

# 通过 mMIMO 和精确波束形成技术发掘 5G 网络潜力

**Bhavesh Rathod**

Applications engineer  
Wireless Infrastructure

## 简介

随着每一代无线技术的推出，人们对更高数据速率和更低延迟的需求都会大幅增加。5G 通过提供几十千兆位/秒的吞吐量和亚毫秒级的延迟来推动这一发展趋势，这对于增强现实和虚拟现实、工业物联网 (IIoT) 和自主系统等应用至关重要。要实现性能目标（尤其是在人口密集的城市区域和高流动性场景中），需要两种技术：大规模多输入多输出 (mMIMO) 和波束形成。

5G mMIMO 系统使用大型天线阵列，通常包括 16 个发射天线和 16 个接收天线到 128 个发射天线和 128 个接收天线。这些天线支持空间多路复用，以相同的频率同时传输多个数据流，从而在没有额外带宽或功耗的情况下提高频谱效率和用户容量。

通过相控阵天线实现的波束形成支持空间滤波，可将射频 (RF) 能量引向目标用户并将其聚焦，从而减轻干扰并提高信噪比。波束形成需要跨天线实现一致的相位对齐。它提升了在较高射频频带（例如 FR1 和 FR2 频带）下的性能，因为自由空间路径损耗和信号阻断是巨大的挑战。

为了克服这些挑战，5G mMIMO 与波束形成相结合，可实现高吞吐量、低延迟通信并确保可扩展性。这些组合技术使网络运营商和开发人员能够通过精确的天线控制来打造创新的无线应用，从而增加频段。

实现 mMIMO 和波束形成需要使用射频收发器将位转换为射频，反之亦然。由于 mMIMO 和波束形成都要求空间和时序精度，因此射频收发器的位至射频转换过程必须有精确的时间戳并在多个天线之间实现时间同步。

带有支持 5G 的射频收发器的无线电设备让无线电在 4G 和 5G 中都能运行。根据 5G 的第三代合作项目 (3GPP) 规范，5G 可在以下特定领域提高 4G：

- 增强型移动宽带 (eMBB)
- 适用于工业应用的关键通信 (CC) 和超可靠低延迟通信 (URLLC)
- 大规模物联网 (mIoT)。
- 灵活的网络运行可实现适应性和网络优化，同时通过网络切片、云原生基础设施和软件定义网络满足各种应用和终端用户需求。

## 什么是 5G mMIMO？

5G MIMO 是 5G 网络系统中使用的无线通信技术。典型的 MIMO 无线电可能有 16 到 32 个发射和接收天线，而单个无线电单元中的 mMIMO 可能有 64、128 甚至更多天线。将这么多的天线封装到单个无线电单元中有助于为更多用户提供更高的数据速率。

对空间多路复用的基于 mMIMO 的 5G 网络支持可在不增加任何额外带宽或发射功率的情况下大幅提升通道容量。

随着行业的发展迈向更高的 5G 频率，例如毫米波 (mmWave)（从 24GHz 到 40GHz），波束形成变得更加重要。毫米波频率由于天线尺寸较小，因此可以在受限的空间中使用大量天线。mMIMO 可谓因祸得福、意外受益：它不仅可以提高吞吐量和覆盖范围，而且可以同时支持多个用户，而无需添加更多资源（带宽、功率、射频单元）。这使得 5G mMIMO 成为实现更高数据速率、超低延迟以及 3GPP 为 5G 网络定义的大规模连接目标所需的一项必要技术。

## 5G mMIMO 和波束形成

波束形成是 5G 无线通信系统所需的主要技术之一。5G 超宽带频率在低于 6GHz 的频率范围和毫米波频段内运行。这种频谱容易受到较高的信号衰减和路径中物体的干扰，毫米波无法像 4G 那样轻松地穿透墙壁。因此，5G 需要波

束形成才能在特定区域集中功率，从而实现高数据速率，尤其是在密集的城市部署中。请参阅图 1。

波束形成的另一个好处是保持与移动目标（例如，使用 3GPP 版本中定义的波束控制和波束跟踪的移动车辆）的连接。波束形成可以采用数字、模拟或混合波束形成架构。让我们来了解这项技术背后的数学原理。

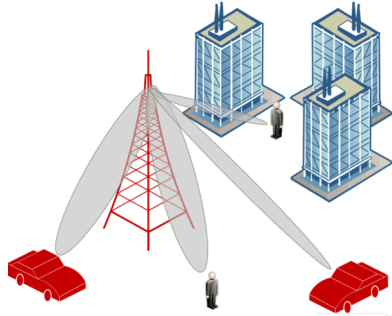


图 1. 波束形成如何在人口密集的市场通过 5G 网络连接更多人。

### 波束形成背后的数学原理

方程式 1 模型的信号在通道上传播，公式 2 展示了详细的 H 矩阵。矩阵 H 中的每个元素  $h_{mn}$  表示从每个发射天线  $n$  到每个接收天线  $m$  的复数增益。其中  $\rho$  是接收器处的信号， $\tau$  是发射信号，矩阵 H 是通道特性矩阵。矩阵 H 表示每个通道的增益和相位响应。

$$\rho = H \times \tau \tag{1}$$

$$\rho = \begin{bmatrix} h_{11}h_{12} \cdots h_{1n} \\ \vdots \\ h_{m1}h_{m2} \cdots h_{mn} \end{bmatrix} \tau \tag{2}$$

在线性预编码下，方程式 3 将发射信号  $\tau$  计算为：

$$\tau = \Sigma w \times s \tag{3}$$

其中  $s$  是正在传输的符号， $w$  是线性预编码向量。

预编码向量通过调整每个传输通道的相对相位差来确定射束的方向。

要计算预编码向量，请估计 H 矩阵。每个发送器都必须具有确定的相对相位差；否则估计的 H 矩阵和计算的预编码

向量将不成立。波束形成依靠传输信号的相位精度在接收器上建设性地组合这些信号。

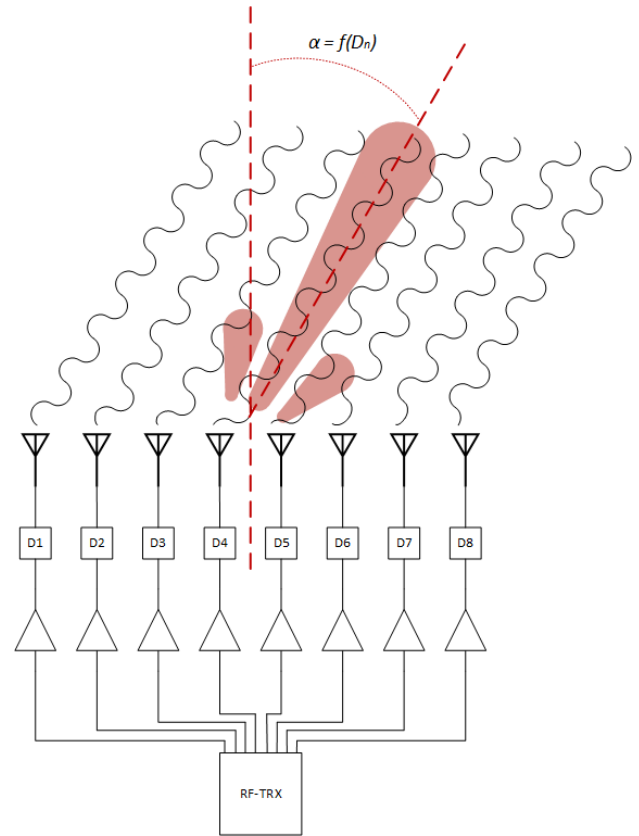


图 2. 通过调整时间同步天线之间的相位来形成波束（使用八通道收发器）。

当无线电单元上有多个模拟前端器件时，同步来自一个 mMIMO 的多个传输信号的输出相位会变得很棘手。128 天线 mMIMO 系统将具有 8 到 16 通道模拟前端器件。

### mMIMO 系统的当前挑战

在典型 5G mMIMO 收发器中，单个板承载多个射频收发器。对于 64 通道配置，该板可组装八个 8 通道收发器或四个 16 通道收发器。可靠的波束形成要求所有发送和接收路径在整个系统生命周期内保持相位同步，包括初始启动、模拟前端与应用特定集成电路 (ASIC) 或现场可编程门阵列 (FPGA) 之间的后续 JESD204B 和 JESD204C 链路重新初始化以及上电复位。这是所有无线电系统设计人员都会面临的根本挑战。确定的相对相位关系可确保复合天线阵列形成并可预测地控制波束。

利用嵌入到收发器中的数控振荡器 (NCO) 的内部相移功能，只能补偿多元件天线阵列中存在的任何残留静态相位偏移。由于此失调电压在启动周期、JESD 重新链接事件和下电上电期间保持不变，因此一次性 NCO 校准将对齐所有通道的相位，从而保持波束形成性能。但是，无线电上的所有射频收发器实现时间同步的基本需求仍然存在。

TI 的 AFE80xx 和 AFE81xx 系列射频集成电路包含多项特性，可帮助设计人员满足 mMIMO 要求。

### 使用单次 sysref 模式

大多数系统中的默认运行模式是连续 sysref 模式，其中 sysref 是周期性低频信号。但是，在 AFE8092、AFE8030、AFE8128、AFE8190、AFE8192 中，可以使用“单次”系统参考时钟 (sysref) 模式实现多器件同步。在单次模式下，sysref 信号是单个脉冲，它同时提供给电路板上的所有模拟前端。当所有模拟前端都在与基准时钟完全相同的时刻接收到 sysref 时，它们自然会实现相位同步。

实现此方法面临的挑战之一是如何实现将 sysref 和参考时钟的差分路由到电路板上的多个器件。在印刷电路板内的无线电级别，您需要将 sysref 和参考时钟路由的时序保留到相对于基准时钟的皮秒级。

如图 3 所示，使用 AFE8092、AFE8030、AFE8128、AFE8190 和 AFE8192 的单次 sysref 模式需要特定的时序控制。

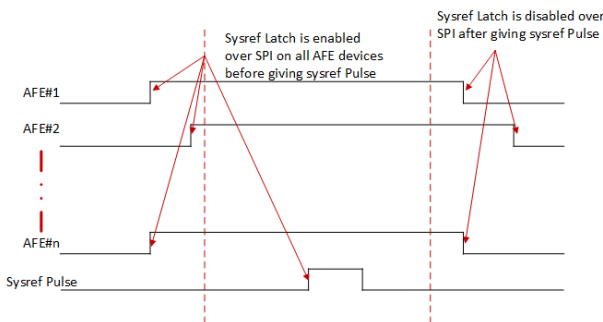


图 3. 单次 sysref 模式的时序图。

### 通过 GPIO 使用通用时间戳信号对射频集成电路进行时间校准

也可以使用基于通用输入/输出 (GPIO) 的控制来启用 sysref 锁存。在此模式下，sysref 可以在连续 sysref 模式中运行。所有模拟前端器件都将在接收到基于 GPIO 的锁存使能信号后锁存至第一个基准时钟上升沿。所有后续脉冲都将被忽略。

这种方法只需要将 CMOS GPIO 信号路由到所有模拟前端，因此与单次 sysref 方法相比，此方法相对更简单，因为使用匹配的长度将差分信号路由到电路板上的多个模拟前端器件可能很有挑战性。同时，这种方法需要从主机的 ASIC 为每个器件同步分配一个 GPIO。如果主机 ASIC 或 FPGA 没有足够的 GPIO，则该方法不适用。

如图 4 所示，使用基于 GPIO 的控制对 AFE8092、AFE8030、AFE8128、AFE8190、AFE8192 使能 sysref 锁存需要特定的时序控制。

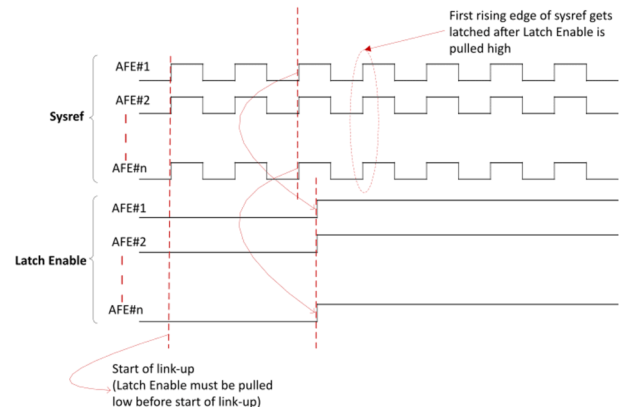


图 4. 使用基于 GPIO 的控制使能 sysref 锁存模式的时序图。

### NCO 选择

实现相位同步的最简单方法是选择频率为系统参考频率整数倍的发送器和接收器 NCO。这种方法甚至适用于连续系统参考模式，因为不需要任何额外的机制来同步 NCO 即可在多个模拟前端器件上进行发送和接收。

如果对 NCO 频率施加的限制对于最终应用来说可接受，那么这种方法最合适，因为您可以在不更改现有硬件的情况下实现相位同步。如果模拟前端器件发生重新链接或下电上电，则需要遵循特定的软件序列。图 5 展示了在此模

式下，即使所有模拟前端都锁存到不同的系统参考边沿也没有关系。

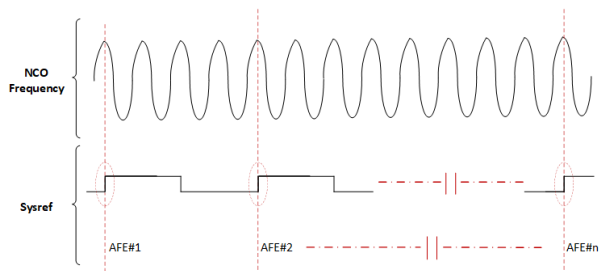


图5. 演示 NCO 频率如何等于系统参考频率的四倍的示例。

## 结语

mMIMO 和波束形成技术的集成对于释放 5G 网络的全部潜力至关重要，能够实现出色的数据速率和超低延迟。利用大型天线阵列和精确的空间滤波，这些技术克服了高频信号传播的挑战，确保各种场景下的可靠和高吞吐量通信。如 3GPP 规范所述，5G 在 eMBB、CC、URLLC、mIoT 和灵活网络运行中的增强功能主要归功于 mMIMO 和波束形成的协同效应。

TI 的 AFE8092、AFE8030、AFE8128 和 AFE8190、AFE8192 收发器可帮助网络运营商支持从增强现实和虚拟现实、IIoT 到自主系统等各种无线应用。

## 作者简介

Bhavesh Rathod 是德州仪器 (TI) 的应用工程师，专注于射频应用和无线基础设施解决方案。Bhavesh 将硅后验证和嵌入式系统方面的实践专业知识带到了支持尖端无线基础设施技术开发的工作。他获得了普渡大学的电气和计算机工程硕士学位，以及浦那工程学院的电气工程学士学位。Bhavesh 因其在被动稳定通信卫星 Swayam 上的工作而于 2017 年获得甘地青年技术创新奖。

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

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