

基于 TI 射频采样 ADC(ADC32RF80)的 RX 链路设计

摘 要

真正实现软件无线电的射频采样 AD/DA 技术已经成熟，TI 推出的高性能大带宽双通道射频直接采样芯片 ADC（ADC32RF80）已经成功运用到无线产品 RRU 中。本文详细介绍了基于射频 ADC 的 RX 链路架构的设计，其中也重点讨论了频率规划和 RX 滤波器的设计。

Key words: 射频直接采样 ADC（RFADC）接收链路（RX）频率规划(Frequency planning)

目 录

1、引言	1
2 基于 RFADC 的 RX 链路架构	2
3 基于 RFADC 的 RX 链路指标分解	3
4 基于 RFADC 的 RX 链路设计中的频率规划	4
5 结论	7
6 参考文献	7

图

Figure 1 基于 RFADC 的 RX 的链路架构	2
Figure 2 TI RFADC32RF80 架构图	2
Figure 3 RX 链路中噪声分类示意图	3
Figure 4 RX 链路模型	4
Figure 5 RX 链路总噪声系数的计算	4
Figure 6 RX 频率规划工具中的输入参数	6
Figure 7 RFADC 频率规划工具的输出结果	6
Figure 8 基于 RFADC 的 RX 链路中滤波器的设计	7

1、引言

模/数转换器（ADC）是无线产品中的核心器件，它的架构和性能对无线产品如 RRU 中 RX 链路的架构和性能有着决定性的影响。传统 RX 链路中使用的是中频采样的 ADC（IF ADC），例如 TI 的四通道高性能低功耗的 ADS58J63，其输入的频点只能在几百兆左右，所以决定了大家熟知的 LO+ mixer+ IF filter + IFADC 的架构。随着技

术的发展，当前射频信号直接采样的 ADC 已经成熟并能支持商用，例如 TI 的高性能的两通道 ADC32RF80，其支持射频直接采样。随着射频采样 ADC 的使用，RX 链路的架构随之改变，省去了 mixer +LO +IF filter + IF DVGA，缩短了 RX 链路长度，同时也能支持更大带宽，所以 RFADC 将成为主流的无线解决方案。

RFADC 的使用导致了 RX 链路架构的颠覆性改变，使得链路预算方法对比传统中频方法也必将发生改变。本文将对 RFADC 的典型架构进行介绍，同时会给出基于 RFADC 的链路设计的设计方法，其中会重点介绍频率规划以及 RX 的滤波器的设计。

2 基于 RFADC 的 RX 链路架构

基于 RFADC 的 RX 链路如下图所示，从图中可以看出对比传统的中频采样架构，省去了 mixer +IF DVGA+ IF Filter，链路得到了简化。

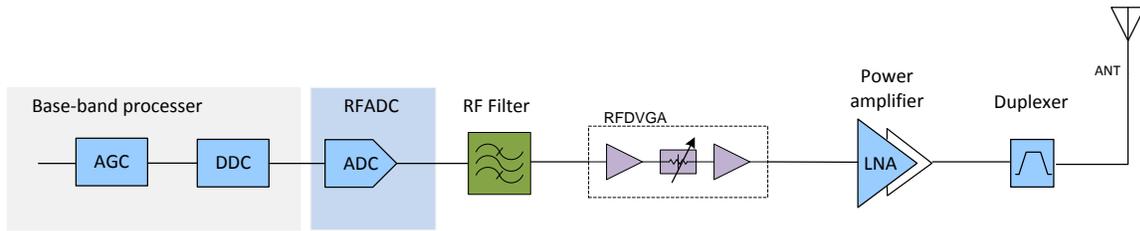


Figure 1 基于 RFADC 的 RX 的链路架构

RFADC 的引入不仅仅改变了 RX 的链路的架构，同时其功能也远远比 IF ADC 的功能强大，这里介绍一下 RFADC 的典型架构/功能更。

参考如下图为 TI 的 ADC32RF80 架构，其典型特点主要有如下几个方面：

- 单通道可以支持多频段直接采样。
- 支持多个频段共用同一个通道进行 DPD 反馈复用，每个频段可以通过外部 GPIO 管脚切换内部的 NCO 值来完成不同频段分时采样。
- 同时支持实采样和复采样输出，每个通道输出接口最高可以支持 737.28M 复输出。
- 每个通道支持 4 条 10G lane。
- ADC 的底噪在小信号下可以达到 -154dBFs/Hz。

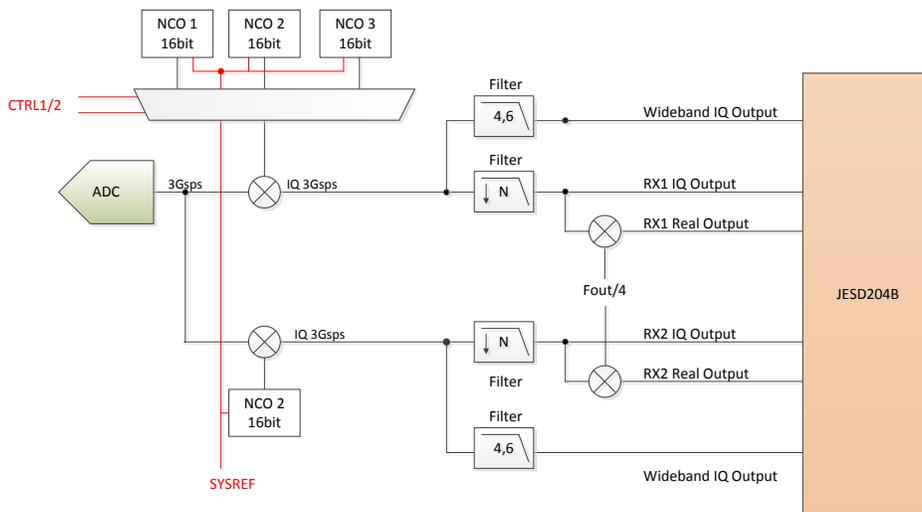


Figure 2 TI RFADC32RF80 架构图

3 基于 RFADC 的 RX 链路指标分解

3.1 RX 空口指标说明

RX 的空口指标归纳起来主要有两大类：

- 小信号情况下：链路的底噪，主要用噪声系数 NF 来衡量。
- 在阻塞情况下：链路的底噪声+链路的 SFDR。

无论是何种架构，我们都可以将链路指标的分解逻辑抽象为“基于空口的灵敏度要求去分解对各种器件的要求”。

3.2 RX 链路中噪声分类

无论何种架构，都可以将噪声分为两大类：均匀噪声和非均匀噪声。

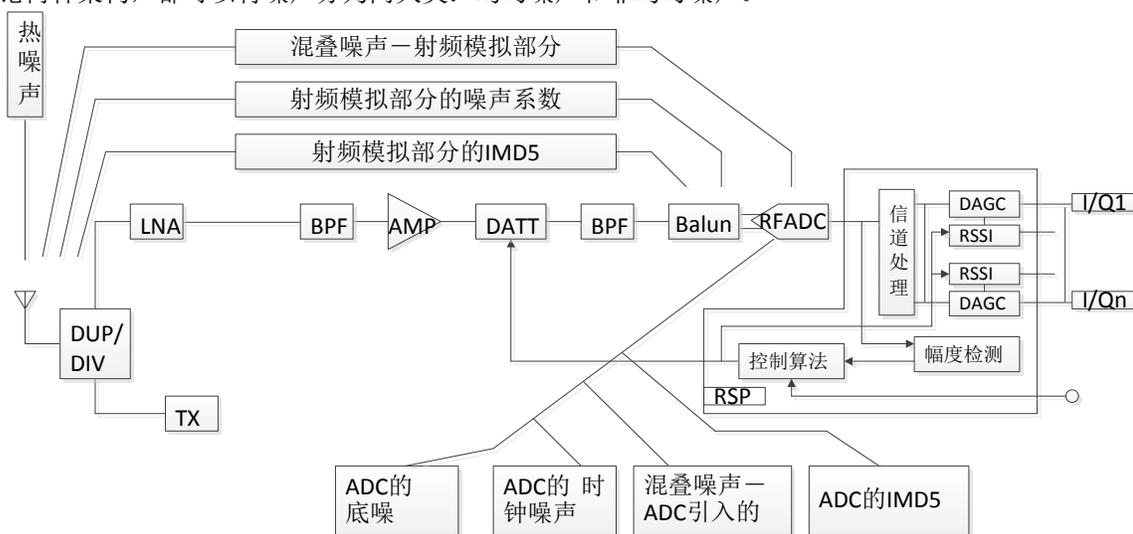


Figure 3 RX 链路中噪声分类示意图

参考上图 RX 链路中各类噪声(impairments)可以归纳为：

1. 均匀噪声（其功率谱密度分布符合高斯曲线）：
 - Noise floor：来自各种器件的热噪声，用噪声系数 NF 来衡量。
2. 非均匀噪声：
 - IMD：来自 RX 链路器件的非线性。
 - HDn：这里主要是指来自 ADC 中的谐波，下面会详细叙述对这类噪声的抑制即滤波器的设计，统一用链路的信号带宽内无杂散动态范围 SFDR 来衡量。
 - 时钟相位噪声：在阻塞情况下时钟的相位噪声通过 RFADC 采样后落入到信号带内。

3.3 小信号下计算 RX 前级增益

基于 RF ADC 的 RX 链路模型可以抽取为如下图所示两级架构。

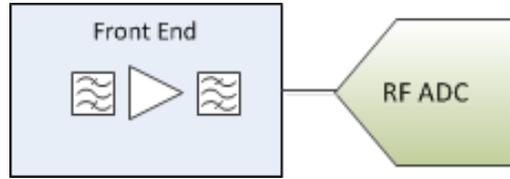


Figure 4 RX 链路模型

基于上述两级模型，只需要测试出小信号 (<-15dBfs) 情况下 RFADC 噪声系数 NF2，以及整个链路的噪声系数 NF，就可以采用传统链路的噪声级联公式来确定出前级的增益。

RX 整个链路的噪声，我们可以采样传统如下公式和步骤去计算，公式中 S 是天线口要求的灵敏度，B 是信号的带宽，Kpg 是处理增益，Eb/N0 是基带要求的信噪比，NFtotal 是要计算的链路总的噪声系数。下面的步骤给出了一个已知了系统灵敏度，解调门限 Eb/N0，处理增益和信号带宽的情况下，计算整个链路的噪声系数 NF 的过程。

$$S = -174dBm + 10 \lg B + NF_{total} - K_{pg} + (E_b / N_o)_{threshold}$$

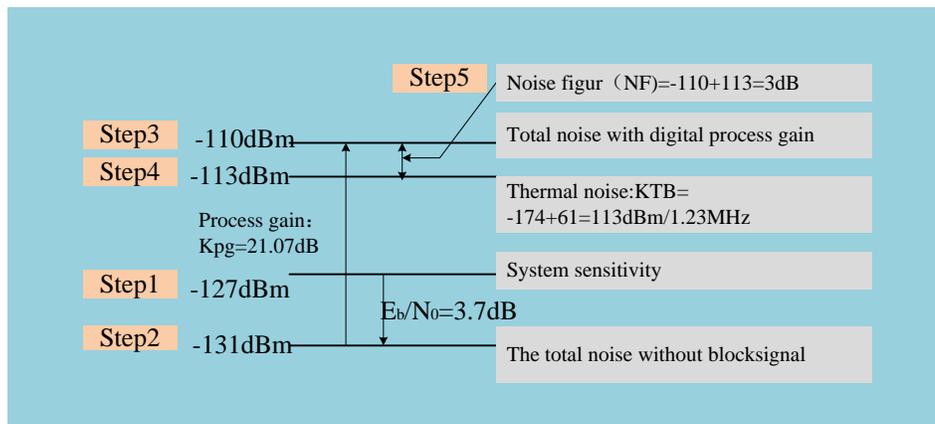


Figure 5 RX 链路总噪声系数的计算

3.4 阻塞情况下 SFDR 设计

阻塞情况下即大信号情况下，整个链路的非线性 IMD, HDn 以及时钟的相位噪声都会对总噪声系数有贡献。按照天线口阻塞和灵敏读信号大小，可以得到 SFDR 的要求。例如 TDD 中最大的带内阻塞为 -25dBm，灵敏度为 -93dBm，这样扣除热噪，时钟的相位噪声导致的倒易混频(强干扰时,由于本振相噪与干扰信号在器件的非线性作用下产生差频,落到中频带内覆盖有用中频信号,使输出噪声增加,信噪比下降,这种现象称为倒易混频)以及链路总的 IMD 影响，可以得到对其它噪声的 SFDR 要求在 75dBc。这里的其它噪声主要是指 ADC 的谐波类杂散 HDn 和交织杂散 interleaving spur (IL)。对于这类杂散，只能通过频率的规划和 RX 链路的滤波器设计（双工器）来满足要求。

所以，频率规划是基于 RFADC 设计 RX 链路的核心。所以下面将单独用一个章节来介绍频率规划。

4 基于 RFADC 的 RX 链路设计中的频率规划

频率规划其目的就是通过选择合适的采样率来避免两类噪声落入到信号的带内：

- 第一类：信号自身的非线性产物，这里主要是指 HD2/3 和交织杂散 IL。
- 第二类：阻塞的非线性产物落入到信号带内或者信号的混叠带内。阻塞的非线性也主要是指阻塞的 HD2/3 和交织杂散。

RX 链路频率规划的原理描述如下：

- 输入参数:
 - 信号的位置。一般是 3Gpp 里面某一个 band 的开始和结束点，例如 TDD 里面的 band F，为 1880M~1920M。
 - 阻塞的位置。一般是 3GPP 中规定的从 0~4G 的频率范围内扫描。
- 采用的算法:
 - 利用信号的位置，结合采样率，计算出在各个 Nyquist 域内信号的混叠带位置。注意，任何落入信号 Nyquist 混叠带内的噪声都将完全和信号重合。
 - 利用信号的位置计算出其 HD2/HD3 和交织杂散的位置。然后按照 ADC 采样特性，计算出 HD2/HD3 和交织杂散在第一个 Nyquist 的位置（4G 无线运用中最高频率一般计算到 4G）。
 - 利用信号在各个 Nyquist 的混叠带位置，反推出在 0~4G 范围内，那些位置的 HD2/3 和交织杂散会和信号的混叠带重合，从而结合这些位置的阻塞大小，RFADC 的 HD2/3 和 IL 的性能，以及 SFDR 指标的要求计算出对 RX 链路滤波器（双工器+SAW）的要求。
 - 如果信号的 HD2/3 在第一个 Nyquist 位置落入到信号带宽内，则此采样率判定失效，继续搜索新的采样率。
 - 如果采样率导致 RX 链路的滤波器很难实现，则此采样率判定失效，继续搜索新的采样率。
- 输出参数:
 - 采样速率。

实际中由于常用的采样率有限，往往会反向设计，先定一个常用的采样率，来反推出这个采样率是否适合所选的场景。

TI 具有非常丰富的频率规划工具提供给客户使用。下面将结合 ADC32RF80 的实例来详细说明 RX 链路中频率的规划：

1. 输入参数:

- ADC 的类型。工具中罗列了所有 TI 的 ADC 器件，当选择完成器件后工具会自动给出对应该器件特性例如采样率，性能指标等。
- 所要支持的频段和频段的个数。
- 输入 SFDR 的要求，例如 TDD 中为 75dBc。

User Input			Input frequency		
			Band 1	Band 2	Band 3
Select RF ADC	ADC32RF80		d chm		
Sampling Rate	2457.6	Msps			
Max Sampling Rate	3072	Msps			
Interleave	4	x			
Out of Band SFDR Limit	75	dB	Band	RX min	RX max
			#1	2575	2635
			#2	0.000001	0.000001
			#3	0.000001	0.000001
HD2		55 dB			
HD3		60 dB			
Non HD23		85 dB			
FS/2		65 dB			
FS/4		65 dB			

Figure 6 RX 频率规划工具中的输入参数

2. 频率工具输出信号&杂散的位置

如下图所示，横坐标表示的是第一个 Nyquist 的频率，纵坐标表示杂散的类型。蓝色表示信号带宽，其它的都表示杂散。在纵坐标标注 2 以下的为交织杂散，2 以上的是标注的是 HDn，例如红色为 HD2，绿色的为 HD3。对于 RFADC 重点需要规划掉 HD2/3，不能落入到信号带内。从下图可以看到，HD2/3 都没有落入到信号带宽内，所以所选的采样率满足要求。

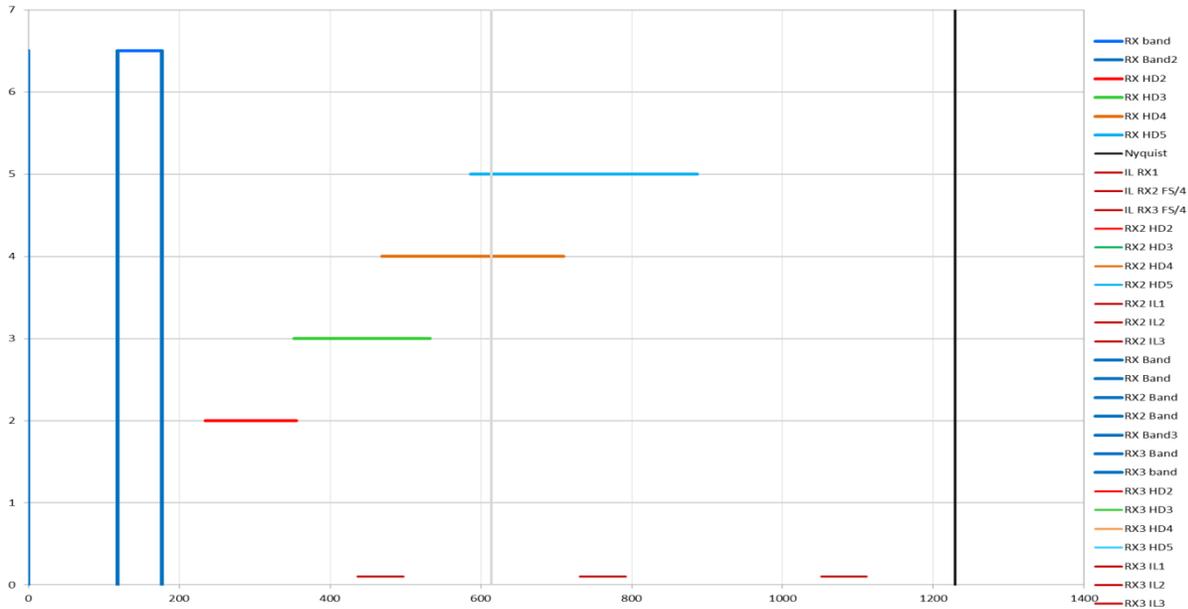


Figure 7 RFADC 频率规划工具的输出结果

3. 输出 RX 链路滤波器的要求（以单 band1 为例）

下图中纵坐标是输出对 RX 链路滤波器（双工器+SAW）的抑制要求，横坐标是频率。第一步中我们将对 SFDR 的要求设置为 75dBc，参考下图中最高的抑制要求即为 75dBc。图中红色部分是信号的位置其落入到第三 Nyquist 中，其混叠带在第一和第二 Nyquist 中位置抑制要求为 75dBc，任何阻塞落入到这个位置中将无损耗的和信号重合，所以其抑制要求最高。

其它地方是对阻塞的抑制要求，如果阻塞落入该位置，那么其非线性会落入到信号的混叠带内。这些位置的抑制要求需要结合 ADC 的性能来决定，例如其 HD2 的性能是 55dBc，总要求是 75dBc，那么滤波器对该位置预制就是 20dBc，如图中所示，而且 HD2 位置的带宽是信号带宽的一半，HD3 的带宽是信号带宽的 1/3，以此类推。交织杂散的带宽和信号的带宽相等。

采样 RFADC 的链路，对比传统的中频 ADC，其混叠带的位置较远，所以，在一定程度上降低了对 RX 滤波器的要求，一般而言，目前用于中频 ADC 架构中的滤波器都能满足要求。

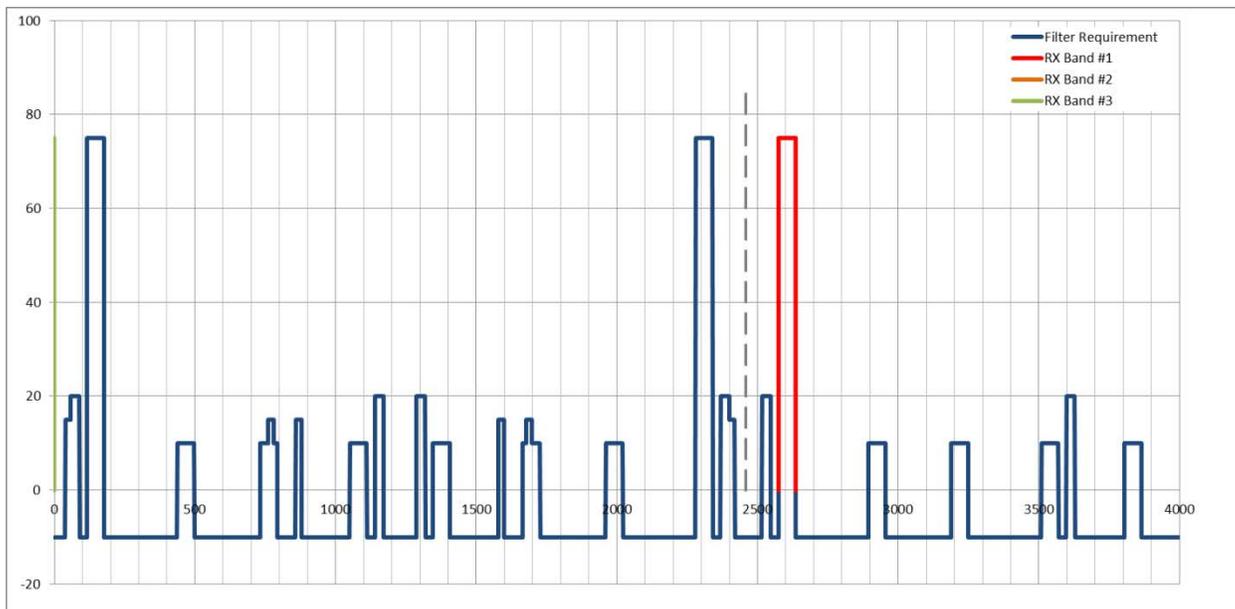


Figure 8 基于 RFADC 的 RX 链路中滤波器的设计

5 结论

本文介绍了基于射频采样 RFADC 的 RX 链路架构及其噪声分类。按照不同的杂散分别对 RX 链路的增益，滤波器提出了要求。一个是均匀噪声即热噪声，该类噪声对灵敏度的影响决定对前级链路增益的设计，另外一个是非均匀噪声即谐波 HD_n，交织杂散，该类杂散会对链路的 SFDR 的有影响，需要设计 RX 链路滤波器来预制该类杂散。最后介绍了利用频率规划工具来完成滤波器的设计。

6 参考文献

数据手册 ADC32RF4x rev 0p2 ， 2016 年 4 月份修改， Texas Instruments Inc.

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated