

# The Technology Problems in the Engineering of Digital Array Radar

Xiaojun Li<sup>1</sup>, Yong Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aeronautical Armament Research and Order Ministry of NED, Beijing

<sup>2</sup>Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao Shandong

Email: wyong710922@163.com

Received: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2015; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2015; published: Dec. 25<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Digital Array Radar (DAR) is a fully digitized phased array radar in which digital beam forming technique is used both in receiving and transmitting. Firstly, this paper introduced the typical architecture of DAR. Then, it analyzed the characteristics of DAR, such as the low demand of dynamic range, the ultra low side-lobe, the low probability of Intercept and the broad field of regard. Finally, it discussed the technology problems in the process of engineering realization, including the digital TR Module production, the broadband realization, the ultra low side-lobe and the channel consistency technique. It will be helpful for the fully development of DAR.

## Keywords

Digital Array Radar (DAR), Digital TR Module, The Channel Consistency Technique, Ultra Low Side-Lobe

---

# 数字阵列雷达工程实现技术难点分析

李晓俊<sup>1</sup>, 王 勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>海装航订部, 北京

<sup>2</sup>海军航空工程学院青岛校区, 山东 青岛

Email: wyong710922@163.com

收稿日期: 2015年12月2日; 录用日期: 2015年12月22日; 发布日期: 2015年12月25日

文章引用: 李晓俊, 王勇. 数字阵列雷达工程实现技术难点分析[J]. 仪器与设备, 2015, 3(4): 142-146.

<http://dx.doi.org/10.12677/iae.2015.34021>

## 摘要

数字阵列雷达是一种接收和发射波束都采用数字波束形成技术的全数字阵列扫描雷达, 是有源相控阵雷达和数字雷达的最新发展方向。本文从数字阵列雷达的基本组成入手, 首先分析了数字阵列雷达动态范围低要求、超低副瓣、低截获概率、宽角度扫描等主要特点, 最后讨论了工程实现过程中存在的诸如数字TR组件、宽带信号、超低副瓣和通道一致性等技术难点, 为数字阵列雷达的深入发展指明了方向。

## 关键词

数字阵列雷达, 数字TR模块, 通道一致性, 超低副瓣

## 1. 引言

雷达作为军中“千里眼”, 是未来战争中指挥员得以运筹帷幄、决胜千里的最基本的信息获取手段。但是, 现代雷达面临的目标环境和电磁环境日趋复杂, 趋复杂, 各种有源、无源干扰, 反辐射武器, 低空、超低空突防, 特别是隐身技术等都对传统雷达技术提出了严峻的挑战。现代雷达必须具备高的搜索速率、高的多普勒分辨率和角分辨率、高抗干扰能力、多种目标自适应识别等能力[1]。

收/发波束均以数字方式实现的全数字化阵列雷达能很好解决上述问题。这种全新概念的数字阵列雷达正在成为相控阵雷达的一个重要发展方向。目前数字化阵列雷达已经从关键技术研究、试验系统研究进入到工程应用阶段。

## 2. 数字阵列雷达组成与特点

### 2.1. 数字阵列雷达组成

数字阵列雷达是一种接收波束和发射波束均采用数字波束形成技术的全数字有源相控阵雷达, 主要由阵列天线、数字TR模块、数字波束形成、信号处理器、控制处理器等组成[2], 如图1所示。

发射信号时, 由控制处理器形成频率、幅度和相位控制字, 经数字波束形成器进行幅度加权、波束扫描的方位加权和信号分配后, 控制数字TR模块产生一定频率、幅度和相位的发射信号, 这种方式将传统的相控阵雷达发射波束形成所需的幅度加权和移相器从射频部分转移到数字部分来实现, 可形成单个或多个可控的波束而不损失信噪比, 波束特性由权系数控制, 灵活多变; 接收信号时, 每个TR组件接收各天线单元的微波信号, 经下变频形成中频信号, 再经直接中频采样处理后输出数字信号至信号处理器, 完成自适应波束形成和数字信号处理, 如脉冲压缩、MTI、MTD、CFAR等。

数字TR模块是数字阵列雷达的关键部分, 其内部包含一个完整的发射通道和一个完整的接收通道, 发射通道由直接数字合成频率源(DDS)、上变频和功率放大器组成, 输入信号包括频率、幅度、相位三个二进制控制信号; 接收通道由低噪声放大器、下变频、中频采样及数字鉴相等组成, 输出信号是采样后的I、Q数字回波信号, 如图2所示。

发射激励信号和接收本振信号均由数字方式产生, 通过控制处理器可方便改变DDS的控制码, 从而易于产生复杂的信号波形[3]; 与传统TR模块相比, 减少了移相器、衰减器和波束控制电路, 通过改变DDS的控制码, 可改变发射信号的频率、波束形状, 从而集波形变化和波束变化于一身, 具有良好的可重复性和可靠性。

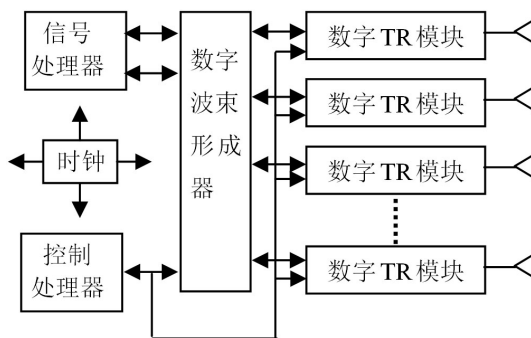


Figure 1. Block diagram of digital array radar  
图 1. 数字阵列雷达组成框图

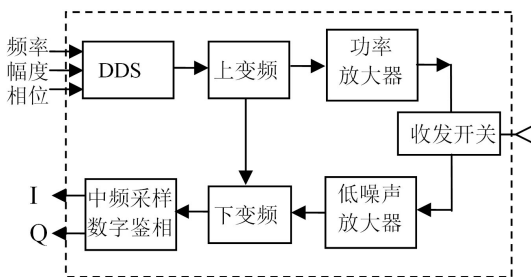


Figure 2. Block diagram of digital TR module  
图 2. 数字 TR 模块组成框图

## 2.2. 数字阵列雷达主要特点

1) 降低对数字接收机动态范围要求。对于模拟波束形成的雷达，波束形成网络会对干扰信号产生很大的增益，与之匹配的雷达接收机具有很大的动态范围；对于数字阵列雷达，TR 模块接在阵列天线的输出端，内部包含一个完整的接收通道，因此可大大降低对其动态范围的要求[4]。

2) 可实现超低副瓣。由于能够对阵列误差、各单元幅相不一致和互耦效应等进行精确校正，因此能够实现超低副瓣。

3) 提高强杂波背景中弱小目标检测能力。可根据雷达回波的空时特性，利用自适应阵列信号处理技术自适应地调整阵列参数，抑制干扰并保持目标信息，从而能够有效改善信干噪比，提高弱小目标探测能力。

4) 易实现相控阵宽角扫描。常规宽带相控阵雷达是在阵列各单元或子阵级别上添加实时延迟线和移相器来实现宽角扫描，实现复杂且延迟精度有限；而对于数字阵列雷达，发射时可利用 DDS 来精确控制延迟，接收时可在基带利用分数时延滤波器等数字信号处理技术实现精确延迟。

5) 易于实现软件化。由于数字化程度不断提高和高性能通用硬件平台的应用，使得雷达的主要功能都可由软件编程实现。可在无需更换硬件平台的情况下通过软件加载与升级来改变雷达的功能或提高雷达系统的探测能力。

6) 低截获概率。雷达发射信号可在时域、空域和频域等多维空间进行扩展，能够在不影响雷达探测威力的前提下自适应波束形成，增加截获雷达信号的难度。

## 3. 数字阵列雷达技术难点分析

### 3.1. 数字 TR 组件

数组 TR 组件既要实现雷达复杂信号产生，又要实现高速、高精度幅相控制，是数字阵列雷达的关

键器件。雷达多功能工作方式要求信号具有多种波形, 为适应对更复杂的雷达信号进行能量管理, 不仅需要通过对改变信号的脉冲宽度, 同时也要通过改变信号幅度来合理分配能量, 这就要求雷达波形的形成非常灵活, 这对 DDS 器件的低功耗、低杂散、高分辨率提出了较高的要求。

另外, 对于大型的相控阵雷达或者 S 波段等频率较高的雷达, 都具有成千上万的阵元, 那么必须研制相应的成千上万的数字 TR 组件, 每个 TR 组件都有 DDS、模拟抗混叠滤波器和 AD 等高成本器件, 随着组件数的增加, 成本迅速增加。另外数字 TR 组件与传统的模拟 T/R 组件相比器件更多, 大量的有源器件降低了 TR 组件的可靠性, 如何提高组建可靠性成为军事装备的主要问题。

### 3.2. 宽带信号产生

宽带信号产生对于 DDS 来讲并不是很困难, 但信号的时延控制成为难题。模拟有源相控阵的宽带采用了模拟延迟线, 进行真正的时间延迟, 从而形成宽带发射和接收波束。对于阵面较大的数字阵列雷达, 宽带的难点主要是多个数字 TR 组件之间的信号发射和接收采样的定时、同步。由于多个数字 TR 组件相隔较远, 本振和定时到达各组件存在时延和相位差[5], 尽管可以采用高速采样或者采用数字滤波器进行采样点之间的任意分数延迟等技术措施, 但纳秒量级的时延抖动将导致波束无法合成; 接收时同样面临 AD 采样时钟和起始定时信号同步的难题。

宽带面临的另一个难题是组件收发通道的宽带不一致, 发射通道的误差不仅包括接收机上变频通道、滤波器, 还包括发射功放等器件。接收机通道中的滤波器和发射通道的功放是宽带误差较大的器件, 必须进行修正。有源器件的幅度和相位不一致会随着时间、环境温度变化, 修正会变得非常困难。

### 3.3. 超低副瓣形成

对雷达而言超低副瓣是抗干扰和杂波的重要手段。数字阵由于校准在数字域, 且补偿的相位和幅度可以做到非常的精确, 理论上是可以获得超低副瓣的。

雷达对于近程较强杂波采用时间增益控制(STC)技术处理, 对于模拟有源相控阵, STC 电路在天线波束后, 对波束无影响; 对数字阵列雷达, 合成波束在 AD 转换之后, 每个数字 TR 组件接收通道要面临内 STC 变化的影响。由于每个增益控制码会使得接收通道带内幅度和相位一致性发生变化, 要获得超低副瓣, 有必要针对每个控制码进行修正, 如果每个 STC 控制码都要进行修正, 系统的补偿也会变得非常复杂[6]。另外当增益发生变化时, 对应不同的增益码获得的通道均衡系数来自不同的自适应计算过程, 不同的滤波器系数针对不同增益期间的数据滤波, 会产生信号相位的不连续, 高度复杂的补偿修正系统会严重影响合成超低副瓣波束的实现。

接收机的通道幅度和相位不一致, 至于阵面互耦与接收机通道互耦的影响也是相当显著的。如何解决接收通道的隔离度和天线单元之间的互耦也是超低副瓣面临的技术难题。

### 3.4. 通道一致性技术

数字阵列雷达一般有成百上千个数字 TR 组件, 每个组件都有一个独立而完整的发射接收通道, 即数字阵列雷达是一个多通道系统, 波束合成算法是依靠精确的电路来决定最优的权向量和减少干扰, 因此雷达信号处理要求每个通道的幅相特性一致, 通道特性的变化将极大地影响系统的整体性能。

影响通道间幅相一致性的因素很多, 包括时钟、控制、布线等, 这对时钟分配网络、系统控制、电路板设计提出了挑战; 另外每个通道都包含馈线、高放、耦合器、混频器、中放、A/D 变换器等模拟器件, 虽然各个通道由相同电路相同型号的器件组成, 但通道电参数却会有一些的差异, 而且这些参数会随工作频率、电源电压、环境温度和器件老化等因素的变化而漂移, 使得各个通道必然存在着随频率变

化的幅度和相位的不一致, 这对器件一致性也提出了很高的要求[7]。

#### 4. 结束语

数字阵列雷达是现代雷达技术特别是雷达工程实现领域的前沿与重要发展方向。数字阵列雷达系统的设计有别于传统相控阵雷达, 随着微电子技术和数字集成电路技术的发展, 数字阵列模块逐渐向数字化、软件化、集成化、多功能方向发展, 通过计算机可实现雷达体制、工作方式、工作频段、信号参数和处理方法的软件控制, 真正意义上的全数字化软件雷达将会成为现实。

#### 参考文献 (References)

- [1] 朱庆明. 数字阵列雷达述评[J]. 雷达科学与技术, 2004, 2(3): 136-141.
- [2] 张欣, 叶灵伟, 李淑华, 等. 航空雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [3] 鲁加国, 吴曼青, 靳学明, 等. 基于 DDS 的有源相控阵天线[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 199-202.
- [4] 陈曾平, 张月, 鲍庆龙. 数字阵列雷达及其关键技术进展[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(6): 1-5.
- [5] 张广义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [6] 王峰, 傅有光. 数字相控阵与模拟相控阵雷达的性能对比分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(2): 148-151.
- [7] 熊健, 王彬如, 谢伟, 等. 宽带数字阵列干扰技术探讨[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(3): 47-50.