

# 天线耦合系数表在相控阵天线系统中的校准应用

眭永明 钟雅婷 任文龙 王双陆

四川九州电器集团有限责任公司 四川 绵阳 621000

**摘要:** 在相控阵天线系统中,各射频通道的幅相一致性是决定其波束形成性能的核心要素。针对TR组件至天线辐射面全链路存在的幅相误差以及通道故障问题,本文系统阐述了“天线耦合系数表”在相控阵天线系统中的校准应用。该方法通过预先测量并存储天线通道耦合环路的基准幅相值及通道有效标志位,在系统运行时注入校准信号并进行实时比对,利用数字域补偿算法对通路误差进行动态抵消和故障通道屏蔽,从而实现多通道的幅度校准与相位对齐,显著提升了系统的可靠性与工程可用性。本文详细论述了实现原理、应用流程、实验验证结果,并对当前面临的工程挑战与未来发展方向进行了分析与展望。

**关键词:** 相控阵天线; 耦合系数表; 通道校准; 幅相补偿; 故障容错; 波束形成

## 1 引言

相控阵天线凭借其波束捷变、灵活赋形等核心优势,已成为现代雷达、通信、电子战等系统的核心部件<sup>[1]</sup>。其性能基石在于所有天线辐射单元通道的幅度和相位具有高度的一致性。然而,在工程实践中,受TR(发射/接收)组件内部有源器件(如放大器、移相器、衰减器)的性能离散性、频率依赖性、以及馈线长度与损耗的微小差异、制造工艺偏差、环境应力(如温度循环、机械振动)持续作用及器件老化等多重因素影响,从波控数字端口至天线空间辐射场之间的整个信号链路不可避免会引入一定的幅相误差<sup>[2]</sup>。若直接使用理想波束形成权重,这些通道间的失配误差将直接导致波束指向偏差、增益下降、副瓣电平升高等一系列性能劣化问题,严重制约系统的战术指标实现<sup>[3]</sup>。

在波束合成阶段,故障通道会破坏阵列口径场的幅相均匀性,引发波束形状畸变、指向精度恶化以及副瓣和栅瓣电平的急剧升高<sup>[4]</sup>;可能导致波束控制失灵或在特定扫描角域出现性能盲区、探测距离缩短、通信链路中断,严重影响核心任务的执行<sup>[5]</sup>。因此,如何实时诊断通道状态并在部分通道故障时维持系统基本功能,成为高可靠性相控阵工程领域亟需解决的难题。

为解决上述难题,本文提出了一种天线耦合系数表在相控阵天线系统中的校准应用技术。该技术通过建立扩展型、系统级的幅相响应基准数据库(即“天线耦合系数表”),精确记录了在标准状态下,所有天线通道的耦合环路在不同频段下的基准幅相值。通过将实时测量结果与此基准表进行比对与差分处理,系统能够在数字域对DA信号进行预失真补偿,从而“补平”所有物理通道的非理想特性。表中预留的耦合通道故障位标志为

智能容错提供了动态纠错的途径。本文将从工程实现原理、流程、试验验证等方面,系统论述该方法在提升相控阵天线系统性能与可靠性方面的核心价值。

## 2 天线耦合系数表的工程实现原理

### 2.1 频率-通道的幅相表

“频率-通道的幅相表”核心作用是解决相控阵系统在不同任务模式下,因工作频段或波形不同而导致的通道响应差异问题。此表是波束形成实现“功能自适应”的基石。

该表以频率(F)和物理通道编号(N)为索引。在系统初校或周期校准时,需在预设的整个工作频带内,以一定的频率间隔(例如100 MHz)进行扫频测量。在每个频点上,依次激励单个通道,并通过校准通道的耦合回路,测量所有通道的耦合回路值。最终,为每个通道在每个频点下生成一个包含幅度(dB)和相位(度)的复数响应值 $H(f,n)$ 。

当系统需在频率 $f_1$ 执行搜索任务、在频率 $f_2$ 执行跟踪任务时,波束控制算法将从该表中调用对应频点 $f_1$ 和 $f_2$ 下的全套通道响应数据 $\{H(f_1,n)\}$ 和 $\{H(f_2,n)\}$ 。这些数据真实反映了在该特定频率下,从数字端口到天线辐射面的完整链路特性,为计算精准的预失真补偿系数提供的原始依据。

通道N	通道1		通道2		...		通道N	
	发射幅度	发射相位	接收幅度	接收相位	发射幅度	发射相位	接收幅度	接收相位
频率f1								
频率f2								
频率f3								
频率f4								
频率f5								
频率f6								
频率f7								
频率f8								
频率f9								
频率f10								
...								
频率fn								

图1 频率-通道的幅相表

### 2.2 通道状态表

“通道状态表”是一个动态更新表，是系统实现“带伤工作”智能决策的中心。

通道有效标志位：一个布尔量（1/0），“1”表示通道故障或被人工禁用。

		通道状态表												
通道N	标志	通道1	通道2	通道3	通道4	通道5	通道6	通道7	通道8	通道9	...	...	...	通道N
有效标志位 (1有效, 0无效)														

图2 通道状态表样式

## 3 相控阵工程的典型应用流程

### 3.1 系统整体架构

如图3所示，为天线耦合系数表在相控阵工程中的典型应用系统框图。系统由电源、调试软件、信号处理模块、射频收发组件、天线等组成。

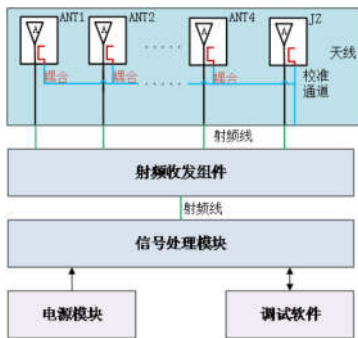


图3 基于天线耦合系数表相控阵校准与应用系统框图

### 3.2 应用流程

通过矢量测试，获取真实天线的的数据，如图4所示。将各个频点下的天线耦合回路的幅度、相位值，写入到表格中。通过格式转换软件将表格转换成bin文件，烧写进信号处理模块中的FLASH中。

	通道1		通道2		通道3		通道4	
	幅度补偿	相位补偿	幅度补偿	相位补偿	幅度补偿	相位补偿	幅度补偿	相位补偿
频点0	-24	142	-25.25	-105	-24.5	-57	-24.75	0
频点1	-24.5	142	-25.25	-105	-24.75	-56	-24.5	0
频点2	-24	144	-25.25	-107	-23.5	-58	-23.75	0
频点3	-23.75	142	-25	-108	-24.5	-55	-24.25	0
频点4	-22.5	137	-24.5	-113	-23.25	-59	-22.5	0

图4 真实天线数据

在进行接收校准时，信号处理模块通过射频收发组件控制校准通道(JZ)进行射频信号发射，其他天线经过耦合回路进行接收，所接收到的校准数据需要减去耦合系数表中的值，得到每个天线真实的接收值，从而实现了整个射频收发组件到天线链路的接收回路的校平工作。在进行发射校准时，信号处理模块通过射频收发组件控制依次控制天线通道0、通道1、通道2、通道3等进行发射，校准电路进行接收，扣除天线耦合系数的值，得到整个天线真实的发射值，从而实现整个射频收发组件到天线链路的发射回路的校平工作。实验验证

在正常情况下，对4个通道进行接收校准，在代入耦合系数表之后，所有通道幅度和相位都能校平，如图5所示校准前各个通道的幅度相位值，如图6所示为校准补偿后各个通道的幅度相位值。

校准结果数据				
通道号	幅度 (dB)	相位 (°)	补偿幅度 (dB)	补偿相位 (°)
通道0	37.5	101	0	-101
通道1	39.75	-77	-2.25	77
通道2	37.75	27	-0.25	-27
通道3	38	0	-0.5	0

图5 正常校准数据

校准结果数据				
通道号	幅度 (dB)	相位 (°)	补偿幅度 (dB)	补偿相位 (°)
通道0	37.5	0	0	-101
通道1	37.5	0	-2.25	77
通道2	37.5	0	-0.25	-27
通道3	37.5	0	-0.5	0

图6 校准补偿后的幅度相位值

由于通道间的补偿是以最低通道值为基准，因此当某个通道存在问题时，其采样值可能很低，如图7所示通道1的采样值为0.25dB，此时如果仍然按照通道1进行校准，则所有的通道都会变成0.25dB，如图8所示，相当于所有通道都不会输出信号，整个系统无法工作。

校准结果数据				
通道号	幅度 (dB)	相位 (°)	补偿幅度 (dB)	补偿相位 (°)
通道0	37.25	102	-37	-102
通道1	0.25	-139	0	180
通道2	37.75	27	-37.5	-27
通道3	37.75	0	-37.5	0

图7 通道1异常时校准数据

校准结果数据				
通道号	幅度 (dB)	相位 (°)	补偿幅度 (dB)	补偿相位 (°)
通道0	0.25	0	-37	-102
通道1	0.25	0	0	180
通道2	0.25	0	-37.5	-27
通道3	0.25	0	-37.5	0

图8 通道1异常时补偿后校准

为解决由于某个通道异常时，造成整个系统无法工作的情况，在天线耦合系数表中加入了有效标志位(通道有效表中置1，异常填0)，如图9所示。通道1被设置为无效。

通道状态表				
通道N	通道0	通道1	通道2	通道3
标志 有效标志位 (1有效, 0无效)	1	0	1	1

图9 通道状态标志位

此时，在校准补偿过程中，不再考虑通道1的异常采样值，直接用其他几个通道的最小值作为基准值进行校准。如图10所示，使用了通道状态标志位后的补偿效果

值，显示其他通道能正常使用。

校准结果数据				
通道号	幅度 (dB)	相位 (°)	补偿幅度 (dB)	补偿相位 (°)
通道0	37.25	0	0	-102
通道1	0.25	0	0	180
通道2	37.75	0	-0.5	-27
通道3	37.75	0	-0.5	0

图10 通道1无效后补偿数据

#### 4 结论

天线耦合系数表及其应用方法，成功地将相控阵系统中复杂的模拟射频通道一致性问题，转化为可测量、可计算、可补偿的数字信号处理问题。它从一项基础的测试数据，演变为一套涵盖系统标定、在线校准、性能补偿及健康管理的完整工程解决方案。该方法不仅为实现高精度指向波形提供了必要的技术基础，其内嵌的故障诊断与容错能力更是现代高可靠性相控阵系统的关键特征。

#### 参考文献

- [1]王从思,王艳,连培园,等.空间有源相控阵天线的发展——结构设计视角[J].电子机械工程,2020,36(3):1-8.
- [2]张润泽,王婷.端射天线阵列的耦合估计研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(10):202-208.
- [3]张荣威,李平,孔海龙等,汤桂花.典型相控阵通信系统非对称损伤效应实验研究[J].强激光与粒子束,2025,37(11):113012-1.
- [4]Fulton C, Zhang Y, et al. Validation and Testing of Initial and In-Situ Mutual Coupling-Based Calibration of a Dual-Polarized Active Phased Array Antenna[J]. IEEE Access, 2020, 8: 78315-78329.
- [5]杨立,刘智远,许放.电子战有源相控阵适度降级分析[J].舰船电子对抗,2024,47(4):87-93.
- [6]吕苗,张欢,王刚.一种改进型有源相控阵校准天线设计与验证[J].无线通信,2024,14(3):43-50.