

## 同步在数字 T/R 组件测试中的作用和实现

丁志钊<sup>1,2</sup> 吴家亮<sup>2</sup> 张 龙<sup>2</sup> 蒋玉峰<sup>2</sup>

(1. 电子测试技术重点实验室 青岛 266555; 2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555)

**摘要:** 介绍了数字 T/R 组件的基本概念和同步在其测试中的作用, 并对发射通道相位一致性、脉内信杂比、接收延时等测试过程中数字 T/R 组件和测量仪器设备同步的实现方法进行了详细阐述。经试验验证表明: 以产生的同步信号为纽带, 先实现与数字 T/R 组件的同步, 再利用该信号实现与测试仪器的同步, 从而间接实现数字 T/R 组件和测试仪器同步的方法有效可行。在此同步体制下, 可以分别利用测试仪器的多通道相参机、时间门和内部触发模式的脉冲调制功能实现性能参数的测试, 这也为其他脉冲体制电子装备的测试提供了有益的参考和借鉴。

**关键词:** 同步; 时间门; 接收延时

**中图分类号:** TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

### Role and realization of synchronization in digital T/R module test

Ding Zhizhao<sup>1,2</sup> Wu Jialiang<sup>2</sup> Zhang Long<sup>2</sup> Jiang Yufeng<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China;

2. The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** This paper introduces the basic conception of digital T/R module and the role of synchronization in test and measurement (T&M) for digital T/R module firstly, and then expounds the realization method of synchronization between the digital T/R module and T&M instruments in the testing process of phase consistency between transmission channels, intrapulse signal-noise ratio (SNR) and receiving delay etc. With the verification of experimentation, it is effective and feasible that synchronization signal from the automatic test system (ATS) synchronizes the digital T/R module and T&M instruments respectively, and then achieves synchronization between the digital T/R module and T&M instruments. With the method in this paper, the performance testing for digital T/R module can be realized by combination of multi-channel coherent receiver, time-gate and pulse modulation based on internal trigger. It also provides an useful reference and T&M solution for other pulse electronic equipments system.

**Keywords:** synchronization; time gate; receiving delay

### 1 引言

数字 T/R 组件是数字阵列雷达中的基本单元, 也是最重要和数量最多的一类单元, 它的技术指标决定了数字阵列雷达技战术指标的高低, 从某种程度上也决定了数字阵列雷达的生存价值和使用价值<sup>[1]</sup>。

数字 T/R 组件是一个微波数字混合的多通道雷达发射/接收模块。与模拟 T/R 组件相比, 由于采用了基于直接数字合成(DDS)的波形产生和幅相控制技术、基于数字下变频(DDC)的多通道数字化接收技术、集成化一体化收

发通道设计技术以及高速大容量数据传输技术等大量新技术, 数字 T/R 组件整体呈现数字化、集成化和光纤化的鲜明特点<sup>[2]</sup>。

当前, 国内外的数字 T/R 组件已经开始进入工程应用阶段。从同步实现方式上讲, 数字 T/R 组件有硬同步和软同步两类。所谓硬同步, 就是指组件在接收其他分机传送过来的同步信号基础上实现各个收发通道之间的同步; 所谓软同步, 则是指组件接收其他分机传送过来的同步数据, 将同步数据解析后触发其内部电路产生同步信号, 从而实现各个收发通道之间的同步。由于硬同步数字

T/R 组件测试实现难度相对较小,而采用软同步方式的数字 T/R 组件的测试难度大,应用范围广,解决这类数字 T/R 组件测试难题的意义更大。因此,将以软同步数字 T/R 组件为研究对象,阐述同步在测试过程中的作用和实现方法。

由于数字 T/R 组件技术的先进性和敏感性,在国外文献中还没有搜索到关于数字 T/R 组件测试的公开报道。当然,一些仪器设备制造商推出了一系列数字 T/R 组件测试解决方案,但是不涉及如何实现被测件和测试仪器之间的同步<sup>[3]</sup>。

在国内,数字 T/R 组件测试技术的研究刚刚起步。相关高校对数字 T/R 组件测试的实现方法进行了研究和探讨,但是选择的研究对象不具有代表性,也没有市场化的产品。而仪器设备制造商和雷达研制单位正联合对数字 T/R 组件测试技术进行攻关,目前已有实用化的产品,所涉及的测试系统正是在这一背景下诞生的<sup>[4]</sup>。

## 2 同步在测试中的作用

单单就测试参数类型来讲,数字 T/R 组件与模拟 T/R 组件基本相同,大致有发射功率、脉宽、周期、发射通道脉内信杂比、发射通道移相精度、发射通道相位一致性、接收增益、接收延时、噪声系数以及隔离度等,但是由于技术体制和实现方式的升级换代,数字 T/R 组件性能参数的测试方法发生了较大的变化<sup>[5]</sup>。

数字 T/R 组件与模拟 T/R 组件的不同主要表现在以下几个方面:

1) 发射信号为没有模拟输入信号前提下的多通道大功率脉内复杂调制信号;

2) 接收通道的输出信号为通过光纤传输的 I/Q 数据而不是模拟信号<sup>[6]</sup>;

3) 组件自身无同步信号输入/输出。

具体来讲,数字 T/R 组件的发射信号为没有模拟输入信号前提下的脉内线性/非线性调频信号,大多数的发射通道测试参数其实为脉内特征参数,那么就必须要保证所测得的测试结果是在脉内而不是脉冲关断和上下边沿期间获得的,否则就无法获得正确的测试结果。但是,由于发射通道没有模拟信号输入,它已经不可能像模拟 T/R 组件那样方便地利用脉冲矢量网络分析仪获得测试结果,这就必须利用一种同步机制去对发射信号进行分析,从而获取脉内特征参数。

由于接收通道输出信号的数字化特征,作为接收通道测试的重要指标之一——接收延时的测试除要利用数字信号处理技术外,也必须基于一个同步机制来实现。接收延时的测试其实就是一个时间差测试,即什么时间信号进入接收通道,又在什么时间从接收通道输出,只要明确起始和终止这 2 个时间即可实现测试。但由于数字 T/R 组件自身无同步信号输入/输出,那么它与测试仪器设备之间就无法直接实现同步,接收延时测试所需的起止 2 个时

间就很难确定。

通过以上分析可知,同步在数字 T/R 组件测试中具有重要作用,没有同步,也就无法实现数字 T/R 组件的测试。无论是发射测试,还是接收测试,其实都是需要基于一个同步的机制,在时间轴上构联数字 T/R 组件和测试仪器设备。只有如此,实现数字 T/R 组件的测试才会成为可能。

## 3 同步实现方法

对于数字 T/R 组件来说,各个收发通道之间的同步原理为:数字 T/R 组件对光纤传输的命令和数据进行解析,如果是正确的数据,则字头包含同步信息,同时数字 T/R 组件内部电路则产生同步信号,并触发各个收发通道进行工作,但是不会将同步信号输出。

对于测试中所需的数字 T/R 组件和测试仪器设备之间的同步,也需要利用上述原理。既然不能直接实现同步,那么就利用一个间接方式来实现,即产生一个同步信号,先实现与数字 T/R 组件的同步,再利用该信号实现与测试仪器的同步,从而最终实现数字 T/R 组件和测试仪器之间的同步。

如图 1 所示,具体的实现方法为:基于 FPGA 的状态控制电路在通过光纤输出各类数据和命令的同时,在同一个时钟信号的上升沿,状态控制电路中的数模转换子电路输出一个同步触发信号,那么这个同步触发信号与数字 T/R 组件之间就建立了事实上的同步关系,当然,这两者之间肯定有一定的延时,但是并不影响同步关系确立这一事实的存在,并且延时时间也是可以利用示波器进行测试的。同步触发信号产生后,这就可以输入至信号发生器、多通道相参接收机和频谱仪中,作为启动测试的外触发信号,那么,同步触发信号与测试仪器之间也就建立了同步关系。综上所述,以构建的同步触发信号为纽带实现了数字 T/R 组件和测试仪器之间的同步。

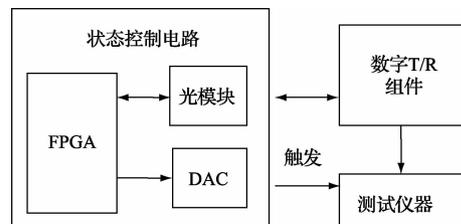


图 1 测试同步实现原理

### 3.1 发射通道测试同步实现方法

发射通道测试参数主要为发射通道相位一致性、脉内信杂比、脉冲调制开关比和发射功率。功率测试不需要同步,可以直接利用功率分析仪进行测试。而其他参数测试需要基于同步模式利用脉冲矢量网络分析仪和频谱分析仪等测试仪器来完成。

1) 发射通道相位一致性测试同步机制实现方法

发射通道相位一致性指标对于雷达发射功率合成有重要意义,这也是影响雷达整体性能的一个关键指标。如果要进行准确的脉内相位一致性的测试则需要利用脉冲矢量网络分析仪,但是此时的工作模式是在信号源关断前提下的相参接收机模式,而不是传统的传输测量模式。需要说明的是,脉冲矢量网络分析仪的信号源必须关断,这主要是为了避免信号源泄露对接收机产生的影响。由于没有模拟输入信号,要对多通道脉内调制信号的相参特性进行测试就必须引入同步机制,保证测试结果是在脉内获得的<sup>[7]</sup>。

具体的实现方法为将同步触发信号作为脉冲矢量网络分析仪的脉冲同步输入信号,在脉冲触发的模式下,选择外部同步源,设置合适的延迟时间,在接收机模式下实现发射通道移相精度的测试。延迟时间的设置对测试结果的影响较大,因此,延迟时间必须合理。合理的延迟时间=(同步信号与发射信号之间的延时)+(1/3~1/2发射信号脉宽)。同步信号与发射信号之间的延时可以利用数字示波器很方便的获得,而发射信号脉宽则是已知的,那么延迟时间设置的合理性就有了保证。此外,相参接收机模式下脉冲矢量网络分析仪的设置相对是较为复杂的,这对操作人员的专业素养也提出了一定的要求<sup>[8]</sup>。

#### 2) 脉内信杂比测试同步机制实现方法

同样由于发射信号为脉冲调制信号的原因,如果直接利用频谱分析仪进行测试,无论是窄带模式,还是宽带模式,其实都很难检测到杂波信号,也就无法对脉内信杂比进行准确测试。

若要对脉内信杂比进行准确测试,就必须利用频谱分析仪的时间门功能,针对脉内信号进行测试。时间门是由用户定义执行测量的时间窗口,允许测量指定部分的信号,并排除或屏蔽干扰信号。时间门功能有4个关键因素<sup>[9]</sup>:

- ①外部提供的触发信号;
- ②门控或触发模式(正、负边沿触发,或正、负电平触发);
- ③时间门延迟设置,对于边沿触发模式,该设置决定在触发信号到来后多长时间门开始有效;
- ④时间门宽度设置,对于边沿触发模式,该设置决定时间门有效的的时间。

按照上述的4个因素,将同步信号作为频谱分析仪的外触发信号,设定边沿触发模式,时间门延迟时间与发射通道相位一致性测试是一致的,时间门宽度则为发射信号脉宽的1/4。

#### 3.2 接收通道测试的同步实现

接收延时测试原理如图2所示,在数字T/R组件接收通道测试过程中,同步主要应用在接收延时的测试,其他接收类性能指标的测试可以在连续波模式下进行。接收延时测试同步实现的根本解决思路是如何获取模拟回

波信号在数字T/R组件内传输的起始和接收时间。

其实,数字T/R组件内部何时接收到数据是已知的,那么,只要明确模拟回波信号的输入时刻就可获得接收延时指标。

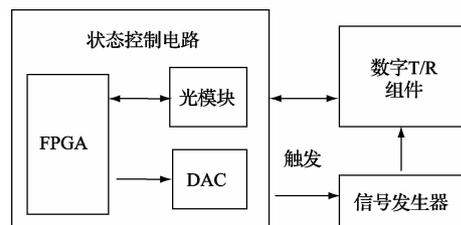


图2 接收延时测试原理

解决的思路是利用前文提到的状态控制电路同步触发信号作为模拟回波信号输入的同步信号,这就需要借助信号发生器基于内部触发的脉冲调制功能。

基于内部触发的脉冲调制是一种较为特殊的脉冲调制方式,在这种调制模式下,信号发生器接只有接收到同步信号触发后才输出脉冲调制信号,而且同步信号与脉冲调制信号之间的延时可以设置。利用该功能自然就可实现模拟回波信号与同步触发信号之间的同步,而同步触发信号在何时产生是明确的,当然也就明确了模拟回波信号输入数字T/R组件的时刻。那么接收延时=接收到回波模拟信号的时间-同步信号的输出时间-(同步信号与脉冲调制信号之间的延时)<sup>[9]</sup>。

需要说明的是,因为测试电缆的长度较短,由此引起的测试误差仅仅为几个ns,这对测试结果影响不大,可以根据测试需要决定是否要考虑这方面的影响。

#### 4 实验验证及结果分析

为验证本文所提出的同步实现方法的正确性,如图3所示,中国电科41所联合雷达研制单位以某S波段数字T/R组件为测试验证件搭建了一套测试系统。下面对发射通道测试和接收延时测试同步实现方法逐一进行论述和实验结果分析。

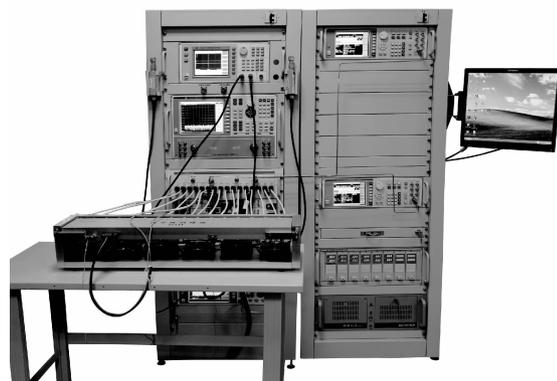


图3 数字T/R组件测试系统实物

#### 4.1 发射通道测试同步实现实验验证

测试验证件:某型 S 波段数字 T/R 组件

测试仪器:中国电科 41 所 AV3654A 矢量网络分析仪、中国电科 41 所 AV4036 频谱分析仪、中国电科 41 所 AV1464A 信号发生器(2 台)、力科公司 SDA820 数字示波器、定制时钟模块、定制开关网络、衰减网络、状态控制模块和程控直流电源等<sup>[10]</sup>。原理如图 4 所示。

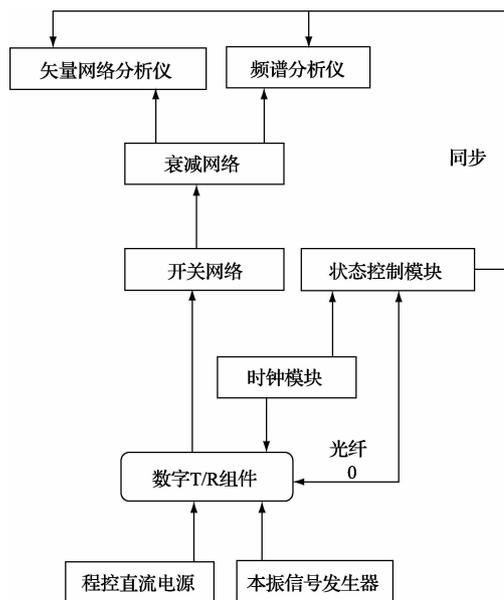


图 4 发射测试原理

实验步骤:

- 1) 各个仪器设备进行预热;
- 2) 利用电源为被测组件供电,电源设置为 36 V、3 A;
- 3) 2 台 AV1464A 信号发生器输出 2 路本振信号,S 波段,功率 15 dBm;
- 4) 时钟模块输出 2 路 20 MHz 时钟信号,分别提供给状态控制模块和被测组件;
- 5) 状态控制模块通过光纤进行工作状态控制,设置 X 发射工作模式(脉宽为 20  $\mu\text{s}$ ),发射通道 1 打开;
- 6) 利用数字示波器测试状态控制模块输出的同步信号和发射信号之间的延时,延时测量值为 24.8  $\mu\text{s}$ ;
- 7) 开关网络切换至与矢量网络分析仪接收机通道进行连接;
- 8) 根据 3.1 章介绍的方法,设置矢量网络分析仪为脉冲源触发和外部同步源模式,延迟时间设置为  $24.8 + 0.5 \times 20 = 34.8 \mu\text{s}$ ;
- 9) 在相参接收机模式下进行通道间相位一致性测试;
- 10) 开关网络切换至与频谱分析仪进行连接;
- 11) 同样根据 3.1 章介绍的方法,设置频谱分析仪为

外触发下的时间门测量模式,延迟时间同样为 34.8  $\mu\text{s}$ ,门宽度为  $0.25 \times 20 = 5 \mu\text{s}$ ,然后进行脉内信杂比的测试。

12) 相关测试记录如表 1 和表 2 所示。

表 1 相位一致性测试记录

设置	同步与发射	矢网延迟	相位一致
脉宽	信号延时	时间设置	性测试值
20 $\mu\text{s}$	24.8 $\mu\text{s}$	34.8 $\mu\text{s}$	1.2°

表 2 脉内信杂比测试记录

设置	同步与发射	频谱仪延迟	脉内信杂
脉宽	信号延时	时间设置	测试值
20 $\mu\text{s}$	24.8 $\mu\text{s}$	34.8 $\mu\text{s}$	46.8 dBc

实验结果分析:实际上讲,实现同步并不能提高测试的准确度,这只是实现测试的一个必要条件。但是,要注意的是,通过观察测试曲线可以基本判断同步是否实现和相关同步参数设置是否合理。如通道间相位一致性的测试曲线在归一化后应该是一条笔直的直线,而不应有无序的大范围变化,而脉内信杂比测试过程中应该有对应调制制的谱线图。

通过对相位一致性测试曲线形状和脉内信杂比谱线图的观察以及测试结果的分析,提出的同步实现方法可以满足数字 T/R 组件发射通道的测试需求。

#### 4.2 接收延时测试同步实现实验验证

测试验证件:某型 S 波段数字 T/R 组件

测试仪器:中国电科 41 所 AV1464A 信号发生器(3 台)、定制时钟模块、定制开关网络、衰减网络、状态控制模块、电源等。

接收延时测试原理如图 5 所示。

实验步骤:

- 1) 同 4.1 章步骤 1)~4);
- 2) 设置激励信号发生器工作在内部触发的脉冲调制工作模式,频率 S 波段,脉宽 20  $\mu\text{s}$ ;
- 3) 状态控制模块通过光纤进行工作状态控制,设置 Y 接收工作模式,内部延时为 400  $\mu\text{s}$ ;
- 4) 状态控制模块接收并处理通过光纤传输的 I/Q 数据,经计算延时测试结果为 400  $\mu\text{s}$ ,测试结果如表 3 所示。

表 3 接收延时测试记录

设置脉宽	延时设置值	延时测试值
20 $\mu\text{s}$	400 $\mu\text{s}$	400 $\mu\text{s}$

实验结果分析:测试结果与被测组件内部实际延时值一致,也就是说测试结果是准确的,当然也就证明了相关设置和接收延时测试的同步实现方法是正确的。

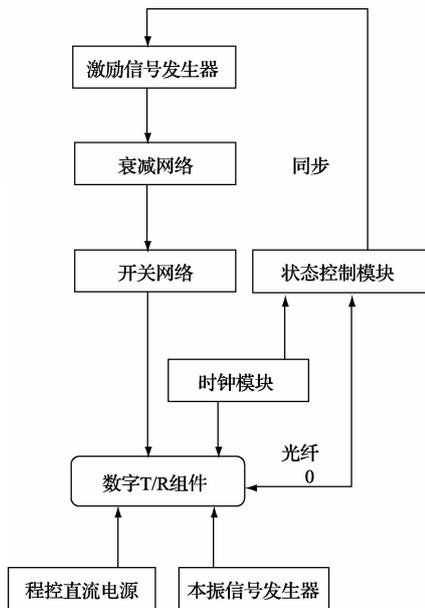


图5 接收延时测试原理

## 5 结论

经实验验证表明:以上所介绍的数字 T/R 组件和测量仪器设备同步的实现方法是有效可行的,在此基础上可以实现发射通道相位一致性、脉内信杂比和接收延时等性能指标的测试。

根据数字 T/R 组件的技术特点,充分挖掘当前电子测量仪器的功能,结合相关的试验数据,解决了数字 T/R 组件和测试仪器设备同步这一难题,也为全面突破数字 T/R 组件测试奠定了前提和基础。随着数字阵列雷达和数字 T/R 组件的迅猛发展,所做的研究可以为其他数字 T/R 组件和脉冲体制装备的测试提供良好的借鉴和参考。

## 参考文献

- [1] 吴曼青. 数字阵列雷达及其进展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006, 1(1): 11-16.
- [2] 张卫清, 谭剑美, 陈菡. DDS 在数字阵列雷达中的应用[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(6): 467-471.
- [3] 吴新玉. 数字 T/R 组件组合自动测试系统的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 6-7.
- [4] 杨东天. 数字 T/R 组件测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 11-12.
- [5] 王玉辉, 牛戴南, 张晋. L 波段 8 通道宽带数字 T/R 组件技术[J]. 现代雷达技术, 2007, 34(10): 66-68.
- [6] 孙灯亮, 李建宇, 李凯, 等. 逻辑分析仪在国防军工领域的典型应用[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(11): 11-15, 18.
- [7] 盛永鑫. T/R 组件自动测试系统[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(11): 38-40.
- [8] 何高楼. 一种 ns 级高速大动态功率捷变设计技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(8): 788-793.
- [9] 王鑫, 汪晋宽, 刘志刚, 等. 基于随机森林的认知网络频谱感知算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2471-2477.
- [10] 张思敏, 盛永鑫. 数字 T/R 模块自动测试系统校准技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(6): 23-24.

## 作者简介

丁志钊, 1977 年出生, 高级工程师, 主要研究方向为雷达等整机、分机及模块综合测试。  
E-mail: eiqd@ei41.com