

AFE768X TX 应用手册

Wenjing Lu

Telecom FAE Team

摘要

AFE768X 是世界上第一款射频直采集成方案，拥有四通道 14bit 最高采样速率 9GSPS 的 RFDAC 和四通道 14bit 3GSPS RFADC，实现基带信号到射频信号的直接转换。性能上满足 TDD 宏站 TX/RX/FB, FDD 宏站 TX/FB 以及 Massive MIMO FDD/TDD TX/RX/FB 需要；架构上支持 TX/RX/FB 单频/双频收发；通过时分共享实现 TDD 模式下接收和反馈共用接收通道，从而实现单一芯片支持 TDD 宏站模式下 4T4R2FB 以及 FDD 宏站模式下的 4T2F。其高度的集成化为宏站小型化，Massive MIMO 商用化提供了可能，本文将详细介绍 AFE768X TX 在实际设计应用中遇到的问题及其解决方案。

目录

1	引言.....	2
2	双级 NCO 架构应用.....	2
3	DSA 增益控制及其动态恢复.....	3
	3.1 数字域增益造成动态的线性恶化.....	3
	3.2 模拟 RFDAC 在小信号场景下线性的恶化及其解决方案.....	3
4	Serdes 应用技巧.....	5
	4.1 最大支持带宽计算.....	5
	4.2 TDD 模式下的应用技巧.....	6
	4.3 短距模式下的应用技巧.....	6
5	其他.....	7
6	参考文献.....	8

图

Figure 1.	TX 架构框图.....	2
Figure 2.	20MHz LTE ACPR vs DSA.....	3
Figure 3.	3X3 简单示意图 (3b thermometer X 3b binary).....	4
Figure 4.	PG1.x Dither 使能后频谱输出.....	4
Figure 5.	Dither 功能使能前后线性指标改善的对比.....	5
	Dither disable mode@ DSA=40dB: 5.a. ACPR=33dBc; 5.b. EVM=4.1%.....	5
	Dither enable mode@ DSA=40dB: 5.c. ACPR=43dBc; 5.d. EVM=1.4%.....	5
Figure 6.	眼图示例.....	7
Figure 7.	眼图随温度的变化.....	7

1 引言

AFE768X 发射 TX 最高采样率 9GSPS 在保证动态的情况下可以直接输出最高 3.5GHz 频带的射频信号；接口速率最高 1.5GSPS 可以支持最宽 1.2GHz 的 DPD 带宽；每通道都支持单频或者双频输出；内置 40dB 数控衰减器用于静态功率补偿和功率等级控制；15GSPS Serdes 传输；支持 JESD204B Subclass1；其他辅助功能包括 PAP 功放保护，整数时延调整等。本文将重点介绍在发射端实际设计过程中的一些应用技巧，包括双级 NCO 架构应用；DSA 增益控制及其动态恢复；Serdes 应用技巧等。

2 双级 NCO 架构应用

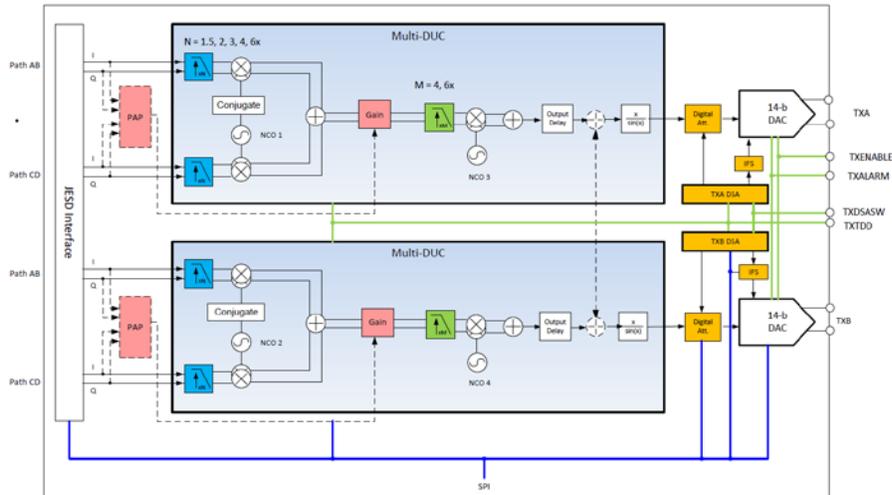


Figure 1. TX 架构框图

AFE768X 以两个 TX 为基本单元，镜像复制形成四通道架构，上图 1 就是两通道 TX 基本单元架构框图。主要有三部分组成，分别是 Serdes + JESD 的接口单元，DUC + NCO 数字单元，以及 RFDAC 模拟单元组成。

每通道 TX 由两个独立 DUC 模块组成，并且在两级 NCO 架构下，实现了低功耗模式下单通道双频段的应用。每个 TX 通道包含 3 个 NCO，分别为两个频点互斥（即 $\pm F1$ ）的第一级低速 NCO，和一个第二级高速 NCO。两个第一级 NCO 在低速时钟域完成两个频段的相对搬移，合路后经过第二级高速 NCO 完成基带到射频的绝对搬移。这样的架构相对于两个高速 NCO 直接实现双频段的绝对搬移而言，功耗更优。第一级 NCO 最高频率 1.5GHz，决定了两个频段的最远空口距离为 1.5GHz；第二级 NCO 工作在 DAC 采样钟下（ $\leq 9\text{GSPS}$ ）可以实现 Sub 6GHz 的全频段搬移 $F2$ （但当输出频段 $>3.5\text{GHz}$ 后，由于模拟和数字的 roll off 效应，输出功率和动态将受限）；最终实现 Band1 ($F2-F1$) 和 Band2 ($F2+F1$) 单通道双频段输出。例如 TDD 的 FAD 输出形态： $F2$ 取约 2275MHz， $F1$ 取约 325MHz。注意在双频段合路的时候，为了避免理论上的数字域溢出，每一个频段都会默认回退 6dB，导致总体增益在 IQ 为常数时损耗 3dB，IQ 为正常调制信号时损耗高达 6dB，所以需要在配置时注意数字增益补偿。

3 DSA 增益控制及其动态恢复

3.1 数字域增益造成动态的线性恶化

AFE768X 的增益控制模块由模拟控制和数字控制两部分组成，以 1dB 为步进，共 40dB 衰减调整范围。前 12dB 衰减在模拟侧实现，后 28dB 衰减在数字侧实现。模拟衰减是通过改变 RFDAC 的满幅输出电流来实现增益控制，以相同权重作用于主信号和噪声，所以在模拟衰减范围内动态几乎保持不变。28dB 数字衰减的过程中，噪底不变，只有主信号功率在数字域内被衰减，造成动态的直接损耗。如下图 2 所示，单载波 20MHz LTE 的 ACPR 在前 12dB 的模拟衰减过程中，保持大于 70dBc 的性能，但当衰减大于 12dB 进入数字衰减域后，ACPR 开始线性恶化。可是由于大衰减仅出现在发射功率等级较小的场景下，在此场景下，PA 已回退到线性区域，空口指标瓶颈反而不是 ACPR，而是 EVM。数字衰减本身并不会直接恶化 EVM，但在大衰减模式下，RFDAC 的模拟失配会间接导致 EVM 恶化，将在下章节给出解决方案。总之，在大衰减模式下，ACPR 的恶化并不会造成系统空口指标不合格。但是如果希望在大衰减模式下能够达到更好的动态性能，解决数字衰减对于动态的恶化，可以增加一级外围 DVGA，仅使用 AFE768X 的 12dB 模拟衰减，剩余的衰减控制转移到外围 DVGA 控制。

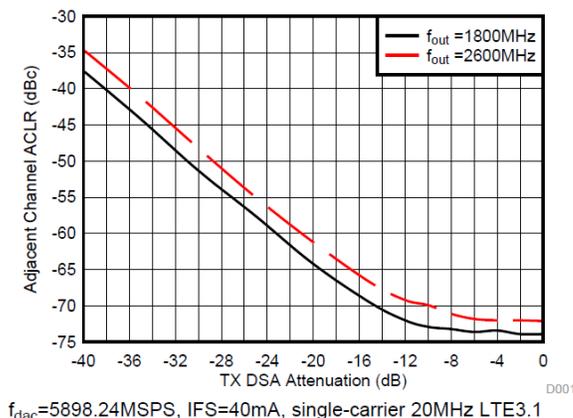


Figure 2. 20MHz LTE ACPR vs DSA

3.2 模拟 RFDAC 在小信号场景下线性的恶化及其解决方案

AFE768X RFDAC 由同等权重的 Thermometer 电流源和二进制权重的 Binary 电流源共同组成。同等权重的 Thermometer 电流源，顾名思义每个电流源权重一致，即 M 个大小一样的电流源组成，每使能一个电流源将提供等分 1/M 的输出电流，具有良好的线性，但是缺点是当比特数上升后面积成级数增长，实现 N 比特需要 2^N 个电流单元。二进制权重的 Binary 电流源顾名思义每个电流源以二进制权重 X2 递增，优点是实现 N 比特只需要 N 个电流单元，缺点是由于模拟电流源失配引起的线性恶化较同等权重电流源更多。AFE768X 在线性和面积间寻求折中，采用的是高 5 bit thermometer 和低 9 bit binary 的形式实现。图 3 是 3X3 架构的简单示意图（3 bits MSB thermometer 和 3 bits LSB binary）。

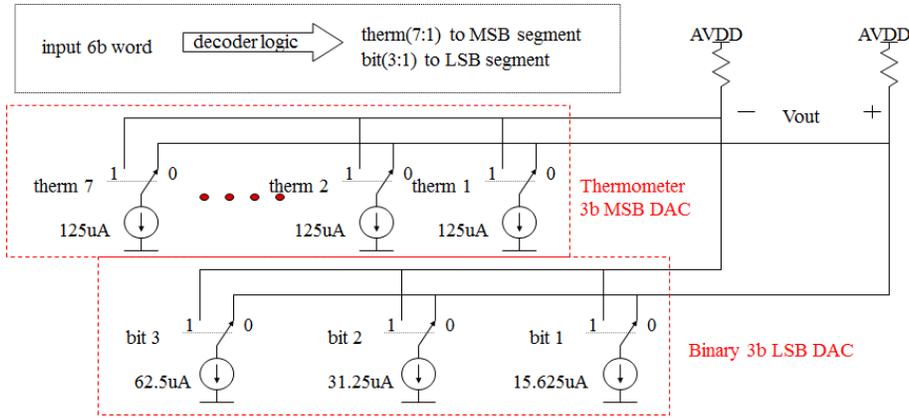


Figure 3. 3X3 简单示意图 (3b thermometer X 3b binary)

由于低比特由 binary 电流单元实现，导致 AFE768X 在信号幅度较小时，低比特位占比升高，binary 二进制单元线性失配也将越发明显，直接体现为线性指标的恶化，直线性指标 INL 和 DNL，交流线性指标 IMD3 和 ACPR，均出现恶化。为了改善 AFE768X 在大衰减模式下 binary 电流单元引入的线性失配，AFE768X 提供了 Dither 功能。

Dither 是通过在信号带外加入非相关噪声源以打散原有主信号的非线性分量的相关性的方式来改善整体线性性能的。具体来讲，主信号的非线性以谐波分量的形式存在，谐波分量是主信号的规律性畸变，因此时域上是存在主信号特征的。在信号带外加入非相关噪声，噪声的引入在时域上打乱谐波分量的主信号特征，将其能量分散化在一个更宽的频带范围内，能量被打散体现在频谱上就是非线性幅值明显降低，从而有效的改善了原有主信号的非线性性能。Dither 使用的噪声源可以是单音信号，也可以是调制信号。设定 Dither 信号位置的原则为不落入主信号带内，最好处于 Duplexer 的高抑制带，这样既可以改善 AFE768X 在大衰减模式下的性能恶化，又可以减小 dither 噪声源本身对空口频谱的干扰。如图 4 所示，就是使能单音 Dither 信号后，射频输出口的频谱图。AFE768X PG1.x 可以复用每个 TX 通道的第二个 DUC 及其 NCO，使能 single tone test pattern 生成离主信号最远 1.5GHz 的单音 Dither 信号。AFE768X PG2.0 将加入独立的 Dither 模块，在不占用第二个 DUC 的前提下，生成频率低至数 MHz 的 Dither 信号，在改善大衰减模式线性的同时，并不会对 Duplexer 造成负担，由外围的输出匹配 Balun 直接滤除。

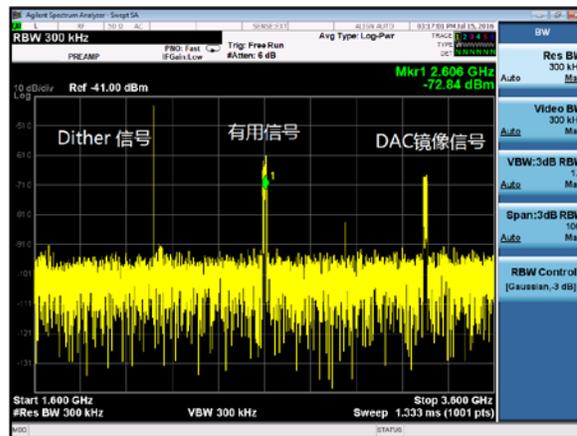


Figure 4. PG1.x Dither 使能后频谱输出

图 5 所示是 Dither 使能前后 ACPR 和 EVM 的改善对比。使能 Dither 修正前，TM3.1 信号在 DSA = 40dB 的时候 ACPR 出现明显恶化，此时数字输出功率很小，最终输出级处于线性区域，该理想状态下 ACPR 应该主要由热噪声贡献（平坦的底噪），但从 5.a 可以看到非线性对 ACPR 的明显贡献（凸起的底噪）；5.b 是此时对应的 EVM；5.c 和 5.d 分别是 Dither 使能后 ACPR 和 EVM 的改善，ACPR 有近 10dB 的优化，EVM 也从 4.1%改善到 1.4%。

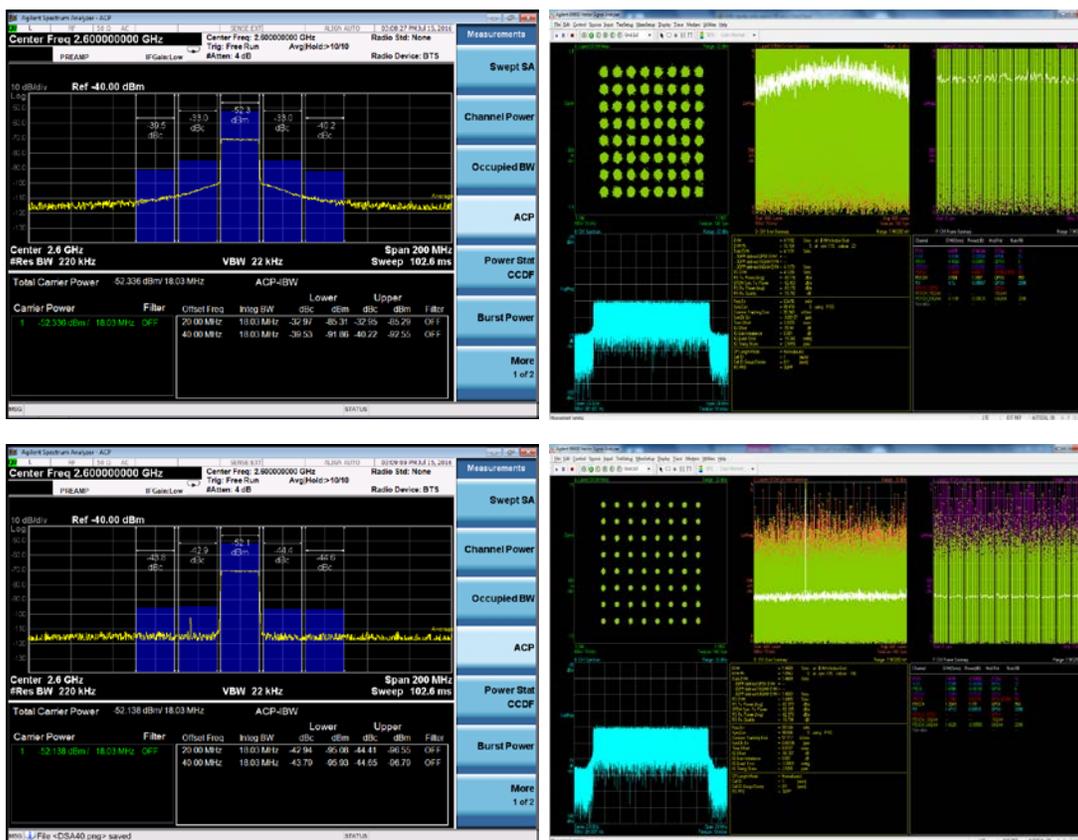


Figure 5. Dither 功能使能前后线性指标改善的对比

Dither disable mode@ DSA=40dB: 5.a. ACPR=33dBc; 5.b. EVM=4.1%

Dither enable mode@ DSA=40dB: 5.c. ACPR=43dBc; 5.d. EVM=1.4%

4 Serdes 应用技巧

AFE768X 采用 15GSPS Houdini Serdes 实现，这里将讨论在 Houdini 应用过程中的几个应用技巧。

4.1 最大支持带宽计算

AFE768X 共 8 条 15 GSPS Serdes lane，支持最高 4 通道单频段 16 bit 737.28 MSPS，或者 4 通道单频段 12 bit 984.32 MSPS，或者 4 通道双频段 16 bit 368.64 MSPS，或者 4 通道双频段 12 bit 491.52 MSPS，或者 2 通道单频段 16 bit 1474.56 MSPS。

如何快速计算 JESD204B 下不同模式下最大的支持带宽：

最大支持带宽= (Serdes lane 数×Serdes 速率×80%的 8b/10b 效率) / (通道数×频段数×2_代表 I 和 Q 数据×bit 数)

以 4 通道双频段 12bit 为例：

最大支持带宽= (8×14.7456G×80%) / (4×2×2×12) =491.52MSPS

4.2 TDD 模式下的应用技巧

Houdini 的 Serdes Rx 的 DFE 在 TDD 信号加扰模式下有可能出现过加重的情况。这是由于在长期接收一个固定不变的 8b/10b 码型后，Serdes 侧 DFE 的 TAP 将偏离最优系数，引起 JESD RX 8b/10b 错误，导致断链。

具体来讲，DAC 侧的 TDD 信号默认在 DL 时隙发送业务信号，UL 时隙发送长零。加扰时，在特定种子后跟随长零信号经过 scrambler 会产生长零输出，长零输出的固定 8b/10b 码型会使得 DFE 的所有 TAP 偏离最优系数，引起过加重，在退出 UL 进入 DL 正常发数模式后，过加重无法及时恢复导致 8b/10b 误码，JESD 断链。例如以特定的种子 0x0202 开头的长零序列在经过 $1+X^{14}+X^{15}$ 加扰后生产长零序列。

为了规避这种情况的出现，需要避免 UL 时隙出现长零序列。可以选择在 UL 时隙加入随机噪声或者固定偏移；或者更简单一点的办法是在 TDD 所有时隙信号上加入随机噪声或者固定偏移，例如在所有 I 的基础上加 1，在所有 Q 的基础上加-1。在 16bit 模式下加入小于 2LSB 的随机噪声或者固定偏移不会对整体信号产生影响，即使在 12bit 模式下，最后 1 个 LSB 固定偏移也在-72dBFS 水平对性能没有影响。

4.3 短距模式下的应用技巧

Houdini 是适用于长距的 Serdes IP，在短距模式下存在过加重的可能，建议最优走线差损 Insertion loss 为 12dB 到 15dB。如果无法实现最优差损，短距模式下低温环境容易出现 8b/10b 错误导致断链建议的解决方法为减小发送侧的 TX Swing。Houdini 为适配长距应用，CDR 的工作方式为通过采样接收信号上升沿和下降沿来恢复时钟和数据，缓变的上升/下降沿有利于 CDR 的准确识别；反之如果边沿过于陡峭，Houdini 的 CDR 有错误识别的可能性，从而导致误码的出现，常常表现为零星 8b/10b 报错。陡峭边沿如图 6 左图所示；缓变边沿如图 6 右图所示，右图也是我们希望优化的眼图样例。

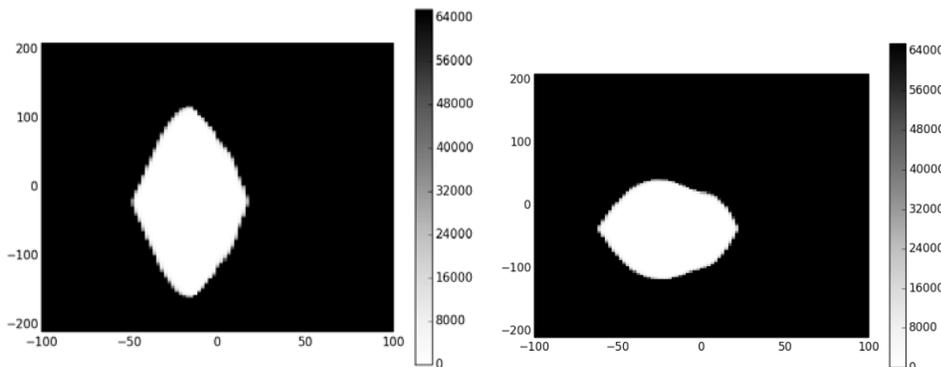


Figure 6. 眼图示例

降低发射端的 TX Swing 可以有效的减缓边沿的变化率，但如何在全温变化中寻找最优的发射端 TX Swing？在全温变化中，低温 PCB 走线衰减最小，导致 Swing 最大，上升沿下降沿最陡，CDR 出现误识别的几率最高，所以低温短距是 Houdini 误码率最高的场景；但如果简单的把发射端的 TX Swing 降低以缓解低温下的陡峭上升沿下降沿会导致高温下由于 PCB 走线衰减增大，眼图闭合。图 7 中展示了眼图随温度的变化，低温到高温眼图有逐渐闭合的趋势。如何做到短距模式下 Houdini IP 的全温稳定，建议步骤为通过高温长跑确定可以接受的最小 TX Swing，然后用该最小 TX Swing 进行低温验证，以实现短距模式下的全温稳定。

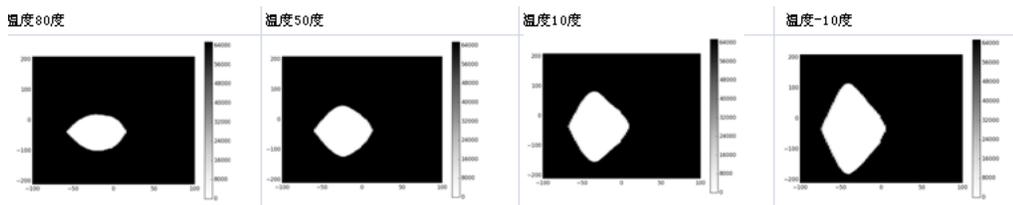


Figure 7. 眼图随温度的变化

5 其他

其他几点应用技巧简述如下：

时钟相关：

AFE768X 支持最高 491.52MHz 的 PFD，采用高的 PFD 的优点在于优化相位噪声的同时，也可以改善相位的温度稳定性。

AFE768X 通过调节 charge pump 的电流可以在一定范围内改善积分相噪，CP 电流越大，LPF 带宽越宽，积分相噪越好，所对应的空口 EVM 指标也会越好。

AFE768X 还提供了外供采样钟模式，在对相噪要求较高的项目中，可以直接提供 9GHz/6GHz 的采样钟给 RFDAC 和 RFADC，以期获得优于内置 VCO 的相噪性能。

AFE768X 为在 Massive MIMO FDD 4T4R 模式下外置的反馈链路提供发射同源时钟输出，CLKOUT 可以输出 3GHz 的发射分频时钟，采用发射同频时钟可以在 DPD 环路中抵消发射和反馈相位噪声，优化 DPD 性能。

初始化相关：

在 TDD 模式下初始化芯片时，务必使发射使能(TXTDD 管脚拉高)，否则 TX DSA 可能无法初始化成功，存在随机失效的可能。

6 参考文献

1. SN150568x_DM_slase83_final

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。您就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默认的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司