

Application Note

使用 AFE7769D 的大型相控阵天线系统多 AFE 同步



Shaily Jain, Neeraj Kumar Sharma, Srinivas Murthy

摘要

波束成形是一种先进的信号处理技术，大型相控阵天线系统利用该技术将无线电波聚焦为指向特定用户的定向波束，从而在更大限度减少干扰的同时，提升传输距离和信噪比。波束成形需要保持一致的相位对齐，以便以可预测的方式引导和塑造波束。相位偏差会直接降低波束成形性能，因削弱信号强度而展宽波束宽度，并最终降低系统的传输距离和容量。

相控阵的可扩展性与在系统中所有阵元间保持精准且确定性的相位控制能力密不可分。这一挑战在大规模多阵元相控阵中尤为严峻，在这些阵列中，由于制造工艺变化和温度漂移，在多个数据转换器之间保持相位相干性变得愈发困难。

AFE7769D 射频收发器通过系统基准 (Sysref) 信号确保多个器件之间的确定性相位控制，从而解决了这一关键限制。Sysref 可同步本地振荡器和采样时钟，为整个阵列有效建立共同的时序和相位基准。

内容

1 简介.....2

2 了解架构.....3

3 分析相位变化.....5

4 配置器件.....7

5 具有确定性相位的跳频.....7

6 总结.....7

7 参考资料.....8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

AFE7769D 基于零中频采样架构，提供数字预失真 (DPD) 算法以提升信号质量。此外，该器件在下一代基站和相邻通信基础设施方面已取得经实践验证的成果，使其成为大规模 MIMO 和波束成形技术的首选方案。

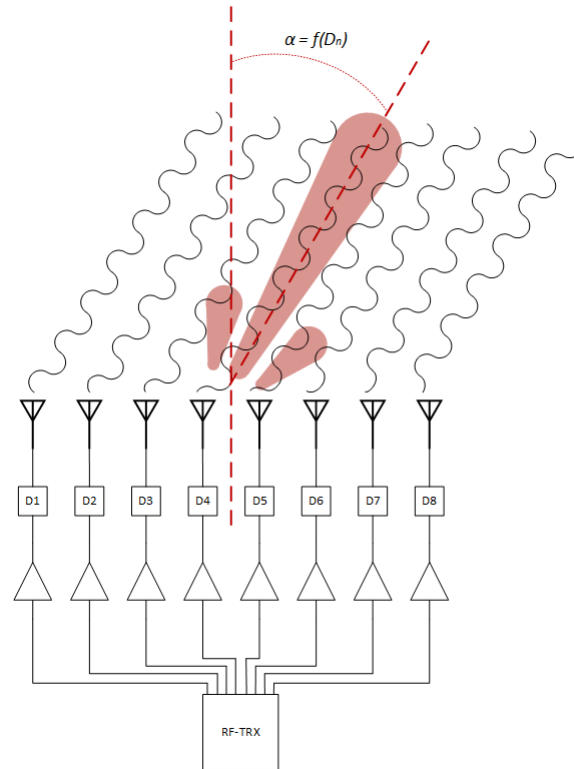


图 1-1. 调整时间同步天线之间相位来成形波束

AFE7769D 是一款引脚兼容的高性能，多通道收发器，集成了四条直接上变频发送器链、四条直接下变频接收器链、两条宽带射频采样数字化辅助链（反馈路径）以及用于功率放大器 (PA) 线性化的低功耗数字预失真 (DPD) 引擎。集成的 DPD 引擎可校正因 PA 非线性而导致的失真，支持瞬时带宽高达 300MHz 和 DPD 扩展带宽高达 730MHz 的信号。发送器链和接收器链的高动态范围可使无线基站发送和接收 2G、3G、4G 和 5G 信号。

该器件还集成了 QMC（正交失配补偿）算法，无需注入任何特定信号或执行离线校准，即可持续监测和校正 I/Q 不平衡失配。

合成器部分集成了四个分数 N 射频 PLL，可生成四个不同的射频 LO，从而使器件能够支持多达三个不同的频段。

对于相控阵应用，该器件使用 Sysref 来验证确定且可靠的相位。Sysref 有助于同步多个 AFE，从而证实其在地面站、卫星通信和无线基础设施等应用中非常有用。

2 了解架构

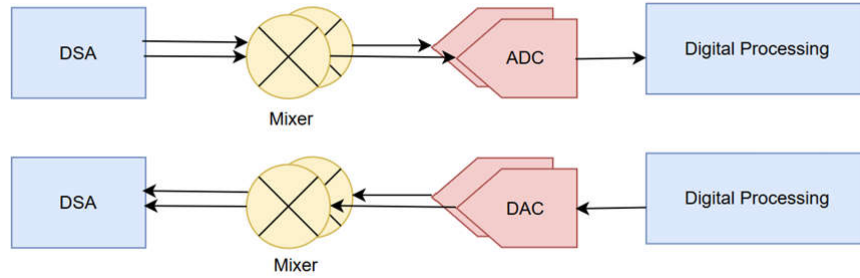


图 2-1. 数据路径架构

如图 2-1 所示，在数字处理前，沿着数据路径，有两个用于 I 和 Q 数据流的模拟混频器，后跟两个用于各自数据流的数据转换器。与数字 NCO（数控振荡器）不同，模拟 PLL 每次均可以随机相位启动。模拟 PLL 依赖于连续时间电路（电荷泵、压控振荡器、环路滤波器），其行为固有地受元件失配、温度变化、电源电压变化和模拟噪声的影响，从而引入了模拟缺陷。这些缺陷使其难以保证每次都实现完全相同的相位关系。

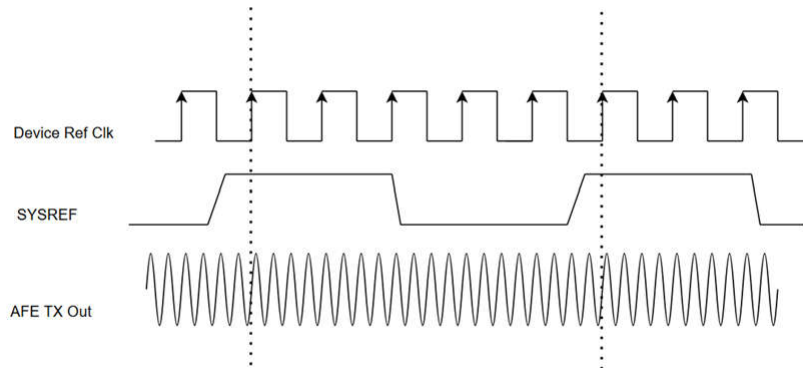


图 2-2. 通过 Sysref 进行相位复位的时序图

如图 2-2 所示，只要用于接收或发送的混频器频率是 Sysref 频率的整数倍，AFE7769D 就能通过 Sysref 实现确定性相位。Sysref 信号将提供给射频 PLL 混频器内的所有块和子块，以对齐路径中的所有分频器，使其始终以确定性相位启动。Sysref 确保射频 PLL 块在重新配置/下电上电后复位并对齐，以在器件内的所有通道上实现确定性相位。

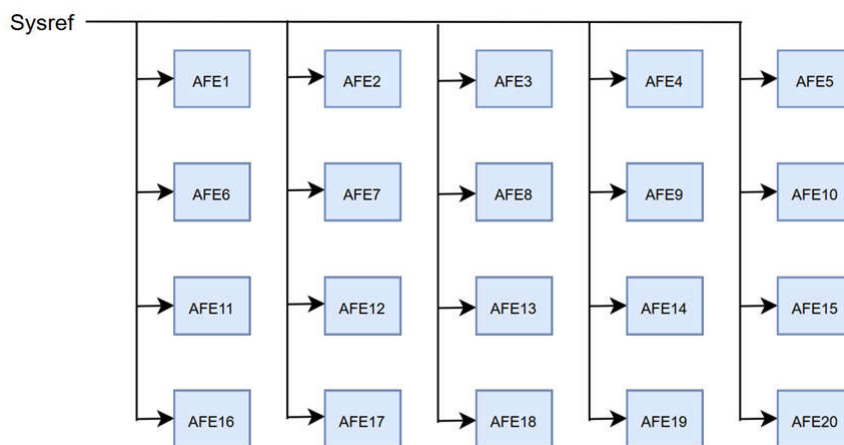


图 2-3. 包含多个 AFE 的大型相控阵设置示例

如图 2-3 所示，对于采用多个器件的大型相控阵应用，Sysref 信号可提供器件内和器件间的确定性相位对齐，从而确保分布式系统中的相位一致性。由于每次通过 Sysref 启动每个器件时都处于确定性相位，这就省去了每次上电后都需要进行额外相位校准的工作量。

3 分析相位变化

该设置包含两个 AFE7769D 评估模块 (EVM)，用于观察在多次重新配置和各种温度范围内的相位同步情况。如图 3-1 所示，器件基准时钟 (Fref) 和系统基准 (Sysref) 均源自同一个时钟源。

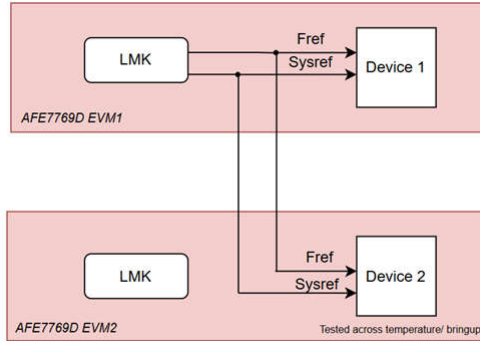


图 3-1. 用于相位同步的时钟架构

射频 PLL 频率设置为 Sysref 频率的整数倍。在本例中，所有观察结果和图表均在射频 PLL 频率设置为 1728MHz 的条件下采集。在将两个器件配置一次后，通过多次重新配置和温度变化对 EVM2 进行观察。

即使经过多次重配置/下电上电，该器件仍在所有通道上相对于外部基准及另一个器件保持一致的相位，如图 3-2 和图 3-3 所示。

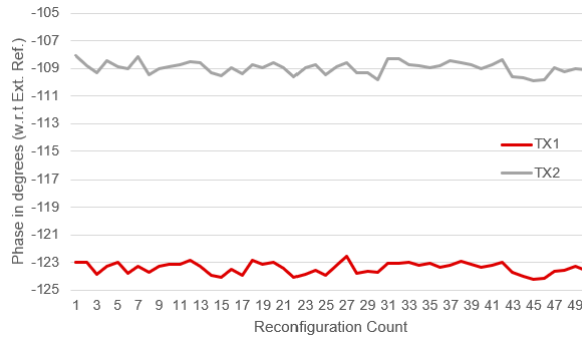


图 3-2. 多次重新配置时通道之间的相位变化

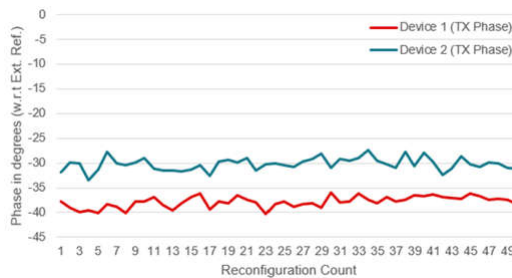


图 3-3. 多次重新配置时器件之间的相位变化

我们还观察了在 100°C 范围内温度变化时的相位情况。对于 TX，相位降低约为 0.4° (图 3-4)。对于 RX，相位上升 0.208° (图 3-5)。如果需要，用户可以在温度变化时考虑纳入此变化进行校准。

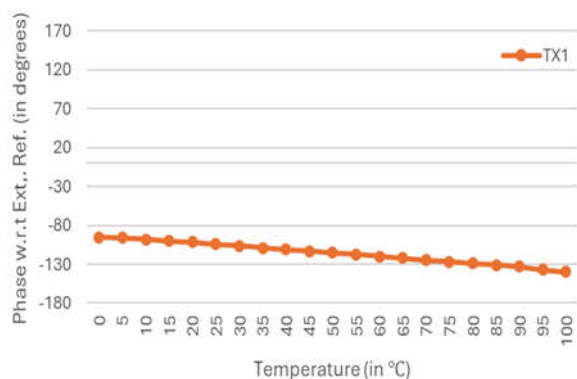


图 3-4. PLL 频率为 1728MHz 时整个温度范围内的相位漂移 (TX)

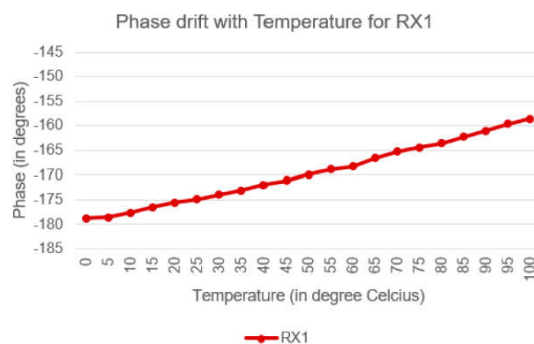


图 3-5. PLL 频率为 1728MHz 时整个温度范围内的相位漂移 (RX)

但是，该器件在温度变化时仍可在各通道之间保持一致的相位（例如，通道之间的相对相位保持不变），如图 3-6 和图 3-7 所示。

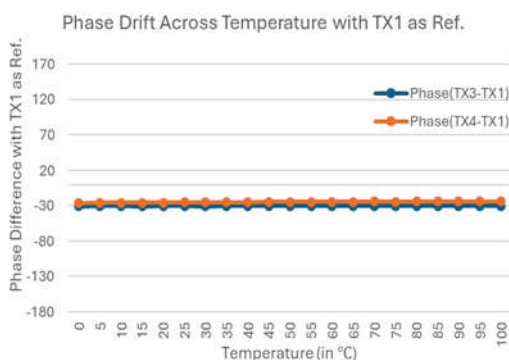


图 3-6. 整个温度范围内的相位变化 (TX)

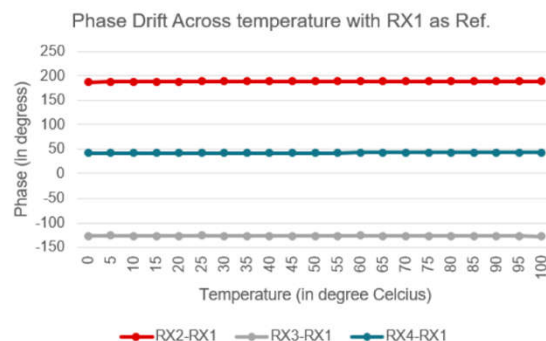


图 3-7. 整个温度范围内的相位变化 (RX)

4 配置器件

系统设计人员配置器件时，必须确保 PLL 频率是 Sysref 频率的整数倍。请参考以下步骤：

1. 根据应用场景设置参数 `pllMuxMode`。
2. 使用参数 `pllLo` 将 PLL 频率设置为工作频率。请注意，PLL 频率需要是 Sysref 频率的整数倍。
3. 设置所需模式的其他基本配置参数。有关具体参数的更多详细信息，请参阅 AFE77xxD 配置指南 (SBAU405A)。
4. 完成器件启动。

每次启动/重新配置后，该器件在不同通道之间和不同器件之间相对于 Sysref 均保持一致的相位。有关如何使用 AFE77xxD Latte 软件启动器件的更多见解，请参阅以下 [视频](#)。

5 具有确定性相位的跳频

跳频是发送器和接收器针对各种应用切换其工作频率的一种技术。该方法广泛用于通信系统，以更大限度地减少干扰并避免拥塞。在不同频率之间转换时，保持相位一致性至关重要。相位关系必须保持可预测且可控，而不是随机跳变。

这种相位相干性变得至关重要，尤其是在大型相控阵系统中，多个器件必须保持彼此之间精准、确定性的相位关系才能正常工作。如果没有相位相干性，阵列将失去其精确引导波束或检测目标的能力。具备相位相干性的跳频在每次频率切换后无需重新校准。这使系统能够在不同频率之间快速跳变，同时保持连续、精准的运行 — 此功能对于波束成形基站和安全通信等应用至关重要。

器件启动后，只要切换到的频率也是 Sysref 频率的整数倍，即可动态切换 PLL 频率而不会失去相位一致性。在跳频期间，将重新配置 PLL，且需要执行以下序列以确保相位对齐。

```
CAFE.dynamicLOChangewrapper(0, rx12Lo, rx34Lo, tx12Lo, tx34Lo, lqmcDelayArr, dpdDelayArr)1
```

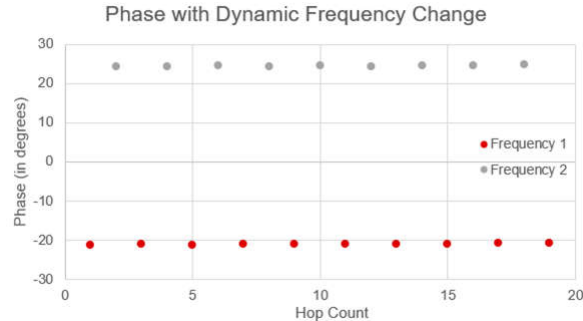


图 5-1. 具有动态频率变化的器件相位

因此，即使在不同频率之间切换时，系统也能保持一致的相位，如上面的图 5-1 所示。

6 总结

随着每一代电信技术的推出，人们对更高数据速率和更低延迟的需求都会大幅增加。5G 大规模 MIMO 与波束成形相结合，可实现高吞吐量、低延迟通信并确保可扩展性。AFE7769D 可用于此类大规模 MIMO 应用：在此类应用中，相位一致性对于精确天线控制和空间滤波至关重要。它可以在器件内以及多个器件间提供相位确定性。AFE7769D 通过重新配置/下电上电和跳频技术保持可预测的相位关系，因此无需重新校准，降低了系统复杂度并支持灵活的波束成形应用。

¹ lqmcDelayArr and DpdDelayArr can both be set to zero when DPD is not triggered. Whenever DPD is triggered, set them to appropriate delay values.

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [AFE77xxD 具有集成 CFR/DPD 双反馈路径的四通道/双通道射频收发器](#), 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [通过 mMIMO 和精确波束成形技术实现 5G 网络潜力](#), 模拟设计期刊。

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