宽度,脉冲压缩技术能够在保持发射功率不变的情况下,提高雷达的探测距离。同时,在接收端通过匹配滤波器对回波信号进行压缩处理,将宽脉冲信号压缩成窄脉冲信号,从而提高雷达的距离分辨力。这使得雷达系统能够在更远的距离上探测到更小的目标,并准确区分相邻目标。

2.2.2 不同脉冲压缩技术的对比与应用实例

(1) 线性调频(LFM)脉冲压缩。LFM脉冲压缩技术因其实现简单、性能稳定而广泛应用于空管一次雷达中。该技术通过发射频率随时间线性变化的宽脉冲信号,在接收端使用匹配滤波器进行压缩处理。LFM脉冲压缩技术不仅提高了雷达的作用距离和分辨力,还具有较强的抗干扰能力。在实际应用中,LFM脉冲压缩技术被用于远距离飞行器的探测和跟踪,为管制员提供了精确的目标信息。(2) 非线性调频脉冲压缩。与LFM不同,非线性调频脉冲压缩采用非线性的频率调制方式。这种技术能够产生更加复杂的频谱结构,从而在接收端实现更为精细的脉冲压缩。然而,由于其实现难度较大且对系统同步和校准要求较高,非线性调频脉冲压缩在空管一次雷达中的应用相对较少。但在一些需要高精度目标识别的特定场景中,如军事侦察和导弹制导等领域,该技术仍具有潜在的应用价值^[2]。(3) 相位编码脉冲压缩。相位编码脉冲压缩技术通过改变发射脉冲的相位来实现脉冲压缩。该技术具有抗干扰能力强、易于实现多目标跟踪等优点。在空管一次雷达中,相位编码脉冲压缩技术被用于复杂空域中多飞行器的监测与识别。通过引入独特的相位编码方式,雷达系统能够区分并跟踪多个目标,提高了空域管理的效率和准确性。

2.3 系统实现与优化

2.3.1 一次雷达中脉冲压缩系统的设计与实现

在空管一次雷达中实现脉冲压缩技术,需要设计一个高效、可靠的脉冲压缩系统。该系统包括发射机、接收机、信号处理器等多个模块。发射机负责产生具有特定调制方式的宽脉冲信号;接收机负责捕获和预处理来自目标的回波信号;信号处理器则负责对回波信号进行脉冲压缩处理,提取出目标的精确信息。为了实现这些功能,系统需要采用先进的数字信号处理技术(DSP)和

高速集成电路(ASIC)等硬件手段,以提高系统的处理速度和精度。

2.3.2 系统参数选择与性能优化方法

在脉冲压缩系统的实现过程中,系统参数的选择对系统性能具有至关重要的影响。以下是一些关键的系统参数选择与性能优化方法:(1)脉冲宽度与调制带宽。脉冲宽度和调制带宽是脉冲压缩技术中的两个核心参数。增加脉冲宽度可以提高雷达的发射能量,从而增加雷达的作用距离。然而,过宽的脉冲会导致距离分辨力下降。因此,在选择脉冲宽度时,需要权衡作用距离和分辨力之间的关系。同时,调制带宽的选择也至关重要。增加调制带宽可以提高雷达的距离分辨力,但也会增加系统的复杂度和成本。因此,在选择调制带宽时,需要根据实际需求进行权衡。(2)信号中心频率。信号中心频率的选择对雷达系统的探测性能和抗干扰能力具有重要影响。较高的中心频率可以提供更好的距离分辨力和抗干扰能力,但也会增加大气衰减和散射效应。因此,在选择信号中心频率时,需要综合考虑探测距离、目标特性以及环境因素。(3)脉冲重复频率(PRF)。脉冲重复频率决定了雷达系统能够探测到的目标最大速度。较高的PRF可以探测到更快的目标,但也会增加系统的数据处理量和复杂度。同时,过高的PRF还可能导致距离模糊现象。因此,在选择PRF时,需要根据目标的速度范围和系统的处理能力进行权衡。(4)接收机动态范围。接收机的动态范围决定了雷达系统能够接收和处理的最大信号强度范围。为了确保雷达系统能够准确探测到远距离的微弱目标,同时避免近距离强反射信号的饱和,需要选择具有足够动态范围的接收机^[3]。

2.3.3 脉冲压缩模块与其他雷达系统模块的集成与协同工作

(1)模块间的接口与通信。首先,脉冲压缩模块需要与其他模块建立清晰的接口标准和通信协议。这包括与发射机模块的接口,以确保宽脉冲信号的准确生成与传输;与接收机模块的接口,以接收并处理反射回波信号;以及与信号处理机和显控终端的接口,以实现目标信息的提取、处理与显示。通过标准化的接口和协议,

可以确保各模块之间的无缝连接和高效协同。(2)同步与校准。在雷达系统中,同步与校准是确保各模块协同工作的关键。对于脉冲压缩模块而言,其性能直接受到发射脉冲与接收回波之间同步精度的影响。因此,需要设计精确的同步机制,以确保发射脉冲与接收回波之间的时间差能够被准确测量和补偿。此外,还需要定期对雷达系统进行校准,以消除因设备老化、环境变化等因素引起的误差,确保脉冲压缩技术的有效实施。(3)系统优化与升级。随着技术的不断进步和空管需求的不断变化,雷达系统也需要不断优化和升级。对于脉冲压缩模块而言,可以通过引入更先进的调制方式、优化匹配滤波器的设计、提高信号处理算法的精度等方式来提升其性能。同时,还可以考虑将脉冲压缩技术与其他先进技术(如相控阵技术、数字波束合成技术等)相结合,以进一步提升雷达系统的整体性能。(4)故障检测与排除。在雷达系统的运行过程中,故障检测与排除是保障系统稳定运行的重要环节。对于脉冲压缩模块而言,需要建立完善的故障检测机制,实时监测模块的运行状态,及时发现并定位故障。同时,还需要制定详细的故障排除流程,确保在故障发生时能够迅速采取措施进行修复,减少对空管系统的影响。

结束语

综上所述,脉冲压缩技术在空管一次雷达中的应用,不仅提升了雷达的探测性能和分辨能力,还增强了空管系统对复杂空中交通态势的应对能力,为空中交通安全与高效运行提供了坚实保障。随着科技的不断进步,脉冲压缩技术将持续演进,为空管一次雷达带来更广阔的发展前景。未来,我们期待这一技术能在更多领域展现其独特价值,推动航空事业的蓬勃发展。

参考文献

- [1]唐洪雁.脉冲压缩雷达提高距离分辨率的仿真研究[J].中国雷达,2020(04):27-31.
- [2]季敏立.线性调频脉冲压缩信号副瓣抑制方法的研究[J].考试周刊,2019(64):238-239
- [3]胡航.两种抑制线性调频信号脉冲压缩旁瓣的加权方法[J].电子测量与仪器学报,2019,18(03):26-30.