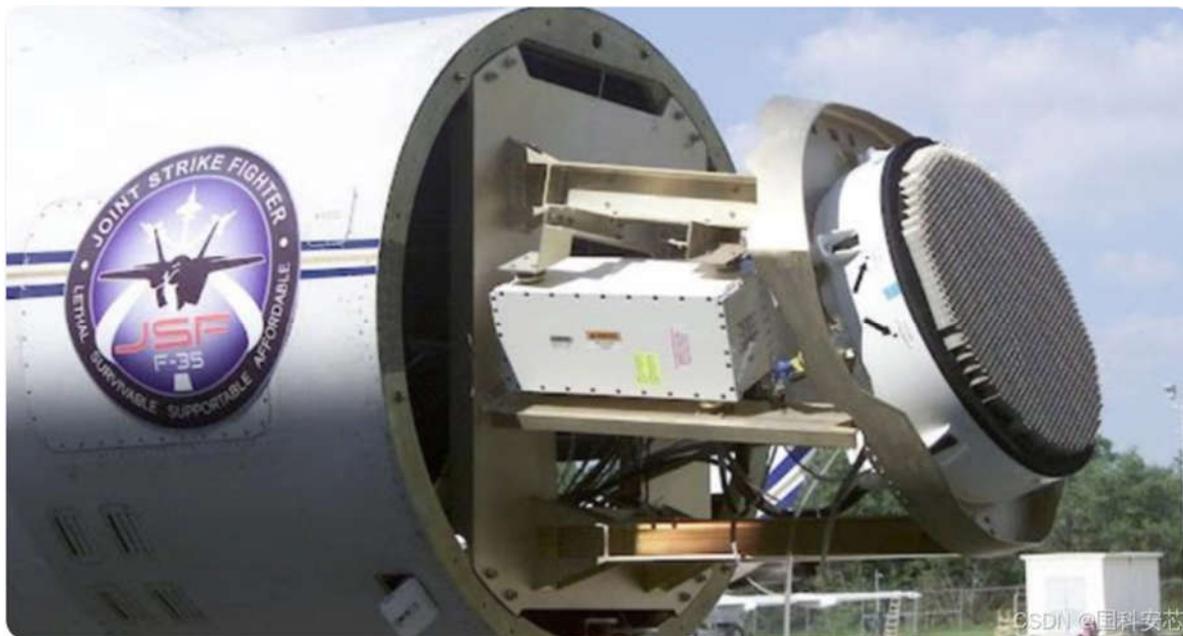


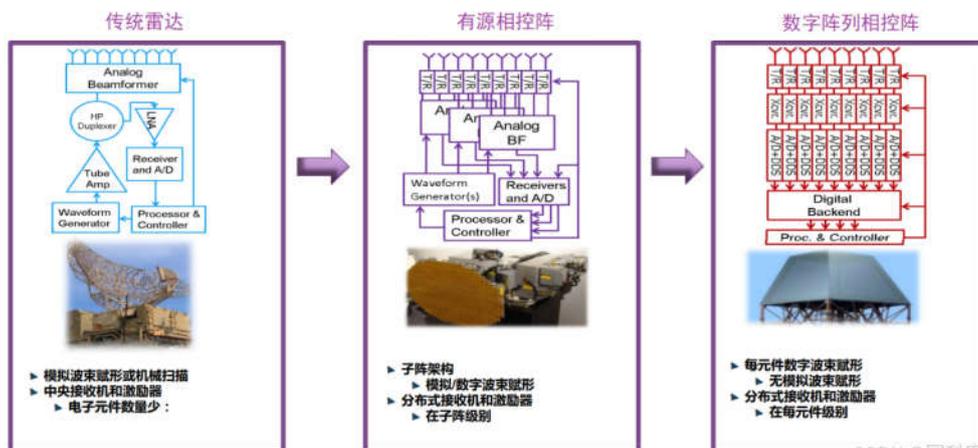
相控阵雷达电源芯片详解

一 相控阵雷达简介

相控阵雷达即相位控制电子扫描阵列雷达,其快速而精确转换波束的能力使雷达能够在1min内完成全空域的扫描。所谓相控阵雷达是由大量相同的辐射单元组成的雷达面阵,每个辐射单元在相位和幅度上独立受波控和移相器控制,能得到精确可预测的辐射方向图和波束指向。雷达工作时发射机通过馈线网络将功率分配到每个天线单元,通过大量独立的天线单元将能量辐射出去并在空间进行功率合成,形成需要的波束指向。下图是相控阵雷达实际应用产品图。

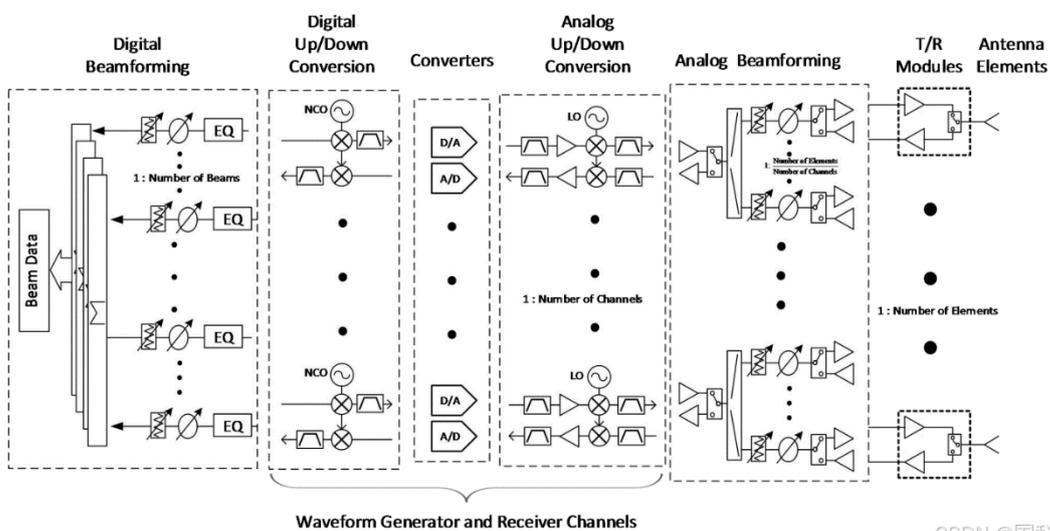
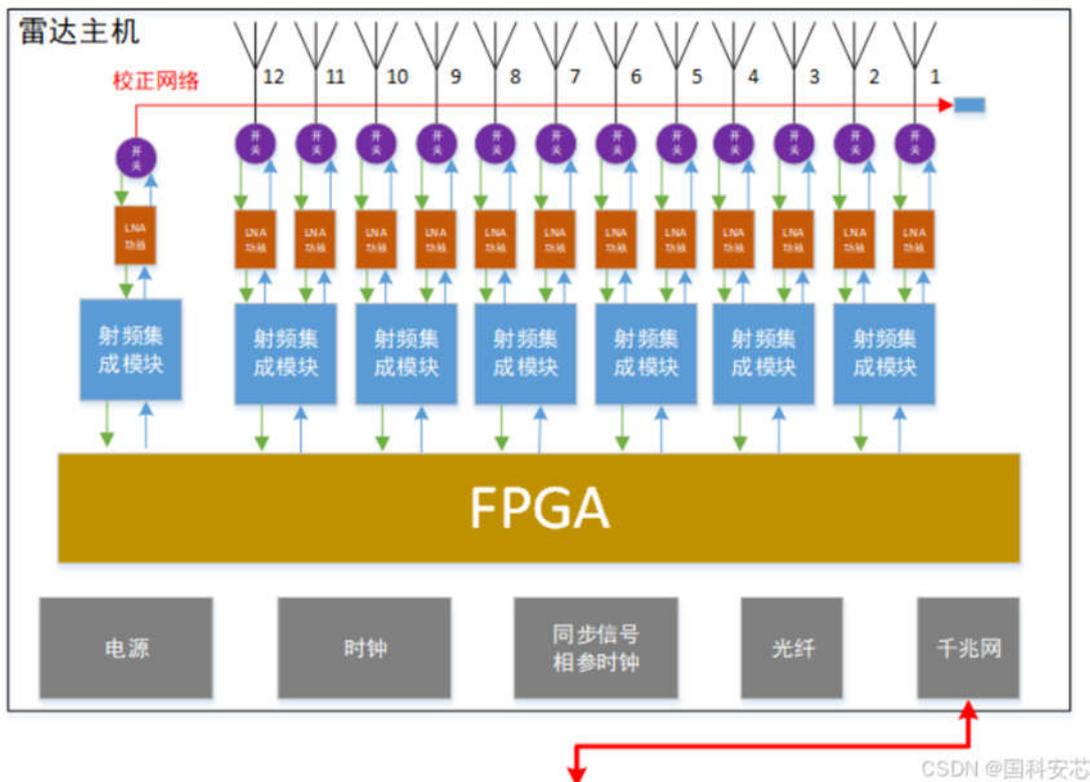


相控阵雷达的发展历程从传统的无源相控阵 (PESA) 开始,每阵元通过共用发射接收组件控制波束。随后发展到有源相控阵 (AESA),每阵元配备独立的 T/R 组件,提高了灵活性和性能。最终,数字相控阵 (DAR) 的出现,通过全数字化波束形成,进一步提升了雷达的分辨率和灵活性。这一过程中,对雷达组件的要求也从简单的移相器发展到复杂的数字 T/R 模块和波束形成器,体现了技术的进步和性能的提升,同时也对整个系统的集成度要求越来越高。



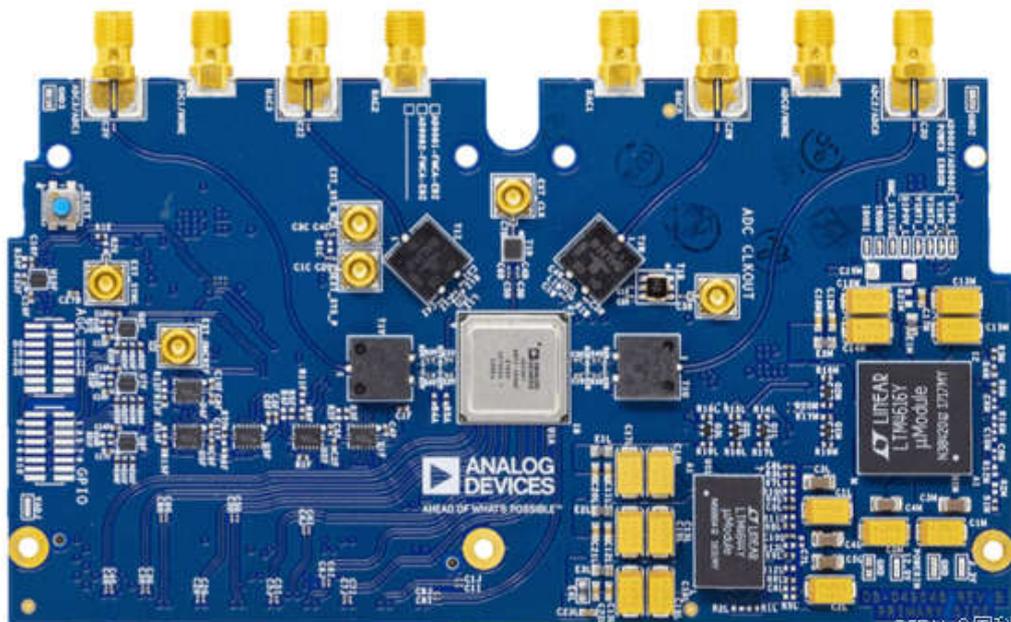
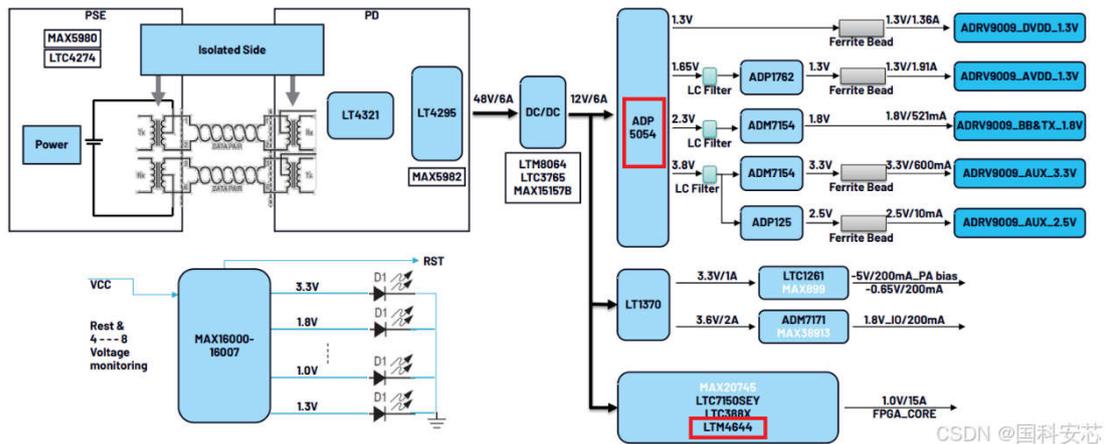
二 相控阵雷达整体电源方案

相控阵雷达主要由天线阵列、相位器件、信号处理器、控制器四部分组成，信号处理器主要由 FPGA、DSP 等高性能计算芯片实现，TR 组件主要实现相位器功能，T/R 组件的作用是对发射/接收信号的放大以及对信号幅度、相位的控制等等，可以说一部有源相控阵雷达 T/R 组件的数量决定了这部雷达的功率、最大探测距离以及对不同距离上目标的探测能力等性能。相控阵雷达主机方案如下：



示意图说明了相控阵雷达各组件的配比关系，其中天线和 T/R 模块为数量最多，波束形成器根据选型如 ADRV1000 为 4 通道则为 4: 1 关系，ADC 和 DAC 也根据转换器可提供的通道数等比例配比，数字处理部分则根据 FPGA 的资源 and 运算量匹配数量。

下图为 ADI 雷达 DEMO 电路中典型电源方案和中频处理板卡：

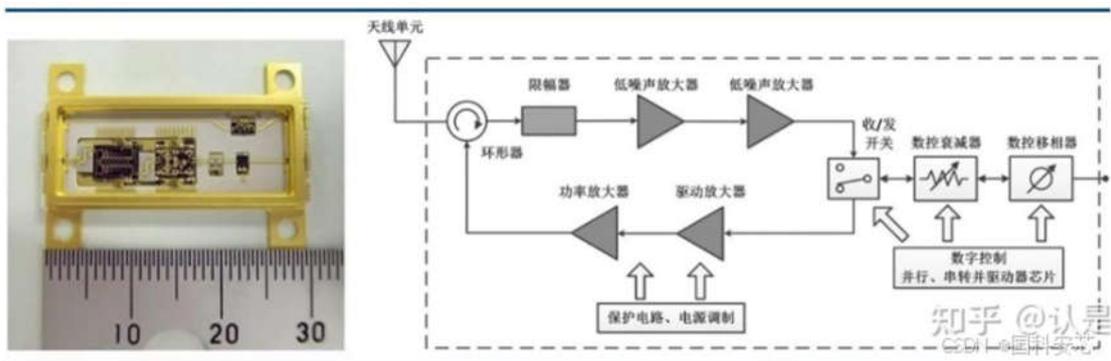


可以看出相控阵雷达数字电路部分 LTM4644 已经是推荐使用芯片，并且案例中射频板卡采用两片小型化模组芯片，分别为 LTM4644 和 LTM4616，他们的特点是外围电路简单输出电流能力强，这能有效减少电源使用面积，有利于板卡设计的小型化和灵活排版。

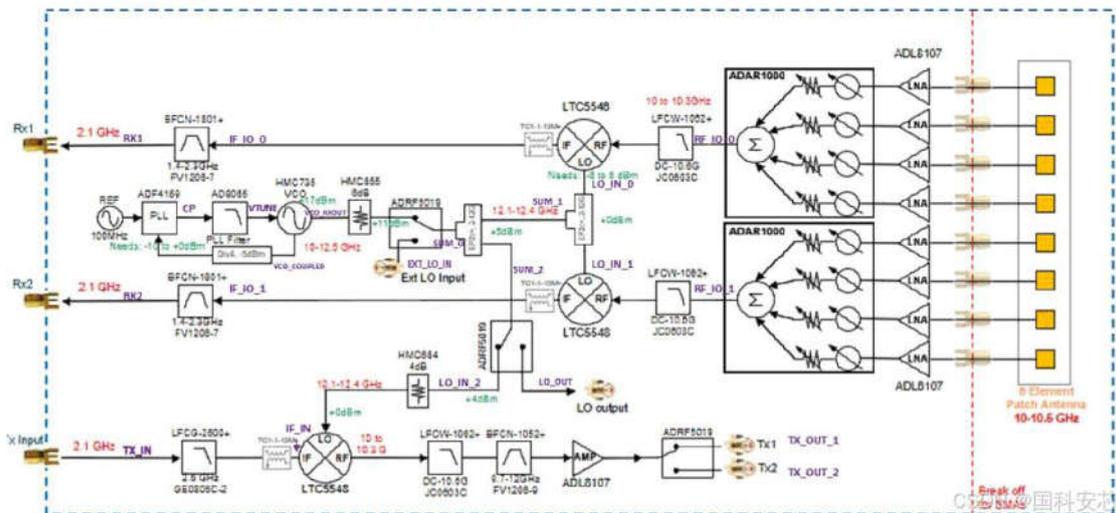
三 TR 组件典型电源方案

在相控阵雷达中，使用最多的组件是 T/R（发射/接收）组件。T/R 组件是相控阵雷达的核心部件，它们的数量可以占到整个雷达造价的 60%左右。根据不同的应用和雷达大小，T/R 组件的数量可以从几百到几万甚至几十万不等。例如，机载相控阵雷达中，T/R 组件的数量可能有 1000 至 2000 个，而舰载对空防御 T/R 组件数目可能有 4000 至 8000 个。在地基相控阵战术雷达中，每个阵面可能需要 1 万个 T/R 件。

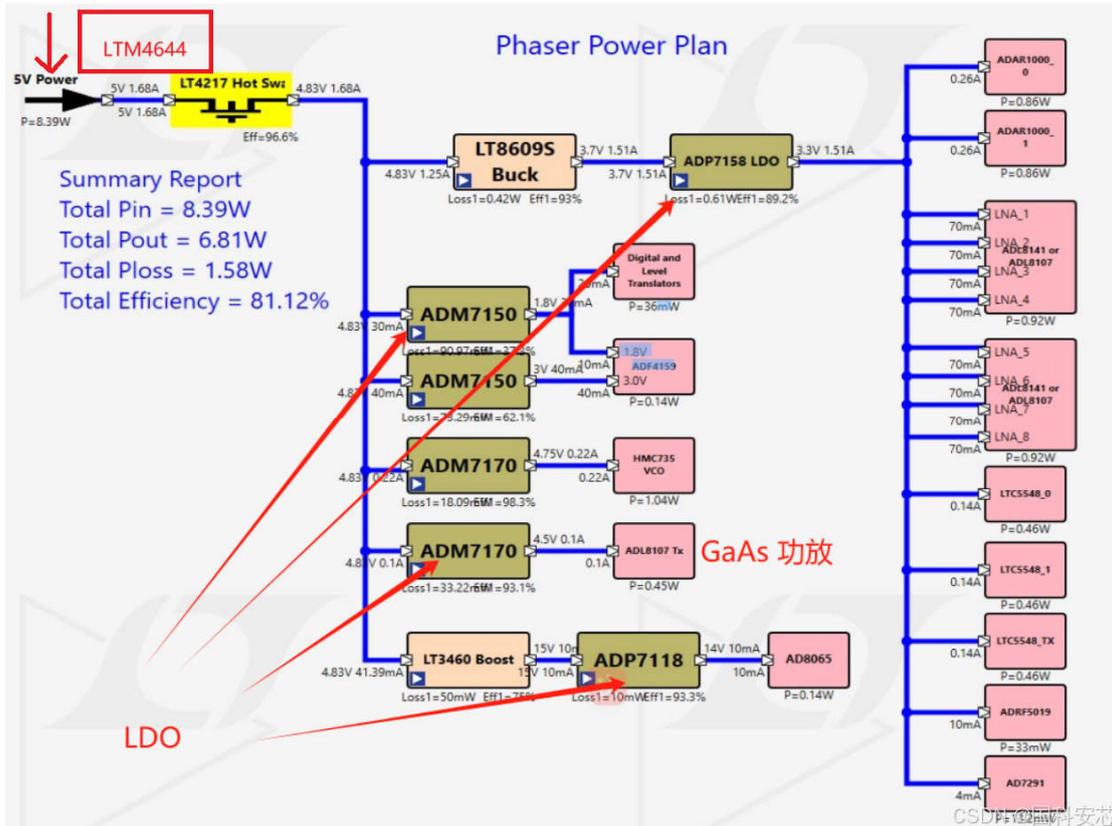
T/R 组件包括数控移相器、数控衰减器、功率放大器（PA）、低噪声放大器（LNA）、限幅器、环形器等，以及相应的控制电路和电源调制电路。T/R 组件的性能参数直接影响着雷达系统的工作距离、空间分辨率和接收灵敏度等关键性能指标。高性能、低成本、小型轻量化和高集成化的 T/R 芯片及组件是发展有源相控阵雷达的关键，参加下面电路。



下面重点分析 ADI 相控阵阵波束成形方案，下图是 ADI 相控阵波束成形方案原理框图，该方案提供探索波束成形、波束转向、天线衰减、频率调制连续波(FMCW) 雷达和合成孔径成像的机会。具有 8 阵元相控阵、10GHz 至 10.5GHz 工作频率范围、360°相位调整（带 2.8°分辨率）和 31dB 增益调整（带 0.5dB 分辨率），非常适合用于卫星通信、5G 移动通信、汽车、军事和商用雷达。



下图是 ADI 相控阵波束成形电路电源方案，可以看出整个方案输入电路是 5V，可以用 DCDC 电源芯片 LTM4644 实现，后面多颗 LDO 通过二次转换输出更稳定的低压给射频元器件供电。



在雷达整体电源方案中使用 DCDC ADP5054 对 TR 组件进行供电，ADP5054 是核心 DCDC 供电芯片，主要规格如下：

FEATURES

- Wide input voltage range: 4.5 V to 15.5 V
- ±1.5% output accuracy over full temperature range
- 250 kHz to 2 MHz adjustable switching frequency with individual 1/2x frequency option
- Power regulation
 - Channel 1 and Channel 2
 - Programmable 2 A/4 A/6 A sync buck regulators with low-side FET drivers
 - Channel 3 and Channel 4: 2.5 A sync buck regulators
- Flexible parallel operation
 - Single 12 A output (Channel 1 and Channel 2 in parallel)
 - Single 5 A output (Channel 3 and Channel 4 in parallel)
- Low 1/f noise density
 - 40 μV rms at 0.8 V_{REF} for 10 Hz to 100 kHz
- Precision enable with 0.811 V accurate threshold
- Active output discharge switch
- FPWM/PSM mode selection
- Frequency synchronization input or output
- Power-good flag for Channel 1 output
- UVLO, OCP, and TSD protection
- 48-lead, 7 mm × 7 mm LFCSP
- 40°C to +125°C operational junctional temperature range

APPLICATIONS

- FPGA and processor applications
- Small cell base stations
- Security and surveillance
- Medical applications

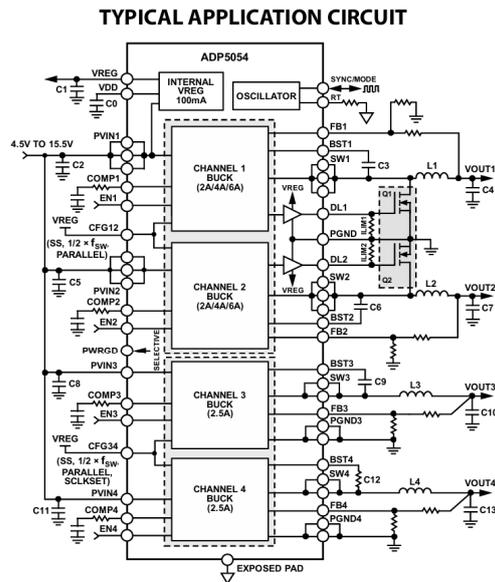


Figure 1.

支持 4 路输出，通道 1 和 2 典型配置是 2A、4A 和 6A，对于通道 3 和 4 典型配置是 2.5A，输入范围 4.5 到 15.5V，LTM4644 核心指标除最大电流外均可和 ADP5054 对标，所以 TR 组件中核心 DCDC 芯片可以用 LTM4644 来替换。

最早的 TR 组件材料是砷化镓(GaAs)。砷化镓具有高电子迁移率的特点，能够支持较高频率的信号处理。在这一阶段，相控阵雷达开始具备了相对较高的精度和探测距离。然而，砷化镓在高温和高功率下的性能表现有限，导致其应用范围受到了一定的限制。随后出现的第二代材料是磷化铟(InP) 和砷化铟(InAs)。与砷化镓相比，这些材料在高频和高功率下的表现更为出色，极大地提升了雷达系统的性能。这些材料在一定程度上解决了第一代材料在高温和高功率下的不足，进一步拓展了相控阵雷达的应用范围。现阶段的主流材料是氮化镓(GaN)和碳化硅(SiC)。氮化镓具有极高的热导率和电子迁移率，可以在高功率和高温环境下稳定工作，使雷达的探测距离和精度大幅提升。同时，碳化硅作为衬底材料，能够支持氮化镓的高效工作，进一步提高了 TR 组件的性能。第三代材料带来了三大变化：体积更小、功率更大、功耗更低。这些变化使得相控阵雷达的应用范围更广，探测距离更远，整体性能大幅提升。第三代氮化镓技术主要应用于 TR 组件中功放单元，氮化镓功放芯片工作电压为 28V，砷化镓功放芯片工作电压为 6V，氮化镓 TR 方案可增加一级 Boost 升压电路给氮化镓功放芯片供电。下图是国内 TR 组件芯片头部公司铖昌科技相关产品性能参数。

GaN功率放大器芯片 GaAs功率放大器芯片 GaAs单电源功率放大器芯片 GaAs收发多功能放大器芯片 GaN载片式功率放大器 Ga

型号	频率范围(GHz)	饱和输出功率(dBm)	功率增益(dB)	功率附加效率(%)	输入驻波	工作条件	工作电流(mA)	工作电压(V)
GN1605	14.5~18	47	19	35	2	脉冲	5600	28
GN1606	14~18	42	21	39	3	脉冲	1430	28
GN1603	10~18	40	18	31	1.8	脉冲	1300	28

GaN功率放大器芯片 GaAs功率放大器芯片 GaAs单电源功率放大器芯片 GaAs收发多功能放大器芯片 GaN载片式功率放大器 Ga

型号	频率范围(GHz)	P1dB输出功率 (dBm)	饱和输出功率(dBm)	功率增益(dB)	功率附加效率(%)	工作条件	工作电流(mA)	工作电压(V)
G3803-3	34~38	-	19	20	25	连续波	60	6
G1803	34~38	33.5	-	21.5	31	脉冲	1300	6
G3801-4	33~38	27.5	-	18.5	31	连续波	340	6

四 总结分析

基于以上分析，我们对相控阵雷达器件整体供电需求做了如下汇总：

相控阵雷达基本组成电路及电源推荐			
关键组件	电子器件	供电要求	推荐电源
相控阵天线		无源器件	无
T/R组件	功率放大器	1. 供电电压5V-10V, 电流: 大 (GaAs方案)	DCDC (4644) +LDO
		1. 供电电压28V, 电流: 大 (GaN方案)	DCDC (Boost) +LDO
		2. PA偏置电压-5V, 电流: 小, mA级别	
	低声放大器	1. 单轨电压3.3/5V, 电流: 小, 要求: 纹波和噪声小	DCDC (4644) +LDO
		2. 双轨电压±3.3/±5V, 电流: 小要求: 纹波和噪声小	
	RF驱动放大器	电压: 5V, 电流: 大于几百mA	DCDC (4644) +LDO
	射频T/R开关	供电电压: 1.8-5V; 电流: 小 要求: 噪声小	
	锁相环	供电电压: 3.3V, 电流: 几十mA-几百mA	
波束合成芯片	供电电压: 3.3V, 电流: 1-2A		
环形器	无源器件	无	
限幅器	无源器件	无	
中频处理芯片	高速DAC	core电源: 1V, 电流: > 2A 纹波小, 电源稳定	DCDC (4644) +LDO
		模拟部分: ±1.8V, 电流: 几百mA; 建议低噪声电源	
		IO供电: 1.8-3.3V, 电流: 小	
		时钟: 1V或者1.8V, 电流: 小	
	高速ADC	数字供电: 5V, 电流: < 100mA; 建议低噪声电源	
	模拟供电: 3.3V, 电流: 几百mA; 建议低噪声电源		
	基准电源: 2.5V, 电流: < 100mA; 稳定		
FPGA	FPGA	core电源: 1V, 电流: > 2A 纹波小, 电源稳定	DCDC (4644)
		I/O供电: 1.8V到3.3V, 电流: 小	
		模拟供电: 1.8V-3.3V, 电流: 小	
		其他供电: 0.9V-1.8V, 电流: 小	

CSDN @国科安芯

基于以上调研情况我们发现像 LTM4644 小型化模组电源芯片适用于:

- 1: FPGA、DSP、SOC 等芯片的 core 电源, core 电源一般电压小电流大不同芯片要求不一, 但普遍都要大于 2A。
- 2: 对于 R/T 组件等要求低噪声干扰的器件, 最好是直接使用纹波更小的 LDO, 可避免 DCDC 的开关噪声, 而 LTM4644 可用给 LDO 提供前级电压, 降低 LDO 输入输出压差减少 LDO 功耗和发热量。
- 3: 相控阵板卡需要多种电压供电, 需要 0.9V、1.0V、1.2V、1.5V、2.5V、3.3V 等多种电压, LTM4644 电源选支持 4 路输出, 相比于单路 DCDC 电源可以减少 PCB 使用面积。
- 4: 相控阵雷达电源芯片可靠性要求高, 温度范围较宽, 耐压较高, LTM4644 可以满足该应用场景要求。

LTM4644 系列芯片因其卓越的性能和高度集成的特性, 是相控阵雷达方案理想的电源芯片方案。这款产品能够在 4V 至 14V 的宽输入电压范围内工作, 提供 0.6V 至 5.5V 的输出电压, 并支持 4 通道高达 16A 的电流输出。典型纹波 10mV 左右, 其集成了开关控制器、功率 MOSFET、电感器等关键元件, 使得电源设计更为紧凑、高效, 同时简化了设计流程。

国内众多半导体企业纷纷响应这一趋势, 推出了各自的 4644 系列替代产品。这些产品在保持与 LTM4644 相似性能指标的同时, 还提供了更具竞争力的价格和更灵活的本地化服务。国产品牌如 ASP4644A3B (国科安芯)、HCE4644MLMB (七星华创)、SM4644MPY (国微电子)、MAC4644GBS (天仪航太) 等, 它们在性能上与 LTM4644 相近, 同时在成本控制、供应链稳定性以及本地化服务方面具有优势。

国产化替代不仅有助于降低成本，提高市场竞争力，还有助于保障国内供应链的稳定性和安全性。国产品牌的优势包括成本效益、供应链稳定、本地化服务和定制化能力。随着国内电子产业的快速发展，国产电源管理芯片在性能和可靠性上不断提升，已经在多个领域实现了对进口产品的替代。

在这一背景下，对其中一些比较有产品特色品牌的 4644 系列芯片进行对比分析，如需更多国产化 4644 名单请参考“国产替代 4644 国内厂家对比情况”里面有更详细的和广泛的国产 4644 型号。

品牌参数	ASP4644A3B (国科安芯)	LTM4644MPY (ADI)	HCE4644MLMB (七星华创)	SPES4644UT (大能智创)	ACP4644NM (航芯微)	FHT4644MY (风华高科)
输入电压	4V to 15V	4V to 14V 2.375V to 14V	4.0V to 4V	4V to 14V	4V to 20V 扩展 2.375V to 20V	4.0V to 15V
通道数	4 (多路并联)	4 (多路并联)	4 (多路并联)	4 (多路并联)	4 (多路并联)	4 (多路并联)
输出电压	0.6V to 5.5V	0.6V to 5.5V	0.6V to 5.5V	0.6V to 5.5V	0.6V to 5.5V	0.8V to 5.5V
输出电流	4A	4A	4A	4A	4A	4A
纹波	4.5mV	5mV	20mV(典型值)	10mV	10mV	10mV
最高效率	94.50%	95.00%	94.50%	95.00%	95.00%	92.00%
电压调整率	±1.5%	±1.5%	1.50%	1.50%	0.04% (0.15%)	±2%
工作频率	1MHz	1MHz	1M	1M	1MHz	1MHz
工作温度	55°C to 125°C	-55°C to 125°C	-55°C to 125°C	-55°C to 125°C	-55°C to 125°C	-40°C to 125°C
封装	BGA-77	BGA-77	BGA-77	BGA-77	BGA-77	BGA-77
尺寸	15*9*4.46mm	9*15*5.01mm	15*9*5mm	15*9*2.5mm	9*15*5.01mm	9*15*4.32mm 9*15*5.01mm
特色说明	有抗辐照型号 适合高辐射环境	行业标杆		超薄封装	高耐压	提供多种封装

这些芯片在性能上已经能够与国际品牌相媲美，甚至在某些方面实现了超越，比如国科安芯 ASP4644 芯片有抗辐照商业航天级产品系列，可以满足商业航天、军工等更高安全等级要求。它们不仅满足了相控阵雷达电源管理解决方案的需求，还有助于提升国内半导体产业的自主创新能力和市场竞争力。随着技术的不断进步，我们期待这些国产芯片在未来的应用中发挥更大的作用，为各种雷达系统提供稳定、可靠的电源保障。