

## Technical White Paper

使用配有 **Skyworks** 功率放大器的 **AFE7769D** 实现三频基站  
无线电设计

Jenny Yu, Neeraj Kumar Sharma, Simran Nanda

## 摘要

多频段无线电在现代无线网络基础设施中的重要性日益凸显，这是因为它们使网络设备和无线电部署更具成本效益、更节能、更灵活且更具可扩展性。设计多频带无线电在优化无线电尺寸、重量、功耗和性能方面面临许多挑战。本文从射频收发器的角度讨论了多频带无线电所需的关键特性。例如，本视频介绍了 **AFE7769D** 的波峰因数抑制 (CFR)/数字预失真 (DPD) 性能结果。**AFE7769D** 是一款四通道射频收发器，其采用了 **Skyworks** 功率放大器，且在三频带用例中集成了 CFR/DPD，充分展示了 **AFE7769D** 如何实现紧凑高效的多频带无线电设计。

## 内容

1 简介	2
2 实现紧凑高效的多频段无线电	3
2.1 具有集成式 CFR/DPD 的 TI 射频收发器 : AFE7769D	3
2.2 Skyworks 功率放大器	3
3 三频带 CFR/DPD 性能测试设置和条件	4
4 三频带 CFR/DPD 性能测试结果	5
4.1 TX1 测试结果 (频带 41)	5
4.2 TX3 测试结果 (频带 3)	6
4.3 TX4 测试结果 (频带 1)	7
5 总结	8

## 插图清单

图 1-1. 三频带无线电 (2T2R N41 + 1T1R B1 + 1T1R B3) 的示例方框图	2
图 3-1. AFE7769D 三频带 DPD 性能测试设置的方框图	4
图 4-1. TX1 ACLR 图 : 中心频率为 2.595GHz 的 2x100MHz 信号	5
图 4-2. TX1 EVM% 图 : 中心频率为 2.595GHz 的 2x100MHz 信号 (PAR = 8dB)	6
图 4-3. TX3 ACLR 图 : 中心频率为 1.8425GHz 的 3x20MHz + 15MHz 信号	6
图 4-4. TX3 EVM% 图 : 中心频率为 1.8425GHz 的 3x20MHz + 15MHz 信号 (PAR = 8.5dB)	7
图 4-5. TX4 ACLR 图 : 中心频率为 2.140GHz 的 3x20MHz 信号	7
图 4-6. TX4 EVM% 图 : 中心频率为 2.140GHz 的 3x20MHz 信号 (PAR = 8.5dB)	8

## 表格清单

表 3-1. 测试设置详细信息	5
表 3-2. 功率放大器详细信息	5
表 4-1. TX1 : ACLR 汇总	5
表 4-2. TX3 : ACLR 汇总	6
表 4-3. TX4 : ACLR 汇总	7
表 5-1. 测试案例汇总	8
表 5-2. CFR/DPD 性能结果汇总	8

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

如今，无论是蜂窝公共网络还是专用网络，对基站无线电支持单台设备多频段的需求日益增长。这一需求由诸多因素驱动，例如：

- **减少网络占用空间和成本**：多频段基站可能会减少蜂窝基站所需的物理无线电和天线数量、从而缩小占用空间、降低设施租赁和公用设施成本以及减少安装费用。
- **灵活性和适应性**：因多频段无线电可以适应不断发展的网络条件，因此其能为网络运营商提供了更大的灵活性。多频段无线电在将现有网络迁移到新技术时非常有用，可促进更平稳、更渐进的迁移过程。例如、在一些发展中国家和地区 4G 和 5G 服务或 2G 和 4G 服务共存并不罕见。
- **频谱可用性和高效利用**：不同的频带具有不同的特性。有些频段在更远距离上能提供更佳的覆盖范围，而另一些频段则能在人口密集区域提供更高的数据传输速率和容量。一旦有了多频段基站，运营商能充分利用这些不同频段的可用频谱，满足不同的需求和环境条件。
- **中性主机网络**：运营商专注于网络密集化，在涉及到最后一英里和/或室内覆盖时，中立主机一直发挥越来越重要的作用。中性主机网络通过共享基础架构、部署和管理成本来降低总体网络成本，同时，它还通过改善网络覆盖范围和容量增强用户体验。多频段支持是中性主机网络的必备功能。

设计多频带无线电面临许多挑战，例如：尺寸和重量的增加、高功耗、额外的带间干扰等。本白皮书展示了如何使用 TI 的射频收发器 AFE7769D 来实现紧凑的三频带无线电设计，如图 1-1 所示，其中 1T1R 在 3GPP 频带 B3 中运行、1T1R 在频带 B1 中运行、2T2R 在频带 N41 中运行。AFE7769D 收发器在与 Skyworks 的以下功率放大器 (PA) 配合使用时的峰值系数抑制 (CFR) 和数字预失真 (DPD) 结果：展示了 [SKY66391-12](#)、[SKY66394-11](#) 和 [SKY66522-11](#)。

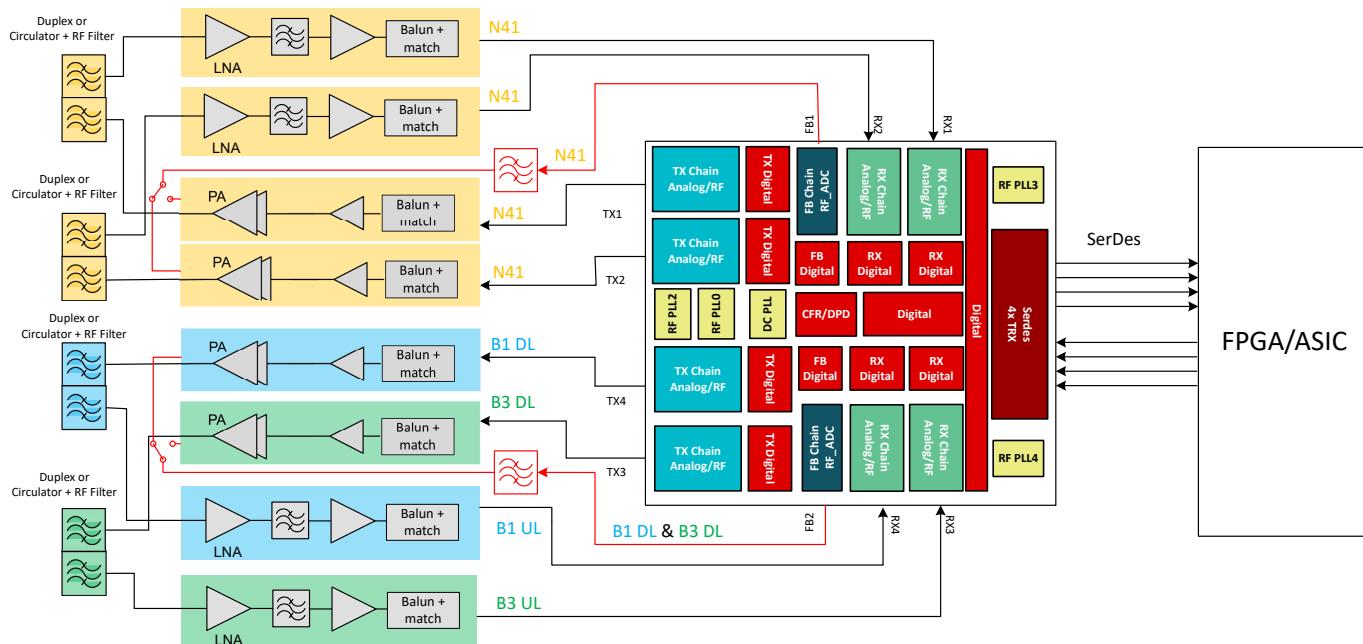


图 1-1. 三频带无线电 (2T2R N41 + 1T1R B1 + 1T1R B3) 的示例方框图

## 2 实现紧凑高效的多频段无线电

### 2.1 具有集成式 CFR/DPD 的 TI 射频收发器 : AFE7769D

AFE7769D (4T4R2F) 是一款高性能、多通道收发器系列，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 ) 和用于 PA 线性化的低功耗 CFR/DPD。AFE7769D 具有以下特性，可实现低功耗和小型多频带无线电设计。

- AFE7769D 集成了四个分数射频 **PLL**，可为发送器或接收器的上变频器或下变频器混频器合成本地振荡器 (LO) 信号。此外，每个发送器和接收器链都有一个可选的 **低 IF 混频器**，它可以与 LO 一起用于频率上变频或下变频。
- AFE7769D 中基于射频采样的直接反馈路径提供了一个固有的宽带接收器链，能观察用于 DPD 估算的 PA 输出信号，还能简化 TX 链损失校准。每个反馈路径都有两个可切换的 **NCO**，当两条发送器路径以不同的射频频率运行时，将其用于切换两个不同的射频频率，如本文件的示例所示。可以在切换期间保持 NCO 相位。
- AFE7769D 中的 **集成式 DPD** 引擎可对具有不同输出功率等级 ( 高达 50dBm+ 平均功率 ) 及采用各种 PA 技术 (GaAs, LDMOS, GaN) 的 PA 进行线性化处理，具备快速收敛与跟踪特性且功耗低。借助 DPD，功率放大器能够以更高的功率效率运行，同时仍满足发送器射频发射要求。

### 2.2 Skyworks 功率放大器

与 Skyworks 的 SKY66394-11、SKY66391-12 和 SKY66522-11 完全匹配的高效功率放大器配备了能补偿温度的集成式有源偏置。这些功率放大器专为需要 +28dBm 至 +30dBm 平均输出功率的 5G NR 和 4G LTE 无线基础设施应用而设计，将其封装到紧凑的 5mm x 5mm 模块中，经设计后，其采用数字预失真技术运行，例如，集成在德州仪器 (TI) AFE7769D 收发器中的技术。SKY66394-11、SKY66391-12 和 SKY66522-11 功率放大器现已上市。

### 3 三频带 CFR/DPD 性能测试设置和条件

图 3-1 展示了在三频带设置中使用 AFE7769D 进行 CFR/DPD 性能测试之详情，其中发送器通道 TX1、TX3 和 TX4 配置为在频带 N41、B3 和 B1 上通过三种不同的 Skyworks 功率放大器运行：分别是 SKY66522-11、SKY66391-12 和 SKY66394-11。请注意，通道 TX2 同样配置为与 TX1 相同，在 N41 频段运行。但为简化测试流程，在 CFR/DPD 性能测试期间，未连接 TX2 输出，以进一步放大。

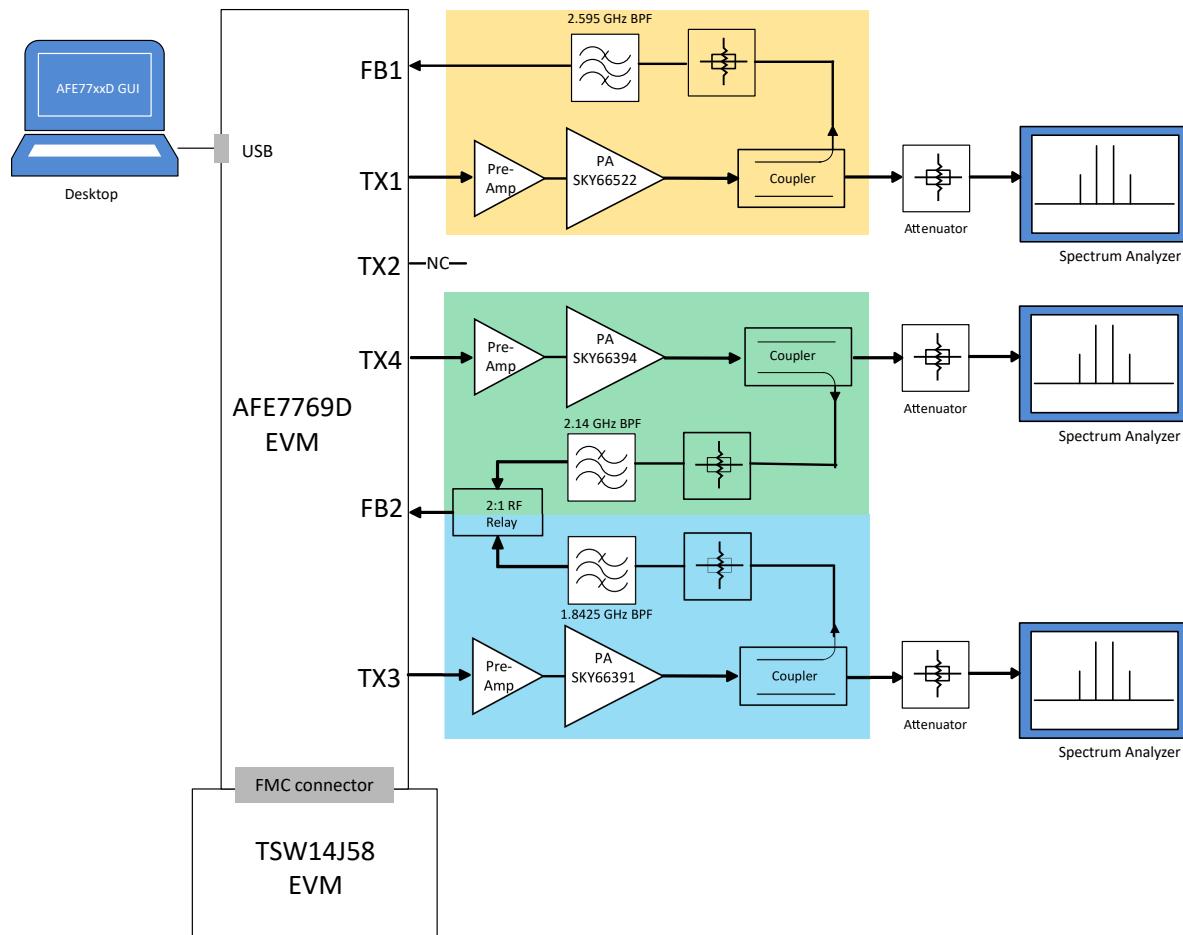


图 3-1. AFE7769D 三频带 DPD 性能测试设置的方框图

#### 备注

TX 射频前端系列通过连接分立式独立评估板和无源器件实现，而非焊接在同一电路板上。因此，本报告中显示的结果是特定 EVM 板在特定测试条件下的典型基线性能，如表 3-1 和表 3-2 所示。预计会出现器件间和板间差异。通过与 TI 和 Skyworks 应用团队合作，可进一步优化 DPD 性能和 PA 效率。

表 3-1 至表 3-2 提供了测试设置 ( 前端增益和载波波形 ) 和最终级功率放大器的详细信息。

表 3-1. 测试设置详细信息

参数	TX1 路径	TX3 路径	TX4 路径
RF 中心频率	2595MHz	1842.5MHz	2140MHz
瞬时带宽 (IBW)	200MHz	75MHz	60MHz
前置放大级的增益	16dB	19.7dB	19.2dB
所使用的最终级功率放大器	SKY66522-11	SKY66391-12	SKY66394-11

表 3-2. 功率放大器详细信息

关键属性	SKY66522-11	SKY66391-12	SKY66394-11
工作频率范围	2300 - 2690MHz	1800 - 1900MHz	2000 - 2300MHz
额定输出功率	31dBm	28dBm	28dBm
增益	36.5dB	35.9dB	38dB
电源电压	5V <sub>DS</sub> /12V <sub>DS</sub>	5V <sub>DS</sub>	5V <sub>DS</sub>

## 4 三频带 CFR/DPD 性能测试结果

针对每个测试通道，显示了 PA 输出端的相邻通道泄漏比 (ACLR) 和误差矢量幅度 (EVM%) 结果。在收集的 ACLR 性能图中，橙色曲线表示的是应用 DPD 之前的 ACLR 性能、蓝色曲线表示的是使用了 AFE7769D 集成式 DPD 算法对 PA 进行线性化之后的 ACLR 性能。

### 4.1 TX1 测试结果 ( 频带 41 )

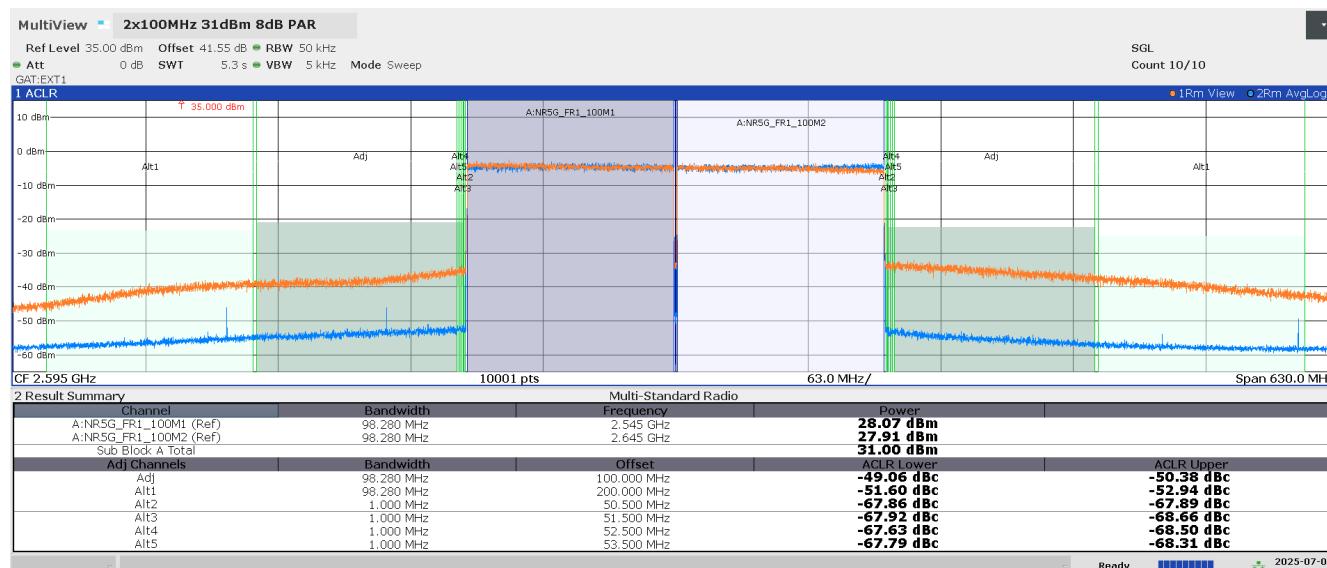


图 4-1. TX1 ACLR 图 : 中心频率为 2.595GHz 的 2x100MHz 信号

表 4-1. TX1 : ACLR 汇总

参数	PA 输出功率	相邻功率下限	相邻功率上限	交替功率下限	交替功率上限	PA 效率
不具有 DPD	31dBm	- 33.2dBc	- 30.1dBc	- 36.6dBc	- 34.5dBc	-
具有 DPD	31dBm	- 49.0dBc	- 50.3dBc	- 51.6dBc	- 52.9dBc	31.0%

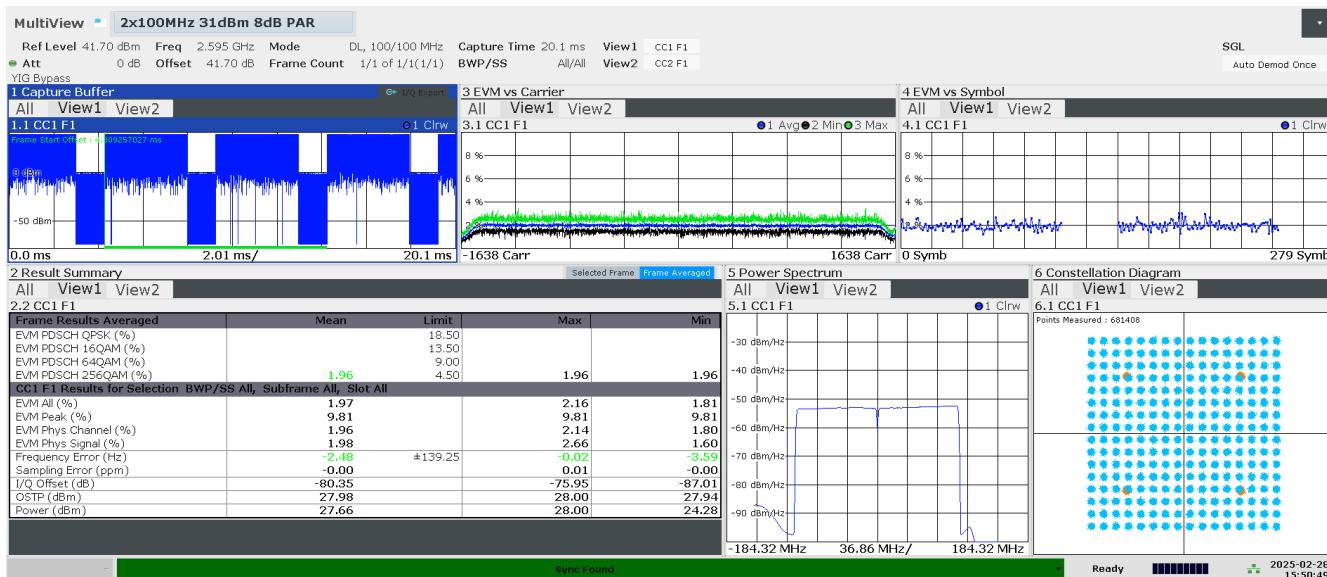


图 4-2. TX1 EVM% 图：中心频率为 2.595GHz 的 2x100MHz 信号 (PAR = 8dB)

## 4.2 TX3 测试结果 (频带 3)

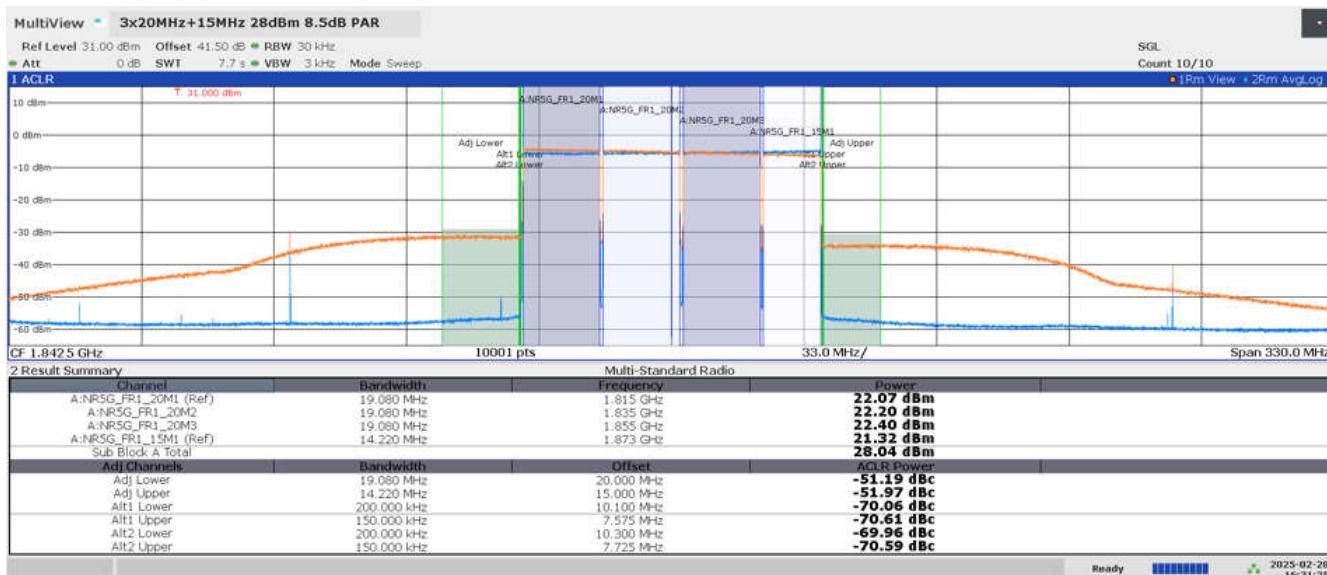


图 4-3. TX3 ALCR 图：中心频率为 1.8425GHz 的 3x20MHz + 15MHz 信号

表 4-2. TX3 : ALCR 汇总

参数	PA 输出功率	相邻功率下限	相邻功率上限	PA 效率
不具有 DPD	28.0dBm	- 27.0dBc	- 24.0dBc	-
具有 DPD	28.0dBm	- 51.2dBc	- 52.0dBc	31.8%

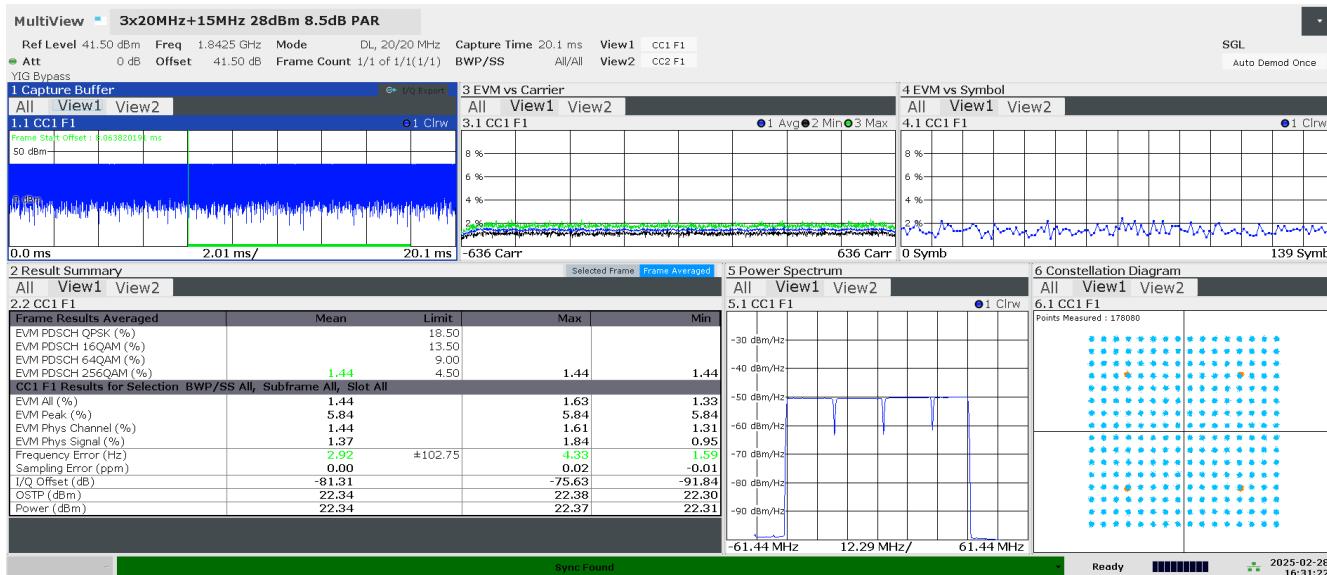


图 4-4. TX3 EVM% 图 : 中心频率为 1.8425GHz 的 3x20MHz + 15MHz 信号 (PAR = 8.5dB)

### 4.3 TX4 测试结果 (频带 1)



图 4-5. TX4 ACLR 图 : 中心频率为 2.140GHz 的 3x20MHz 信号

表 4-3. TX4 : ACLR 汇总

参数	PA 输出功率	相邻功率下限	相邻功率上限	交替功率下限	交替功率上限	PA 效率
不具有 DPD	28.0dBm	-29.0dBc	-33.6dBc	-32.0dBc	-34.2dBc	-
具有 DPD	28.0dBm	-50.3dBc	-49.6dBc	-51.6dBc	-50.8dBc	30.0%

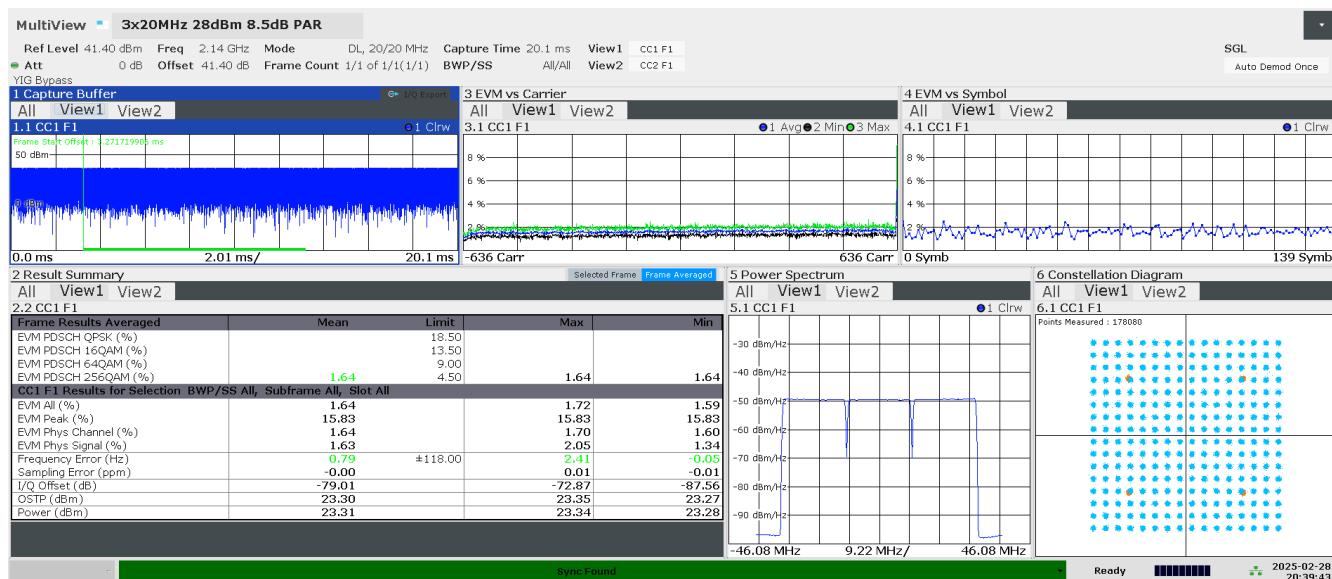


图 4-6. TX4 EVM% 图：中心频率为 2.140GHz 的 3x20MHz 信号 (PAR = 8.5dB)

## 5 总结

表 5-1 和表 5-2 总结了测试条件，并给出了在采用 AFE7769D 时，在三频段配置下，三种不同功率放大器在三种不同射频频率下运行的三个不同 TX 通道的 ACLR 和 EVM% 测试结果。

结果表明，AFE7769D 利用集成式 CFR/DPD 算法和 LO 合成器的丰富性，可实现紧凑高效的三频无线电设计。

表 5-1. 测试案例汇总

测试	中心频率	载波波形	电源	PAR	V <sub>DS</sub>
TX1 : SKY66522-11	2.595GHz	2x100MHz	31dBm	8.0dB	5V、12V
TX3 : SKY66391-12	1.8425GHz	3x20MHz+ 15MHz	28dBm	8.5dB	5V
TX4 : SKY66394-11	2.140GHz	3x20MHz	28dBm	8.5dB	5V

表 5-2. CFR/DPD 性能结果汇总

测试	PA 输出功率	相邻通道 ACLR (下/上)	备用通道 ACLR (下/上)	PA 效率	EVM%
TX1	31dBm	- 49.0dBc / - 50.3dBc	- 51.6dBc / - 52.9dBc	31.0%	1.94%
TX3	28dBm	- 51.2dBc / - 52.0dBc	-	31.8%	1.44%
TX4	28dBm	- 50.3dBc / - 49.6dBc	- 51.6dBc / - 50.8dBc	30.0%	1.64%

## 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出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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月