

Application Brief

为相控阵卫星使能紧凑型接地电平转换



Joshua Salinas

简介

航空航天和国防系统长期以来推动了众多通信技术创新，包括雷达、GPS 和卫星链路。随着对更高带宽和更可靠连接需求的不断增长，传统机械转向天线正逐渐被相控阵天线取代。与通过物理旋转方式控制信号方向的传统天线不同，相控阵系统通过电子方式调整各天线单元的相位，从而快速指向通信波束，并同时支持多个用户。

然而，如图 1 所示，现代相控阵卫星可能包含数百甚至数千条发射和接收通道。每条通道可能包括功率放大器 (PA)、低噪声放大器 (LNA)、移相器以及相关控制电路，如图 2 所示。该架构显著提升了波束控制能力和通信容量，但也增加了所需控制信号和状态信号的数量。这些控制信号和状态信号通常需要在不同电压域之间工作

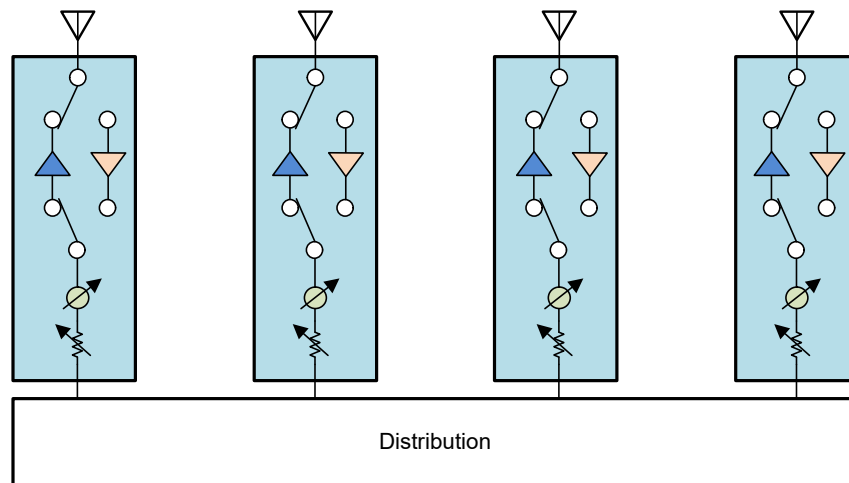


图 1. 阵列中的天线

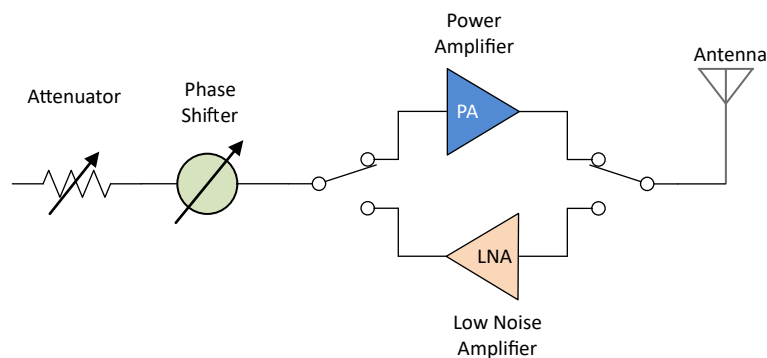


图 2. 相控阵天线

单电源与双电源功率放大器

功率放大器的主要优势之一是在保持较低输出失真的同时提供高增益放大能力。为了最大化信号摆幅和动态范围，相控阵系统通常采用双电源配置运行放大器，如图 3 所示。在单电源配置中，启用功率放大器只需 EN 电压超过以接地为参考的最小输入高电压 (V_{IH})；而在双电源配置中，EN 信号的参考电平会从 GND 移至 V_{EE} 。

例如，如果单电源配置下的放大器需要高于 1.26V 才能启用，需要低于 0.54V 才能禁用，则在双电源配置下，这些阈值电压会整体偏移 V_{EE} 电压。假设 V_{EE} 为 -5V，则新的启用电压变为 -3.74V，禁用电压变为 -4.46V。

这给现代 MCU 和 FPGA 带来了挑战，因为它们通常无法产生或承受负电压。

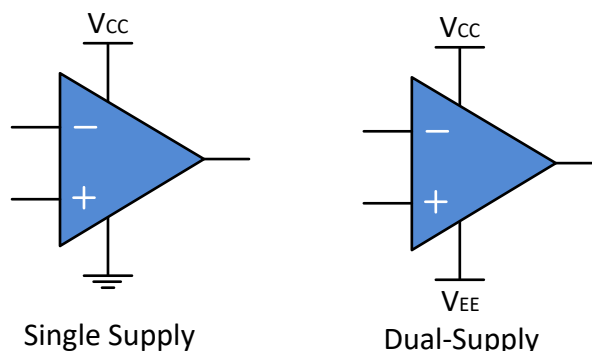


图 3. 运算放大器单电源与双电源配置

解决负控制信号和空间限制问题

为了解决这些挑战，工程师通常采用基于分立器件的设计方案。如图 4 所示，该方案是一种常见的分立实现方式，用于将 MCU 输出的正电压控制信号转换为双电源放大器所需的负电压域信号。

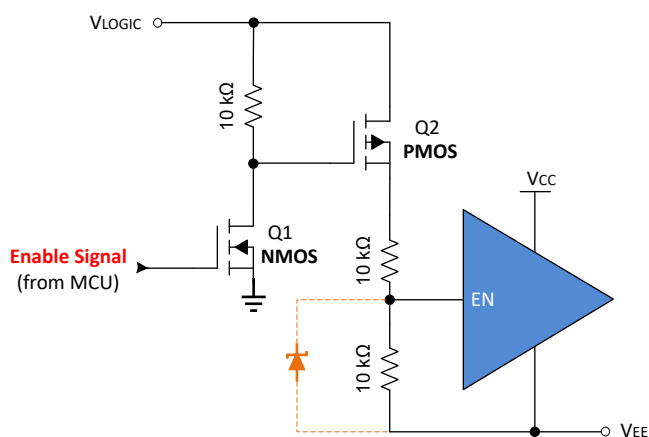


图 4. 使能信号分立式电平转换

除了使能引脚外，许多放大器还提供警报或状态输出，用于指示过流或过温等故障情况。这些输出通常采用漏极开路信号形式实现，并需要上拉电阻。在单电源系统中，发生故障时，警报信号会相对于接地被拉低。然而，当放大器采用双电源轨工作时，警报信号的参考电平会从接地转变为 V_{EE} 。因此，故障状态可能会使警报信号变为负电压，而许多 MCU 和 FPGA 无法直接承受该负电压。

如图 5 所示，该方案是一种常见的分立实现方式，用于将负电压警报信号转换为 MCU 可识别的正电压中断信号。

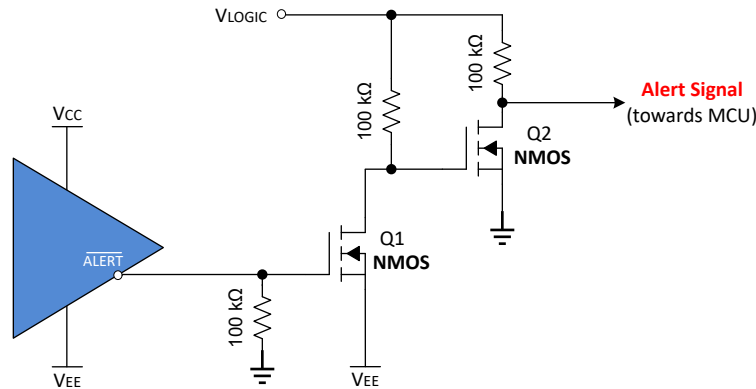


图 5. 警报信号分立式电平转换

使能信号和警报标志信号的分立解决方案均可用于产生或承受由双电源轨产生的负信号。然而，在包含数百个通道的相控阵卫星中，这意味着需要增加数千个额外元件，并占用大量 PCB 面积。如表 1 所示，每对功率放大器所需的分立器件总数如下。

表 1. 每个 PA 对所需的分立元件

设计	每通道元件数
分立式使能转换	2 个 FET + 3 个电阻器
分立式警报转换	2 个 FET + 3 个电阻器
总计	每个 PA 对包含 10 个以上元件

为何不使用数字隔离器？

数字隔离器等集成解决方案可以处理来自双电源轨的负信号。这些器件可通过电隔离栅实现信号传输，适用于安全关键型或高压应用。在相控阵卫星中，许多通信挑战源于接地偏移，而非安全隔离需求。增加电隔离栅还会降低时序性能（传播延迟、通道间偏斜、数据速率），同时增加系统成本和方案尺寸。

当不需要电隔离时，接地电平转换器可提供更简单、更高效的解决方案。

利用 TI 的 TXG 解决接地电平转换挑战

德州仪器 (TI) 通过 TXG 系列地面电平转换器解决了这些挑战。与传统电平转换器不同，TXG 器件专为不同接地电位的电压域之间通信而设计。TXG 器件通过在紧凑型 IC 中集成双接地架构，无需额外分立器件，同时提供可靠的信号转换、集成 ESD 保护以及更优的开关性能。

例如，将图 6 中的使能信号分立设计替换为 TXG 器件后，方案得到了简化，如图 6 所示。通过将 TXG 的 VCCB 引脚连接至系统地，并将 GNDB 引脚连接至 VEE，B 侧输出电压将在 VEE 与 GND 之间摆动。此配置仅可承受最高 6.5V 的 VCC 与 GND 电压差。

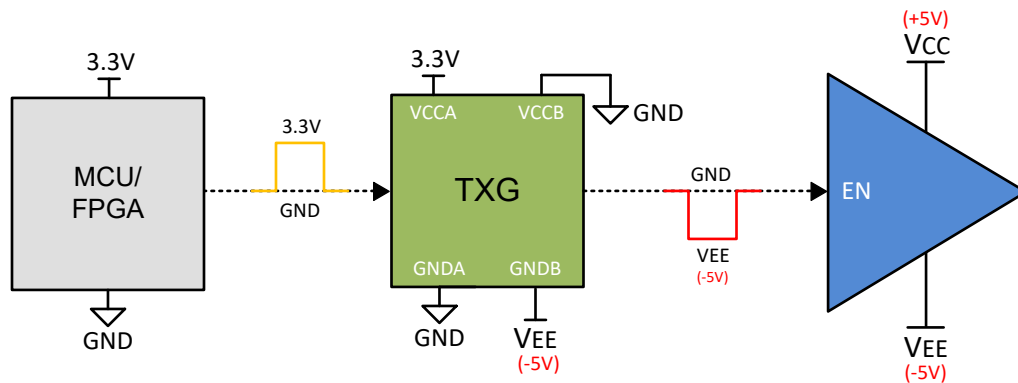


图 6. TXG 实现

虽然分立电路和数字隔离器均可用于跨接地偏移进行通信，但每种方案都会在系统尺寸、成本、性能或复杂性方面有所取舍。随着相控阵系统通道数量持续增加，这些权衡因素变得越来越重要。表 2 对比了用于解决负电压信号问题的常见方案。

表 2. 接地偏移通信解决方案比较

特性	分立式电路	数字隔离器	TXG
接地偏移支持	是	是	是
电隔离	否	是	否
元件/布线开销	高 (每通道超过 10 个器件)	低	低
PCB 区域	大	中	小
成本	低	高	低
传播延迟/时序	慢/受 RC 限制	中等	快速/低偏斜
可扩展性	不佳	中等	非常好

结语

相控阵卫星持续增加通道数量和通信带宽，对系统集成密度和可扩展性提出了更高要求。虽然双电源射频放大器能够提升信号性能，但也引入了工作于不同接地域的控制信号和状态信号。传统分立式转换电路能够解决这一问题，但会增加元件数量、电路板面积和设计复杂度。TI 的 TXG 系列接地电平转换器提供了一种紧凑且可扩展的替代方案，可简化设计实现，同时保持接地参考域与负电压域之间的高性能通信。

其他资源

- 德州仪器 (TI), [有关接地电平转换器的主要设计问题](#), 应用简报。
- 德州仪器 (TI), [并非所有接地均为 0V](#), 应用简报。
- 德州仪器 (TI), [接地不均匀？使用全新的接地电平转换器解决偏移挑战](#), 技术文章。

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月