



Ebenezer Dwobeng

摘要

本应用报告展示了适用于多输入多输出 (MIMO) 无线通信的无线电收发器的实现和性能。AFE76xx 是用于收发器设计的主器件。此器件集成了 4 个模数转换器 (ADC)、4 个数模转换器 (DAC) 和一个锁相环 (PLL)，用于采样时钟的生成。采用此 MIMO 收发器的主要优势是高度集成，从而可通过多个 AFE76xx 器件的同步，更轻松地扩展到更大的天线阵列。此外，基于直接射频采样的数据转换器消除了无线电收发器设计中常见的模拟缺陷，如本机振荡器 (LO) 泄漏和边带图像。

内容

1 引言.....	2
2 系统概述.....	4
3 星座图.....	8
4 误差矢量幅度 (EVM).....	8
5 结论.....	9
6 修订历史记录.....	9

插图清单

图 1-1. LTE TM4 中的单用户 MIMO.....	2
图 1-2. LTE TM5 中的多用户 MIMO.....	2
图 1-3. 小蜂窝网络.....	3
图 2-1. 2x2 MIMO 收发器的方框图.....	4
图 2-2. AFE76xx 中的发送器数据路径.....	5
图 2-3. AFE76xx 中的接收器数据路径.....	6
图 2-4. 5MHz LTE 2x2 MIMO 波形的 VSA 解调设置.....	7
图 2-5. 解调后的星座图、频谱、EVM 与载波频率和误差摘要结果.....	7
图 3-1. 收到的 5MHz LTE 2x2 MU-MIMO 测试模式星座图.....	8
图 4-1. 1 OFDM 符号的 RMS EVM 与载波频率.....	9

表格清单

表 2-1. 收发器系统设计参数.....	4
表 3-1. EVM 性能.....	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

无线通信中的 MIMO 是一种能够传输和接收多个独立数据流的技术。此技术有助于提高能可靠地进行通信的最大数据速率。MIMO 的一些应用将在后续部分中介绍。

1.1 LTE 中的 MIMO

在第 12 版 LTE 标准中，为下行链路指定了 10 种不同的传输模式 (TM)。在这些传输模式中，TM4 和 TM5 使用 MIMO。TM4 或单用户 MIMO (SU-MIMO) 最多可支持 4 根天线，以便将数据传输至具有最多 4 根接收天线的同一用户设备 (UE)。图 1-1 显示了 2x2 SU-MIMO 配置的情况。在 TM5 或多用户 MIMO (MU-MIMO) 中，最多也可支持 4 根天线，但与 TM4 的主要差异在于，数据传输到多个单天线 UE。图 1-2 显示了 2x2 MU-MIMO 配置的情况。

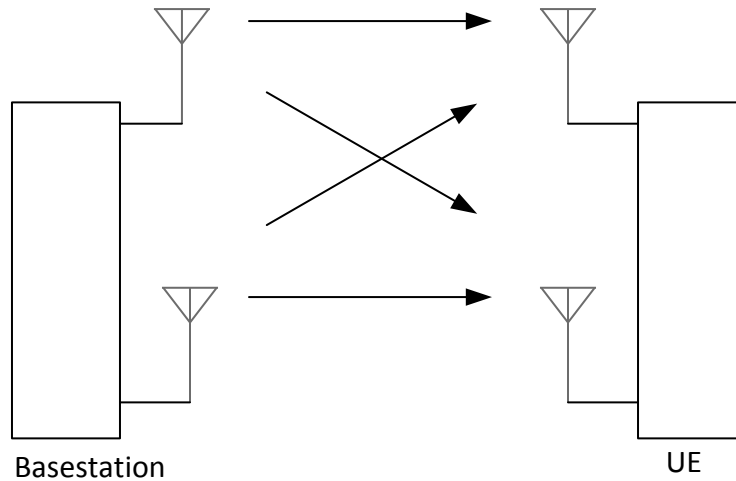


图 1-1. LTE TM4 中的单用户 MIMO

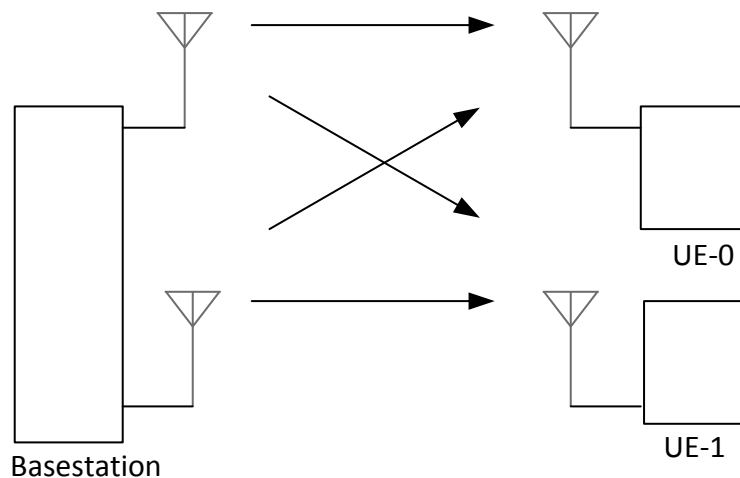


图 1-2. LTE TM5 中的多用户 MIMO

1.2 5G 中的 MIMO

在 5G 中，要求数据速率比现有 4G 标准提高 1000 倍，这需要大传输带宽，而这种带宽仅在毫米波频率 (> 24GHz) 下可用，但毫米波通信的一个关键挑战是高通道衰减。为了抵消这种情况，会使用大型天线阵列来提高天线增益。这种被称为大规模 MIMO 的技术是成功部署 5G 不可或缺的一项技术。

1.3 无线回程中的 MIMO

在基站蜂窝区边缘的移动用户会体验到较差的信号覆盖，这主要是因为邻近蜂窝产生的干扰。在这种情况下，可部署小蜂窝网络，使基站更靠近用户并扩大覆盖范围。如图 1-3 所示。在用户集中的地区也部署小蜂窝网络，以

便增加网络容量。此外，随着物联网等新兴技术的出现，更多的设备将上线，需要通过部署密集的小蜂窝网络来增加网络容量。密集部署小蜂窝网络面临的一个关键挑战是确保小蜂窝网络之间以及小蜂窝网络和基站之间的有效回程通信。为了实现这一点，无线回程比使用光纤或电缆进行回程更受欢迎，因为大量蜂窝网络参与其中。在无线回程中使用 MIMO 来提高数据速率，同时与多个小蜂窝网络进行无干扰的通信。

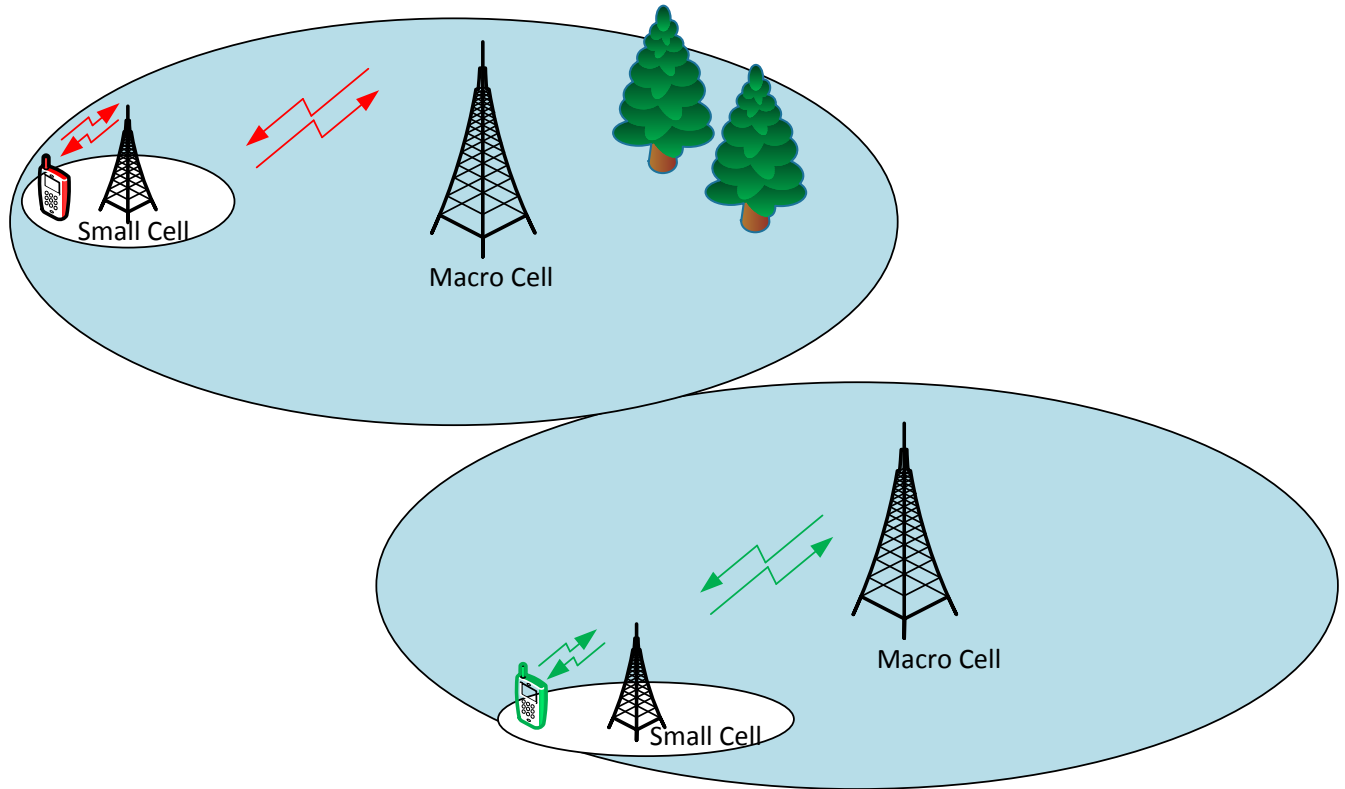


图 1-3. 小蜂窝网络

2 系统概述

2.1 方框图

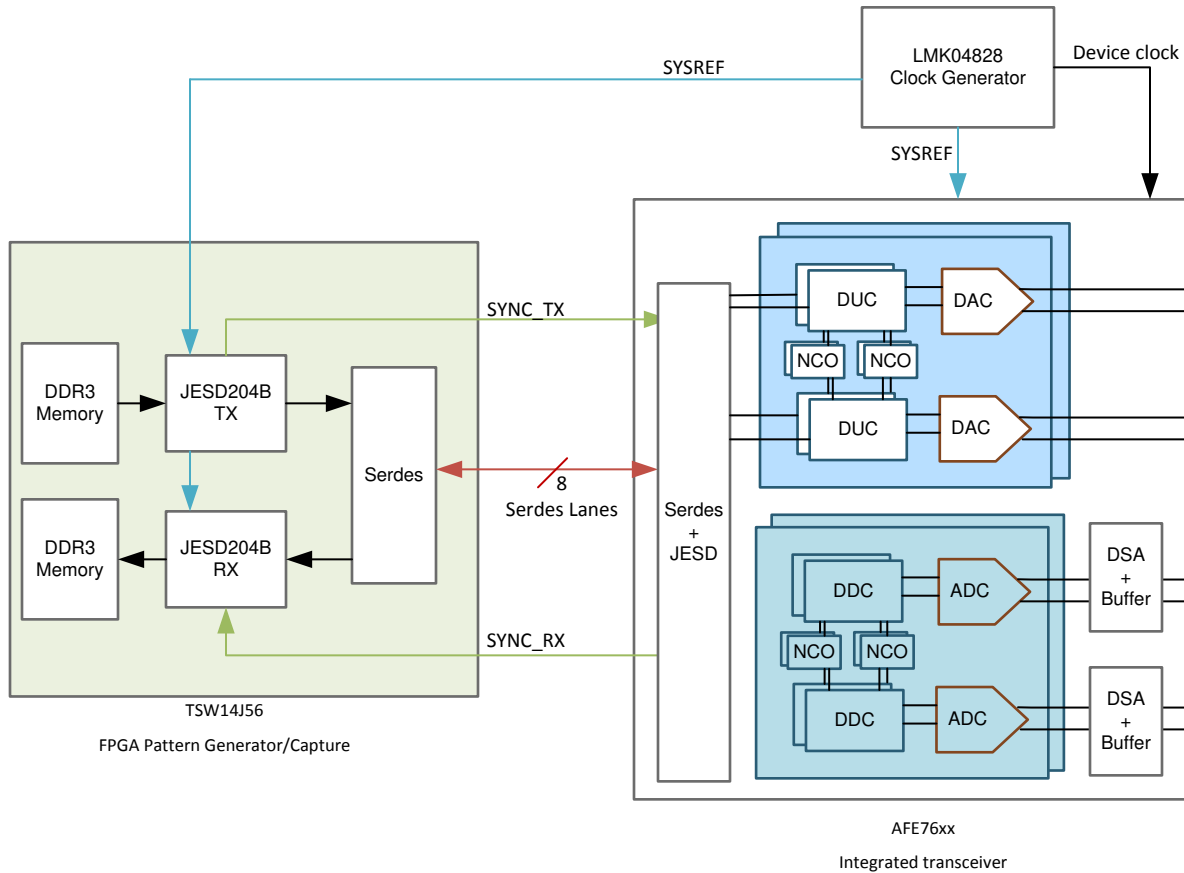


图 2-1. 2x2 MIMO 收发器的方框图

2.2 设计参数

表 2-1. 收发器系统设计参数

函数	参数	值
发送	数据速率 (MHz)	491.52
	天线数	2
	带宽 (MHz)	>200
	采样率 (MHz)	8847.36
	射频频率 (GHz)	1.84
	IF 频率 (MHz)	0
接收	数据速率 (MHz)	491.52
	天线数	2
	带宽 (MHz)	>200
	采样率 (MHz)	2949.12
	射频频率 (GHz)	1.84
	IF 频率 (MHz)	20

2.3 硬件设置

用于测试收发器性能的硬件包括 TSW14J56EVM (用于向发送器生成数据和从接收器捕获数据) 和 AFE76xxEVM (用于实现 2x2 MIMO 收发器)。使用两条长度相等的同轴电缆, 通过中心频率为 1.84GHz 的带

通滤波器将发送器的输出与接收器的输入连接起来。发送器 NCO 频率设置为 1.84GHz，接收器 NCO 频率设置为 1.82GHz，从而在接收器处产生 20MHz 的 IF 频率。

2.4 软件设置

所用的软件包括 HSDCPRO (用于 PC 和 TSW14J56EVM 之间的数据传输通信)、AFE76xxEVM GUI (用于配置 AFE76xxEVM) 和 Keysight 矢量信号分析仪 (用于创建和分析 MIMO 测试模式)。

2.5 MIMO 测试模式生成

通过使用仅含直接路径 (无交叉通道路径) 的 2x2 MU-MIMO、5MHz LTE 下行链路信号, 可以测试 MIMO 收发器的性能。使用 Keysight 矢量信号分析仪 (VSA) 12.0 软件可记录信号, 而且该信号符合 3GPP LTE 标准的 v8.9.0 (2009 年 12 月) (TS 36.211)。

导出至 Matlab 之后, 所记录文件的数据速率 (7.68MHz) 通过插值提高 64 倍, 增加至 491.52MHz (表 2-1 中 MIMO 发送器的数据速率)。此外, 插值数据转换为 16 位分辨率, 以匹配 MIMO 发送器的分辨率。

2.6 发送器

在 Matlab 中进行插值和 16 位量化后, 使用 HSDCPRO 软件将测试模式加载到 TSW14J56EVM 的外置 DDR 存储器中。TSW14J56EVM 通过 JESD204B 接口将数据传输到 AFE76xxEVM, 如图 2-1 所示。

在 AFE76xx 器件内, 使用数字上变频转换器块 (DUC) 对数据进行进一步处理。DUC 对数据进行过滤并将采样率提高 18 倍, 从而将数据速率提升至 8847.36MHz。在此设计中, 通过集成式 PLL 和 VCO 生成数据时钟, 但数据时钟也可来自外部。进行插值后, DUC 将数据与通过数控振荡器 (NCO) 生成的载波混合。在此设计中, 载波的频率设置为 1.8GHz, 但也可设置为 0 到奈奎斯特频率之间的任何频率。值得注意的是, 混合全部在数字域中完成, 因此没有边带图像或载波频率馈通。

在 DUC 中进行数字处理后, 数据转换为模拟波形, DAC 以 8.847GHz 的采样率运行。图 2-2 所示为 AFE76xx 器件中的发送器数据路径。

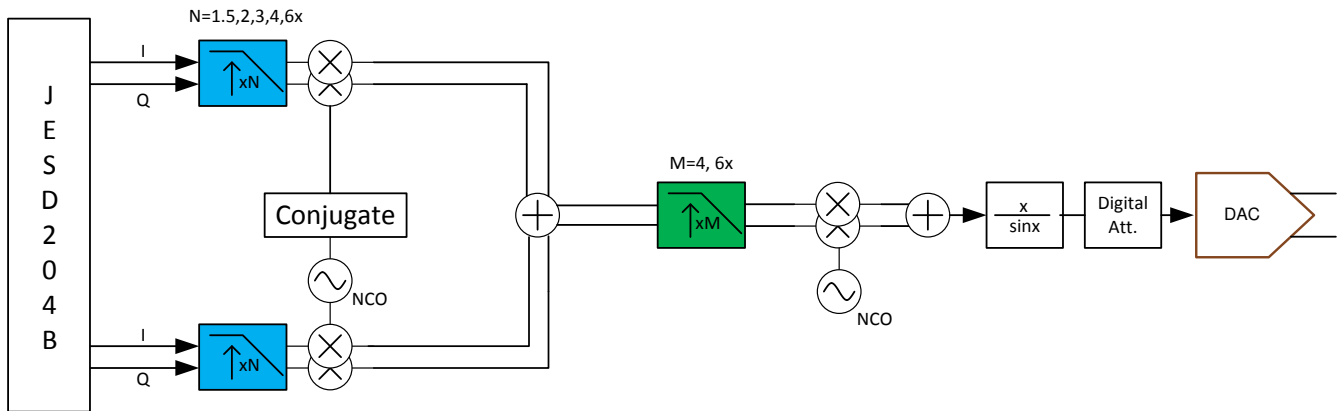


图 2-2. AFE76xx 中的发送器数据路径

2.7 通道

实现一个理想的通道, 以消除通道对收发器性能的影响, 并仅检查 AFE76xx 器件产生的影响。所用通道包括匹配的同轴电缆和带通滤波器, 在期望的带宽下表现出平坦的频率响应和 0dB 衰减。

2.8 接收器

在接收器中, 传输的波形由以 2949.12MHz 的采样率运行的 ADC 进行数字化。通过将集成的 PLL 和 VCO 输出除以 3 来生成 ADC 的时钟。来自 ADC 的数字化数据进入数字降压转换器块 (DDC)。在 DDC 内, 通过与来自 NCO 的载波频率混合, 数据解调为 IF 频率。对于此设计, 接收器使用的载波频率为 1.82GHz, 因此 IF 频率为 20MHz。在 DDC 内, 也会过滤解调的数据, 并将采样率降低 6 倍, 以将数据速率降低至 491.52MHz。

在 DDC 之后，大幅减少的数据以 9.8304Gbps 的 SERDES 速率通过 JESD204B 接口传输至 TSW14J56EVM。TSW14J56EVM 捕获来自收发器的数据并存储至外部 DDR 存储器。图 2-3 所示为 AFE76xx 器件中的接收器数据路径。

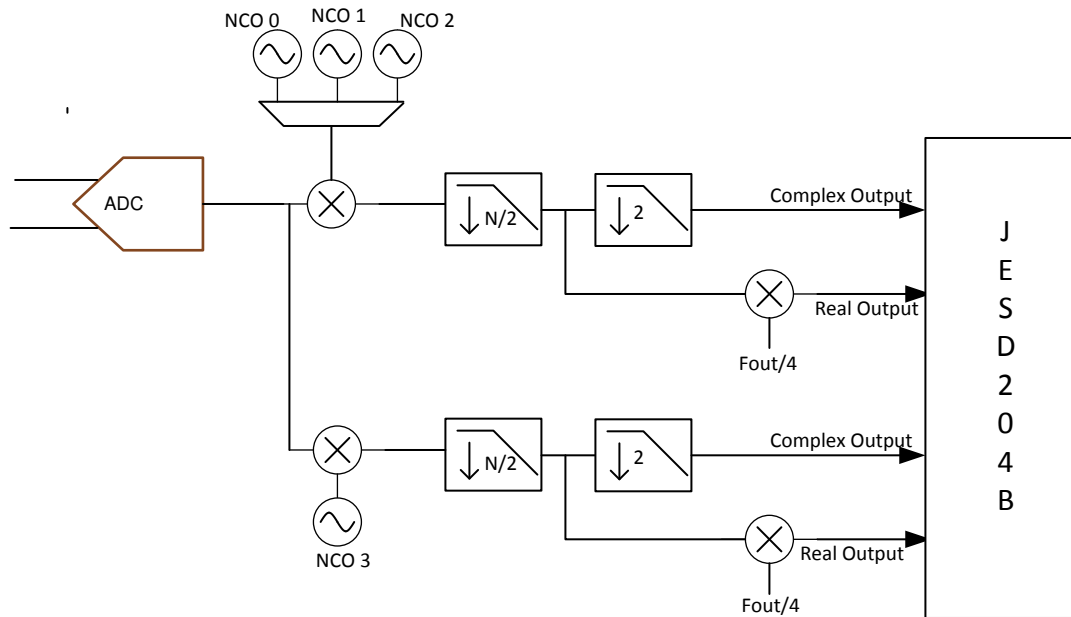


图 2-3. AFE76xx 中的接收器数据路径

2.9 处理捕获的数据

捕获的数据在 20MHz IF 频率和 16 位分辨率下的数据速率将为 491.52MHz。HSDCPRO 软件从 TSW14J56 的 DDR 存储器读取捕获的数据并保存至 PC。在加载到 VSA 软件中进行分析之前，使用 Matlab 将 IF 频率移至基带，并将其原始数据速率 7.68MHz 增加 64 倍，以大幅减少数据。

2.10 测试结果

使用 VSA 软件对收到的数据进行解调和分析。图 2-5 显示了分析结果，包括收到的星座图、频谱和误差矢量幅度 (EVM) 性能。对 LTE 帧内的 18 个插槽或 126 个 OFDM 符号进行分析。图 2-4 所示为用于解调的 VSA 设置的详细信息。

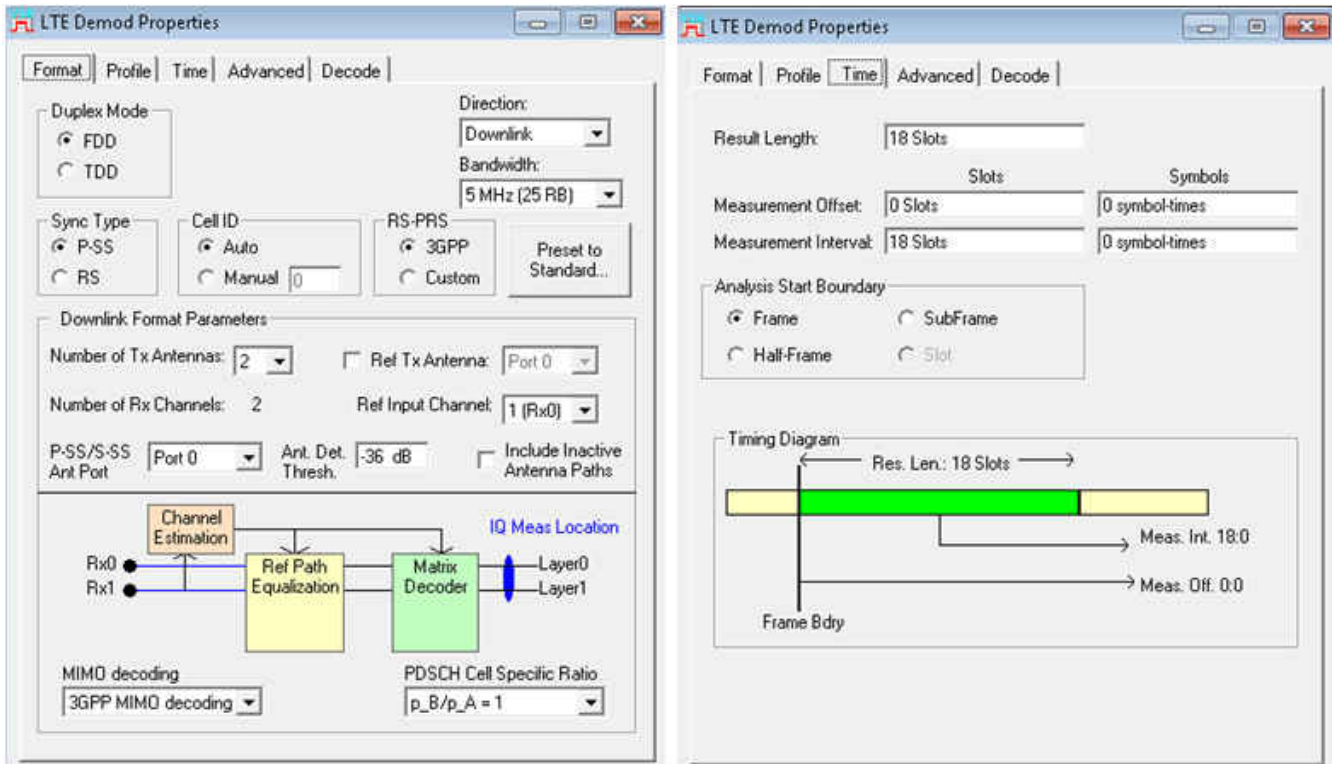


图 2-4. 5MHz LTE 2x2 MIMO 波形的 VSA 解调设置

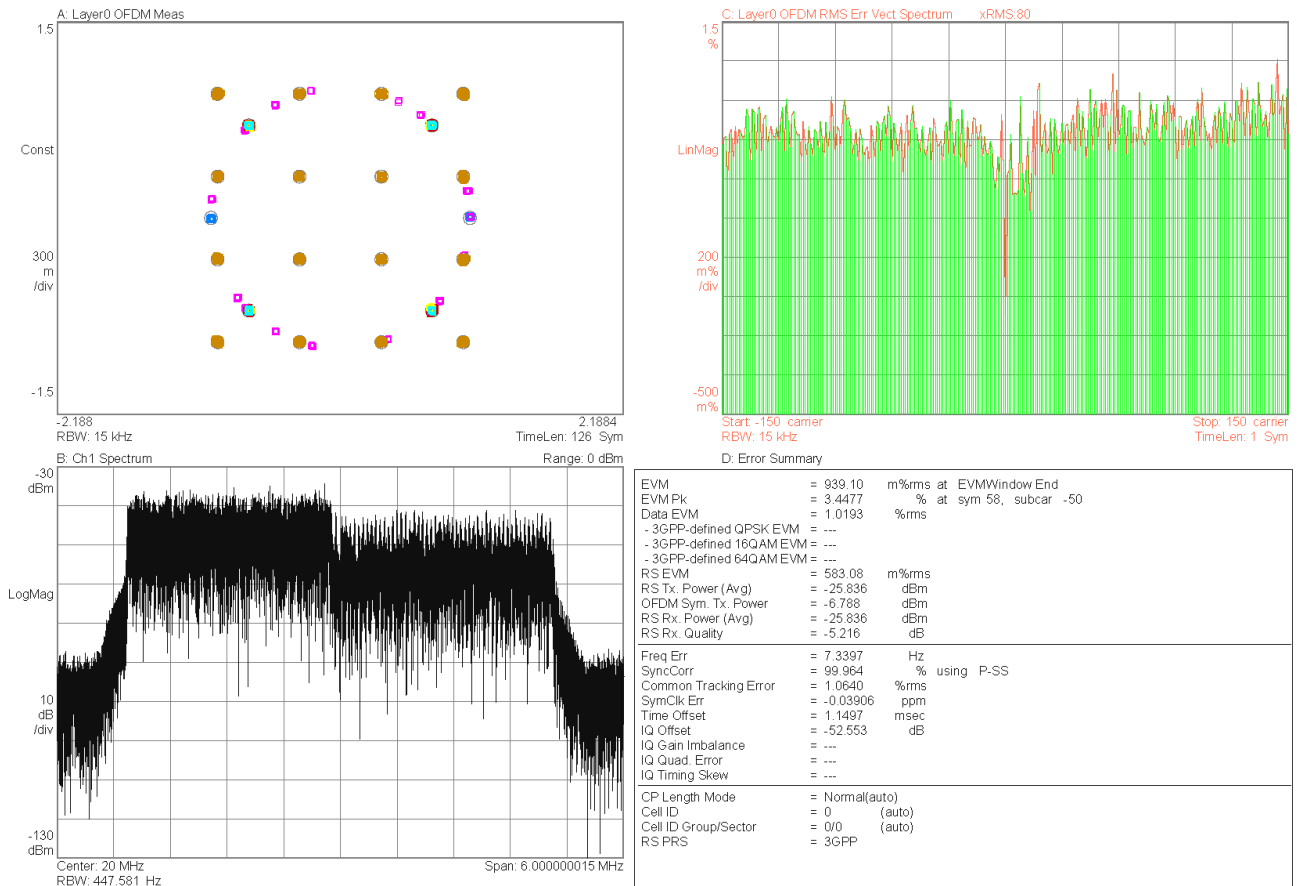


图 2-5. 解调后的星座图、频谱、EVM 与载波频率和误差摘要结果

3 星座图

收到的星座图是 BPSK、QPSK、16-QAM 和 Z-Chu 等多种调制格式的叠加，如图 3-1 所示。下面的表 3-1 汇总了 LTE 帧中的各种通道、所用的调制格式、测量的 EVM 和 LTE 标准规格。

表 3-1. EVM 性能

通道	调制	EVM (dB)	规格
P-SS	Z-Chu	-40.4	
S-SS	BPSK	-39.9	-15dB (或 17.5%)
PDSCH_User01	16-QAM	-40.2	-18dB (或 12.5%)
PDSCH_User02	QPSK	-39.4	-15dB (或 17.5%)

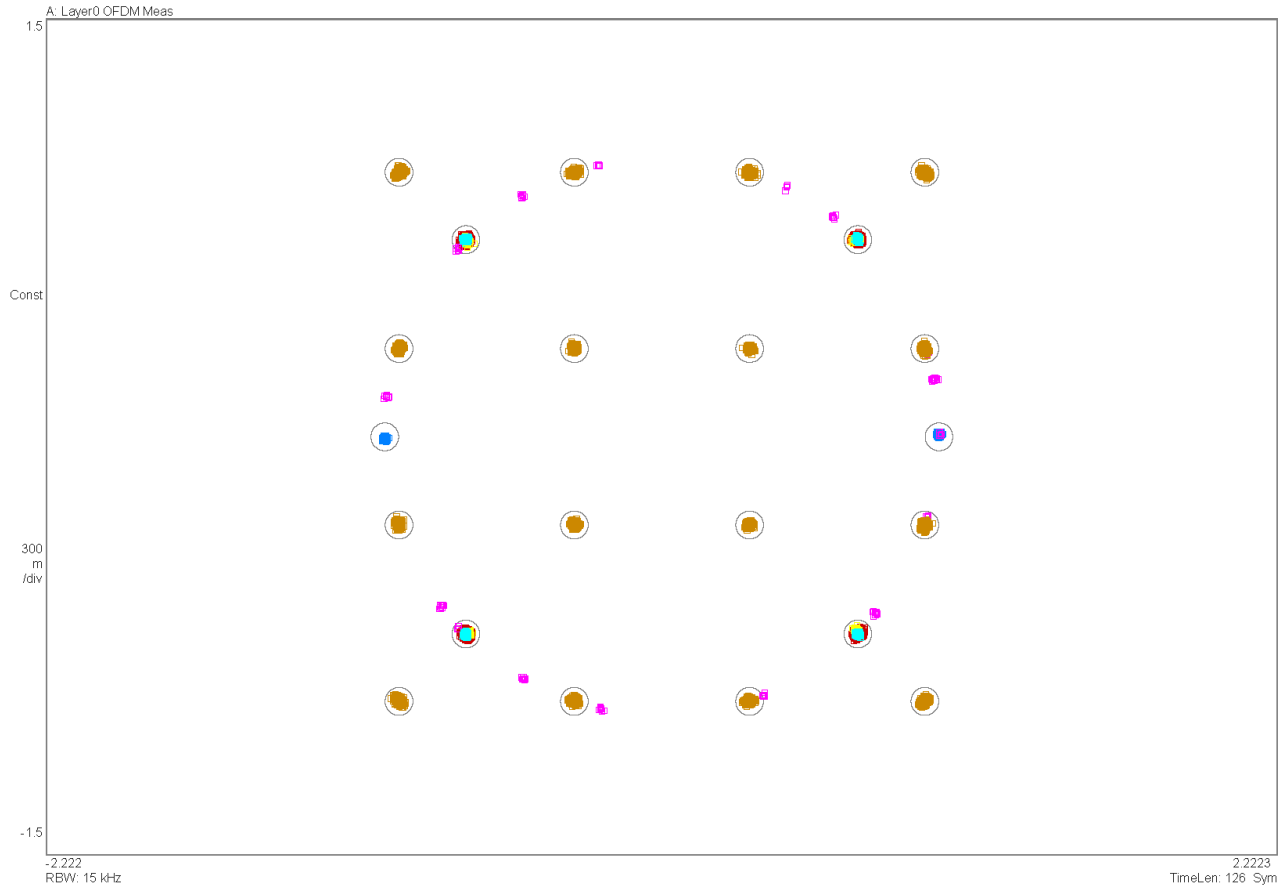


图 3-1. 收到的 5MHz LTE 2x2 MU-MIMO 测试模式星座图

4 误差矢量幅度 (EVM)

EVM 测量收到的星座图与理想星座图的偏离程度。图 4-1 所示为每个子载波的 RMS EVM 图。对于 5MHz LTE，每个 OFDM 符号由 300 个子载波组成，每个子载波 RMS EVM 的计算方法是查找 126 个符号 (或 18 个插槽) 的 EVM 中的 RMS。此图有助于理解是哪个子载波使整体 EVM 降级最大，并在必要时进行纠正。每个符号的总体 RMS EVM (符号中 300 个子载波中的每一个子载波的 EVM 中的 RMS) 是 0.939% 或 -40.5dB。

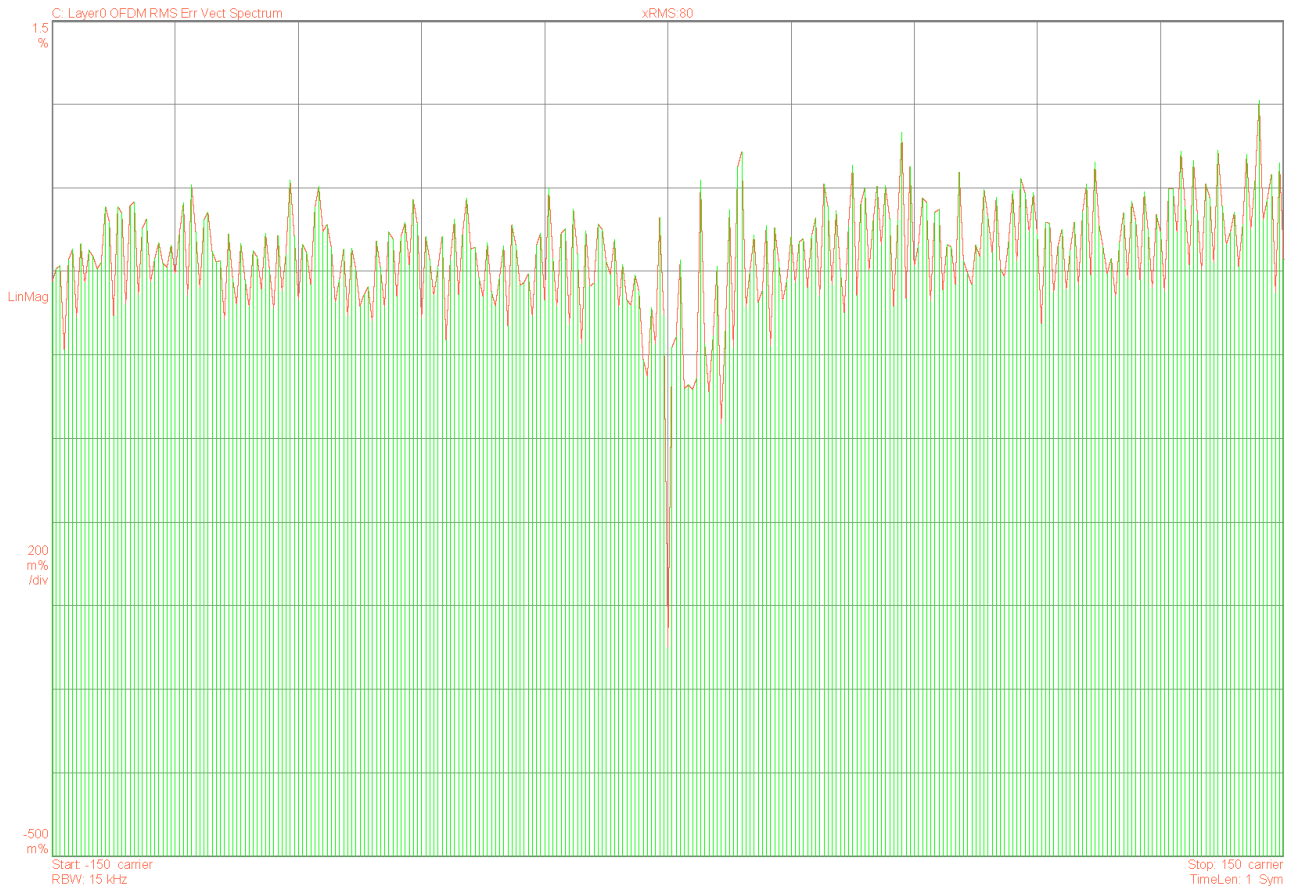


图 4-1. 1 OFDM 符号的 RMS EVM 与载波频率

5 结论

本应用报告展示了使用 AFE76xx 器件来实现 2x2 MIMO 的单芯片收发器解决方案。通过 5MHz LTE MIMO 测试模式和 VSA 软件来分析收发器的性能。实现 -40.5dB 的总体 RMS EVM 性能，使其适用于各种应用。该收发器设计可用于 LTE eNodeB 以实现 MIMO 传输模式，或者可扩展到更大的阵列以用于 5G 中的大规模 MIMO 等应用。

6 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (September 2018) to Revision A (August 2021)

Page

- 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式..... 1

重要声明和免责声明

TI 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、某特定用途方面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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务, TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.ti.com) 上其他适用条款/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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司