

# A Power Supply System for TR Modules of Active Phased Array Radar

Yucai Wang, Xiaojun Bao, Yuanxi Liu, Lin Li, Huitao Liu\*

Naruida Technology Ltd., Zhuhai Guangdong

Email: [ht.liu@naruida.com](mailto:ht.liu@naruida.com)

Received: May 25<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jun. 10<sup>th</sup>, 2020; published: Jun. 17<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

TR module is one of the core modules of solid-state active phased array radars. Due to the limitation of volume, weight and working environment, the power supply system of TR modules must have high power density, high efficiency, high reliability and high maintainability. At present, centralized power supply systems are widely used for TR modules, which have poor reliability and low efficiency. This paper presents a distributed power supply system for TR modules of active phased array radars. The power supply system uses two identical AC/DC converter modules to provide redundant DC 12 V input to power eight identical TR power modules. Each TR power module supplies power to 8 TR modules, and 8 TR power modules are used to provide power to 64 TR modules in total. The output voltages of each TR power module can be precisely adjusted, and the voltage, current, power consumption, and temperature of the TR power module can be monitored in real time. Testing results show that the power supply system has high reliability and good maintainability, and can effectively improve the output quality and efficiency. In addition, it has advantages of reliable connection, simple architecture and easy expansion.

## Keywords

Power Supply, TR Module, Phased Array Radar

---

# 一种有源相控阵雷达TR组件电源系统

王育才, 包晓军, 刘远曦, 李琳, 刘会涛\*

珠海纳睿达科技有限公司, 广东 珠海

Email: [ht.liu@naruida.com](mailto:ht.liu@naruida.com)

收稿日期: 2020年5月25日; 录用日期: 2020年6月10日; 发布日期: 2020年6月17日

---

\*通讯作者。

文章引用: 王育才, 包晓军, 刘远曦, 李琳, 刘会涛. 一种有源相控阵雷达 TR 组件电源系统[J]. 电路与系统, 2020, 9(2): 28-34. DOI: [10.12677/ojcs.2020.92004](https://doi.org/10.12677/ojcs.2020.92004)

## 摘要

TR组件是固态有源相控阵雷达的核心模块之一。由于受到体积、重量和工作环境的限制，TR组件的电源模块必须具备高功率密度、高效率、高可靠性和高可维修性。目前对TR组件供电的方式多为集中供电的方式，其可靠性较差，效率较低。本文提出了一种采用分布式方式供电的TR电源系统实现方案。该电源系统使用两个相同的AC/DC转换模块提供直流12 V冗余输入电源，给8个相同的TR电源模块供电。其中每个TR电源模块给8个TR模块供电，8个TR电源模块总共用于给64个TR模块供电。每个TR电源模块的电压输出可以精确的调整，电压、电流、功耗和温度可以被实时监控。测试结果显示该电源系统可靠性高，可维修性好，能够有效改善电源的输出质量与效率。此外，还有连接可靠，架构简单，易于扩展等优点。

## 关键词

电源系统，TR模块，相控阵雷达

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

TR (Transmitter and Receiver)组件是固态有源相控阵雷达的核心模块之一。固态有源相控阵雷达中通常包含几十甚至成百上千个TR组件组成的阵列，每个TR组件对电源的功率、纹波、体积、重量都有严格的要求。由于TR组件发射的是脉冲电磁波，其峰值功率较大，故TR组件的电源模块必须能够提供相应的峰值功率，并且具有较高的动态响应速度[1]。其次，由于相控阵雷达一般需要 $7 \times 24$ 小时工作，而TR组件电源模块的工作温度可达60摄氏度甚至更高，因此要求电源模块具有非常高的可靠性。此外，雷达操作人员必须能够实时监控电源模块的工作状态，以便在其发生故障时能够及时更换。而且，电源模块应具备热插拔更换的能力，在单个模块维修更换时，不能停机影响雷达的工作，并且更换完毕以后能够立即恢复TR组件的工作状态。综上所述，由于受到体积、重量和工作环境的限制，TR组件的电源模块必须具备高功率密度、高效率、高可靠性和高可维修性[2] [3]。

传统的相控阵雷达对TR组件多采用两级供电方式，第一级由一个AC/DC转换模块将输入的交流电转换为一个较高的直流电压并进行功率因数校正，第二级由多个DC/DC转换模块分别将该直流高电压转换成TR组件所需的各种直流低电压，然后通过直流输电线路将多种直流低电压提供给所有的TR组件[1] [4] [5] [6]。这种集中供电的方式主要存在以下几种问题：1) 如果第一级AC/DC转换模块发生故障，则第二级所有的DC/DC模块都没有高直流电压输入，因此对第一级AC/DC转换模块的可靠性要求极高[2]。2) 第二级多个DC/DC模块中任意一个发生故障，则所有的TR组件将因缺少对应的直流低电压输入而不能工作，因此对所有的DC/DC模块的可靠性要求也极高。3) 第一级AC/DC模块和第二级DC/DC模块之间的连接比较复杂，不支持热插拔，维修时往往需要系统长时间停机，严重影响相控阵雷达系统的可用性。4) 集中供电方案对电源散热装置的要求较为苛刻。此外，在低电压大电流的工作条件下，输电线路的损耗较大，整个电源系统的效率较低[2] [3]。

为了克服集中式供电方式的缺陷，本文提出了一种采用分布式方式供电的TR组件电源系统实现方案。该电源系统使用两个相同的AC/DC转换模块构成冗余输入电源，将220 V交流输入转换为12 V直

流输出, 给 8 个相同的 TR 电源模块供电。单个 TR 电源模块使用多个 DC-DC 电压转换器以生成不同的电压, 用于给 8 个 TR 模块提供所需的电能。在该电源系统中, 总共有 8 个 TR 电源模块用于给 64 个 TR 模块供电。与集中式供电方式相比, 单个 AC/DC 模块发生故障不会影响雷达系统的正常运行, 单个 DC/DC 模块发生故障仅仅会影响 8 个 TR 组件, 其他 TR 组件仍可以正常运行。此外, 每个 TR 电源模块的电压输出可以精确的调整, 电压、电流、功耗和温度可以被实时监控。因此, 该 TR 组件电源系统具有较高的可靠性和可维修性, 能够有效改善电源的输出质量与效率, 对散热装置的要求不高。同时, 该电源系统的 AC/DC 模块以及 TR 电源模块均支持热插拔, 其架构简单、连接可靠, 可以极大地节省装配及维修时间, 提高相控阵雷达系统的可用性。以下是对该分布式 TR 组件电源系统的详细介绍。

## 2. 分布式 TR 组件电源系统

### 2.1. 系统整体架构

给固态有源相控阵雷达 TR 组件供电的分布式电源系统, 其系统整体架构示意图如图 1 所示。电源系统的输入电压为交流 220 V, 用于给两个相同的 AC/DC 转换模块供电, 输出 12 V 直流电压。这两个 AC/DC 转换模块的输出通过或门二极管并联在一起, 用于给负载冗余供电。上位机通过 I<sup>2</sup>C 接口监视这两个 AC/DC 模块的工作状态以及输入、输出电流。每一个 AC/DC 的输出电流都能够满足负载的电流要求。因此, 当其中一个 AC/DC 转换模块出现故障时, 上位机将关闭这个故障模块。由于二极管的单向导通特性, 某一个 AC/DC 电源转换模块出故障并不会影响 12 V 直流总线的输出, 因此大大提高了从 220 V 交流电源到 12 V 直流这一电源转换的可靠性。使用或门二极管来并联两路 12 V 直流电源输出的方案非常简单, 但存在功耗大、发热严重的缺点。可以采用大功率的 MOSFET (金属 - 氧化物 - 半导体场效应晶体管) 来代替二极管。MOSFET 的导通内阻可以低至几毫欧姆, 大大降低了压降损耗, 可以实现更高的电源效率。而且由于无需散热器, 可以节省大量的电路面积, 也减少了供电系统的散热源, 降低了整个电源系统对散热的要求。

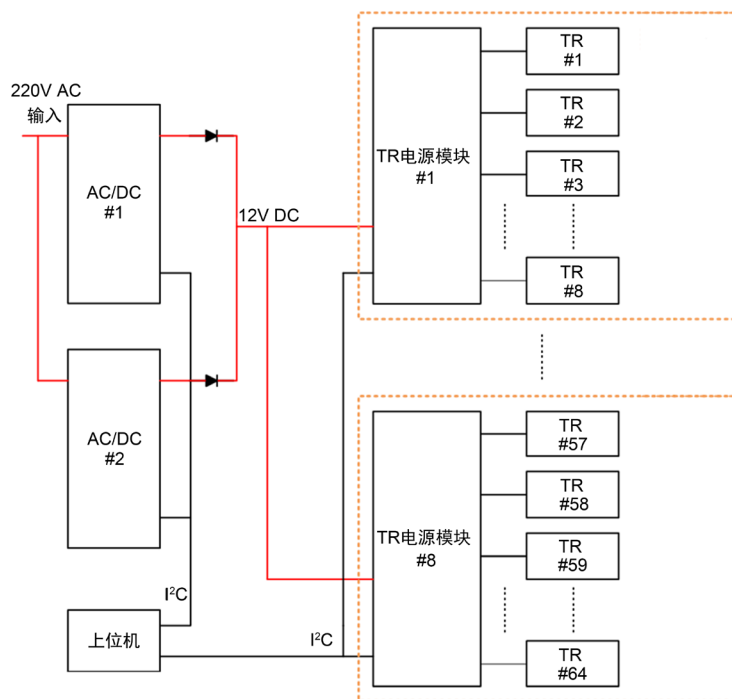


Figure 1. Schematic of the distributed TR power system

图 1. 分布式 TR 电源系统示意图

AC/DC 转换模块的负载包括 8 个相同的 TR 电源模块, 该电源模块从 12 V 直流输入取电, 然后分别使用不同的 DC-DC 电压转换器将 12 V 输入电压转换成几路不同电压的直流输出。该分布式 TR 电源系统总共有 8 个 TR 电源模块, 每一个 TR 电源模块给一组 8 个 TR 组件供电, 8 个 TR 电源模块分别给 64 个 TR 组件供电。每一个电源模块都提供了电压、电流、功率和温度监测功能。若有一个 TR 电源模块发生故障, 可以通过上位机关闭该 TR 电源模块的输出。在这种情况下, 只有一组 8 个 TR 组件受到影响, 其他的 TR 组件仍然可以正常工作, 大大提高了雷达系统的可靠性。同时, TR 电源模块和 TR 组件支持热插拔功能, 可以在雷达不停机的情况下更换故障模块, 大大提高了雷达系统的可维修性。

## 2.2. TR 电源模块

单个 TR 电源模块的示意图如图 2 所示。TR 电源模块从 12 V 直流输入取电, 经 EMI 滤波器滤除传导及辐射干扰以后, 再分别通过不同的 DC/DC 电压转换模块, 得到不同的直流电压(图示的 12 V, 5.5 V, -10 V 和 -15 V), 用于给 TR 组件供电。TR 电源模块的辅助供电单元从 EMI 滤波器的输出端取电, 用于给控制单元和监控单元供电。监控单元可以监控 DC/DC 变换模块的输出电压、电流, 以及 TR 电源模块的温度。同时, 监控单元还可以通过调整 DC-DC 电源转换模块中反馈电压引脚  $V_{FB}$  端的电压值来精确调整输出直流电压的电压值, 具体的实施方法将在监控单元部分做详细说明。

控制单元与监控单元可以读取 DC/DC 电压变换器输出的电压、电流和温度信息, 然后将这些监控信息传送给上位机。控制单元与上位机之间的通信接口做了隔离处理, 以防止在热插拔过程中产生的静电对电源模块的控制单元以及上位机的控制器造成损伤。

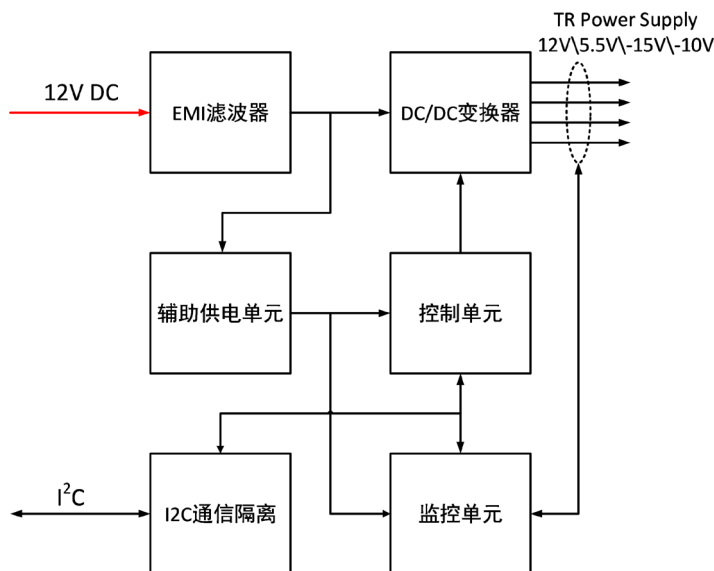


Figure 2. Schematic of single TR power module  
图 2. 单个 TR 电源模块示意图

### 2.2.1. DC/DC 变换模块

根据某型号 TR 组件的用电需求, 对单个 TR 组件, TR 电源模块需要提供 4 种不同的输入电压, 分别为 12 V, 5.5 V, -15 V 和 -10 V, 对应的电流分别为 1 A, 1 A, 0.1 A 和 0.1 A。由于一个 TR 电源模块需要给 8 个 TR 组件供电, 因此单个 TR 电源模块提供的电流至少应为 8 个 TR 组件所需电流的总和。单个 TR 电源模块的输入/输出的电流、电压及功率参数如表 1 所示。

**Table 1.** Input and output parameters of a single TR power module  
**表 1.** 单个 TR 电源模块的输入输出参数

名称	规格	电压(V)	电流(A)	功率(W)
输入参数		12	15	180
输出参数 1		12	8	96
输出参数 2		5.5	8	44
输出参数 3		-15	0.8	12
输出参数 4		-10	0.8	8

由于 TR 电源模块的输入电压为 12 V，所以其输出的 12 V 电压不需要做 DC/DC 变换，直接从 EMI 滤波器的输出端取电即可。对于 5.5 V、-15 V 和 -10 V 输出电压，则需要分别通过 DC/DC 变换获得。

根据单个 TR 组件 5.5 V/1 A 的供电需求，每个电源模块要为 8 个 TR 组件提供约 5.5 V/8 A。为了保证 20% 的供电余量，因此设计对 5.5 V 电压点输出电流为 10 A，以满足 8 个 TR 组件对 5.5 V 电源的需求，该功能由一个 DC/DC 转换模块实现。

对于 TR 组件要求的 -10 V 与 -15 V 两个电压点，单个 TR 组件对电流的需求均为 0.1 A，对应电源模块的要求为 0.8 A 电流输出。为了保证 20% 的设计余量，电源模块对 -10 V 和 -15 V 的设计输出电流均为 1 A。从 12 V 到 -10 V/1 A 及 -15 V/1 A 的 DC/DC 转换分别由一个 DC/DC 负压转换模块实现。

### 2.2.2. 监控单元

监控单元一个电压监控及调整芯片实现，该芯片可以对 TR 电源模块的各路输出进行电压、电流与功率监控；同时，通过 4 个外置的温度传感器，可以对电源模块 PCB 板上关键部位的温度进行监控。此外，该芯片还有内置的 DAC 输出，可以通过调节 DC-DC 电压转换模块反馈电压引脚  $V_{FB}$  端的电压值来精确调节输出直流电压的幅度。该芯片对 DC-DC 电压转换器输出的电流、电压的监控以及对输出电压幅值调整的示意图如图 3 所示。DC-DC 电压转换器的输出电压  $V_{OUT}$  通过一个串联的电流感应电阻  $R_{SENSE}$  给负载供电。芯片的电流感应引脚正负端  $I_{SENSEP}$  和  $I_{SENSEM}$  分别连接到电流感应电阻  $R_{SENSE}$  的两端，用于测量其两端的电压差。又因为电流感应电阻的阻值已知，因此可以通过欧姆定律计算出流经该电阻的电流值。芯片的电压感应引脚正负端  $V_{SENSEP}$  和  $V_{SENSEM}$  分别连接到负载的正负端，用于测量其两端的电压差。DC-DC 转换器的电压反馈引脚  $V_{FB}$  通过由电阻  $R_2$  和  $R_3$  组成的分压网络来设定输出到负载端的电压。芯片内部的 DAC 可以生成高精度的电压，然后经过电阻  $R_1$  输出到  $V_{FB}$  端，用于对  $V_{FB}$  端的电压作小幅度、高精度的调整，从而使 DC-DC 转换器的输出电压与设定值的误差保持在 0.25% 以内。

### 2.2.3. 控制单元

TR 电源模块的控制单元，使用了一个单片机作为管理单元，通过 I<sup>2</sup>C 接口实现对 TR 电源模块内部各个模块的管理与监控，以及与上位机进行通信。单片机的 GPIO 引脚分别与 DC/DC 转换器芯片的使能 (ENABLE) 引脚相连，通过控制使能引脚输出电压的高低，可以实现对 DC/DC 转换器的开关功能，以便在 TR 组件发生故障时切断对 TR 组件的电源供应。

### 2.2.4. 其他模块

EMI 滤波器针对 12 V DC 直流输入的共模传导干扰和辐射传导干扰进行抑制与衰减，以提高电源模块后续直流电源的可靠性。同时，针对 TR 单元脉冲式发射电磁波的特点，EMI 滤波器后端增加大容量的 BULK 铝电解电容作为储能元件，以减小电源的纹波。BULK 电容值的大小根据 TR 单元脉冲发射时可接受的电源电压变化、工作电流以及脉冲频率决定。

辅助供电单元为控制单元和监控单元提供 3.3 V 的电压和最高 1 A 的电流。辅助供电单元由一个 DC/DC 开关电源模块实现从输入 12 V 到输出 3.3 V 的电压变换，用于实现 3.3 V/1 A 输出。

为了防止热插拔 TR 电源模块产生的静电对控制单元的单片机芯片以及上位机的控制芯片造成损伤，控制单元与上位机之间的通信接口使用静电冲击防护芯片作了双向隔离处理。

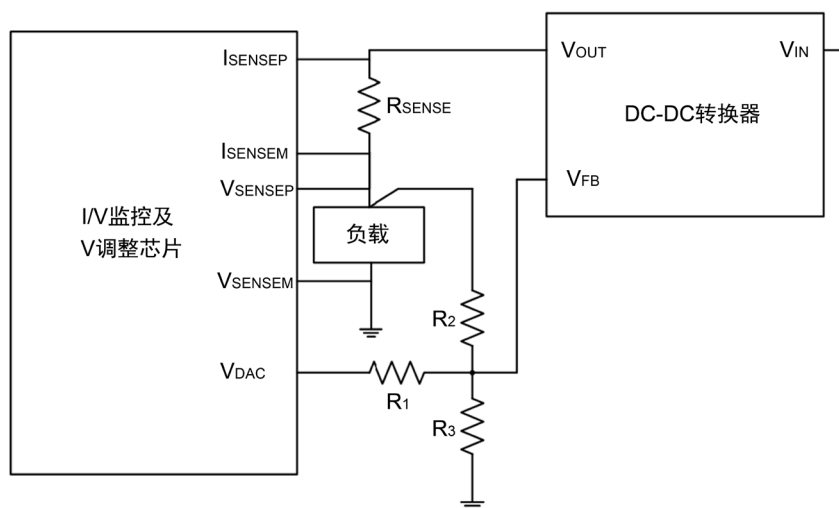


Figure 3. Schematic of monitoring and adjusting the output voltage

图 3. 对输出电压监控及调整的示意图

### 3. 结果

图 4 展示了单个 TR 电源模块成品的照片，该电源模块已经安装好机械工装用于散热。图 4 右上角可见两个大容量的铝电解电容，其作为储能元件，用于减小电源的纹波。

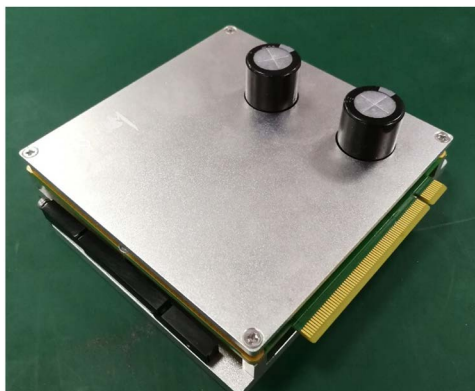


Figure 4. Photo of a single TR power module

图 4. 单个 TR 电源模块的照片

由 2 个 AC/DC 转换模块，8 个 TR 电源模块以及 1 台上位机组成的如图 1 所示的分布式 TR 电源系统已经制成实际产品，并集成在由珠海纳睿达科技有限公司研制的某型 X 波段双偏振固态有源相控阵天气雷达中，用于给该雷达的 64 个 TR 单元供电。

该型雷达长期的稳定运行表明，分布式 TR 电源系统具有很高的可靠性和可维修性，能够有效改善电源的输出质量、输出效率以及动态响应特性。该 TR 电源系统对散热装置的要求不高，标准的散热设

计即使可以使电源模块保持较低的温度。由于 TR 电源模块和 TR 组件之间的电源连接线都通过 PCB 板上的走线实现,做到了无电缆设计,大大提高了连接的可靠性,节省了装配和维修的时间。DC-DC 电压转换器的输出直流电压值与设定值的误差保持在 0.25%以内,提高了给 TR 组件供电的电压稳定性和精度。

该分布式 TR 电源系统的架构非常简单,每一个 TR 电源模块都完全相同,通过使用模块化的实现方式,简化了电源系统的设计。本文展示了给一种具有 64 个 TR 组件的固态有源相控阵雷达供电的方案。对于具有更多 TR 组件的固态有源相控阵雷达,可以通过简单地扩充 AC/DC 模块和 TR 电源模块的数量来满足其供电需求。TR 电源模块作为一种通用的组件,可以直接应用到不同的雷达系统中,大大减小了硬件开发的成本和时间,简化了雷达产品升级换代的流程。

#### 4. 总结

本文提出了一种用于给固态有源相控阵雷达的 TR 组件供电的分布式电源系统的实现方案,并详细介绍了各个子模块的工作原理。与集中式供电方式相比,该 TR 电源系统可靠性高,可维修性好,能够有效改善电源的输出质量、输出效率以及动态响应特性。此外,该 TR 电源系统还有对散热装置要求不高,连接可靠,架构简单,易于扩展等优点。该 TR 电源系统已经被应用于某型号的 X 波段双偏振相控阵天气雷达上并长期稳定运行,在满足负载电性能的同时,显著提高了相控阵雷达的供电质量、可靠性及可维护性。该 TR 电源系统具有较高的应用价值,其可以作为通用模块,经过简单的扩充以后应用于其他型号的雷达,通过硬件复用来简化新一代雷达产品的开发流程,缩短研发时间,降低研发成本。

#### 基金项目

本项目由广东省引进创新创业团队项目资助。

#### 参考文献

- [1] 刘传亮. T/R 组件小型化脉冲电源的研制[J]. 现代雷达, 2018, 40(5): 66-68.
- [2] 李旭, 王峰, 徐茂格, 等. 相控阵雷达 TR 组件电源[P]. 中国专利申请, CN109633559A, 2019.
- [3] 钱倩云, 孙超, 张峻岭. 相控阵雷达的分布式供电设计[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(10): 176-180.
- [4] 汪军, 张维平. 新型雷达固态收发模块电源的设计[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(1): 104-107+118.
- [5] 张俊. 基于 LLC-DCT 母线变换器的收/发模块电源设计[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(11): 178-182.
- [6] 黄晓燕, 白璐, 王正之. 电源 DC-DC 输出电流波形改进设计[J]. 数字技术与应用, 2019(4): 91.