

# 传感器信号调节器的两步校准

作者: Arun T Vemuri

系统设计师

Javier Valle-Mayorga

应用工程师, 增强型工业产品

## 引言

如今, 面向传感器信号调节的混合信号集成电路 (IC) 在诸如压力、温度和位置监测的传感器应用中得到了广泛的使用。在此类信号调节器中, 对来自感测元件的输出信号的调节是利用混合信号电路来完成的, 这种电路是模拟电路与数字电路的组合。而且, 感测元件信号的实际调节是在数字域中执行的。经过调节的信号是传感器信号调节器的输出。传感器输出以模拟或数字的形式传输至控制或监测系统。如果采用的是模拟形式的传输, 则处理后的数字信号必须转换回模拟形式。

本文考察了在以模拟形式传输数据的信号调节器中执行的传感器信号调节算法的校准。请注意, 传感器校准包括了感测元件非理想效应和信号调节器非理想效应, 例如: 失调和增益误差。校准方案将处理位于数字电路前面和后面的模拟电路的模拟信号链路误差。

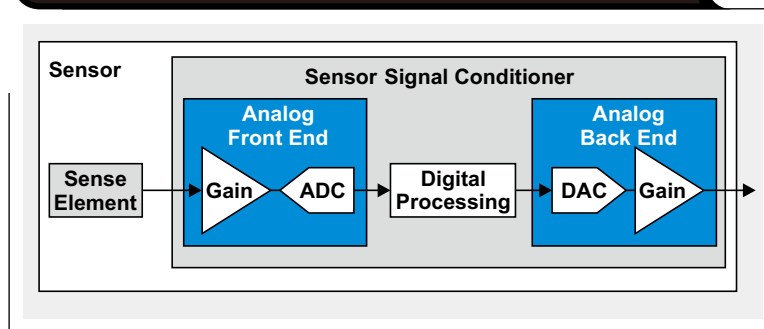
## 传感器信号调节器

感测元件的电输出在数值上通常很小, 而且存在非理想效应, 比如: 失调、灵敏度误差和非线性。这些非理想效应会在测量中引起误差。传感器信号调节器用于最大限度地抑制这些非理想效应。由德州仪器提供的 PGA400-Q1 便是此类调节器的一个实例。

## 混合信号调节器

图 1 示出了一款具有模拟输出的混合信号调节器的方框图。混合信号调节器运用了前端模拟电路与一个感测元件相连。由于感测元件的输出往往非常小, 因此前端由一个增益级和一个跟随其后的模数转换器 (ADC) 组成。该 ADC 用于对感测元件的输出进行数字化, 这意味着可以采用灵活的数字信号处理方法来调节感测元件信号。增益级可以由单端差分放大器或仪表放大器构成, 这取决于感测元件的引出脚配置。

图 1: 混合信号调节器的方框图



在来自前端的数据由数字电路调节之后, 其被送至后端以传输至一个控制或监测系统。该已调节信号的传输可以采用模拟或数字形式。如欲以模拟形式传输经过调节的数字信号, 则采用一个具有缓冲器或增益级的数模转换器 (DAC) 将数字值转换为模拟形式。同样, PGA400-Q1 是此类信号调节器的一个例子。

## 模拟信号链路中的误差

感测元件输出通常是一个具有非常低范围的信号; 换句话说, 其输出信号的范围很小。由于这个原因, 感测元件输出的调节从一个增益级开始。所以, 感测元件输出容易遭受不同放大器误差源的影响, 例如: 输入失调、增益和非线性误差。除了这些误差之外, 感测元件本身也存在着固有的失调和非线性误差。

本文中所讨论的信号调节器还具有模拟输出, 其一般是由一个 DAC 和一个位于该 DAC 之后的增益级产生的。这意味着经过调节的信号也容易受到放大器误差的影响, 比如: 模拟输出级中的输入失调、增益和非线性误差。传感器调节器中的这些误差是由于 IC 内部的器件与组件之间的失配而引起的。此类误差有可能变得更加严重, 这要看给感测元件输出信号或已调节的输出信号 (在传输至控制或监测系统之前) 施加了多大的增益。

请注意，来自感测元件的信号具有非理想效应。于是，在传感器制造期间针对这些非理想效应进行了感测元件输出的校正，常常是借助信号调节器来完成这一工作。正是在此校准过程中需将模拟信号链路中的误差纳入考虑的范畴。

图 2 示出了未经校准的传感器信号调节器和经过校准的传感器调节器的期望输出（相对于感测元件输入信号）示例。请注意，未经校准的输出在信号调节器信号流中包括了感测元件和模拟电路的非理想效应。

### 两步校准过程

两步校准过程包括：

1. 后端模拟电路误差的校准

此校准负责对由数字电路进行调节并转换回模拟形式之后引入到信号中的误差进行校正。

2. 前端模拟电路误差的校准

此校准负责对数字化处理之前从感测元件引入到信号中的输入失调、增益和非线性误差实施校正。

图 3 示出了传感器调节器内部与该两步校准过程有关的部分。

校准过程的次序至关重要，因为后端模拟电路的校准提供了感测元件和前端模拟电路的校准所需的“期望”输出值。

### 后端模拟电路校准

后端和前端模拟电路的校准目的几乎是一样的，即：减少由模拟信号链路非理想效应所引起的误差，并由此改善传感器输出的准确度。然而，用于校准后端电路的数据点来自于传感器调节器的内部，而不是感测元件。

为了真正地校准后端电路，必须把 DAC 和其余的输出模拟电路与数字信号调节电路隔离开来。外部校准电路随后直接对 DAC 进行写操作并测量后端模拟电路的输出（信号调节器的输出引脚）。采用标准的曲线拟合算法对数据实施曲线拟合处理。该曲线用于确定感测元件输出校准中所需的 DAC 值。需注意的是，该校准所需的数据点的数量取决于后端模拟电路中存在的非理想效应。由于数据点受控于用户而不是感测元件，因此校准常常是仅采用少量数据点进行的。此外，如果后端模拟电路的运行方式随温度而改变，则必须在不同的温度条件下重复此校准过程。

一旦确定了后端模拟电路的转换函数和期望的 DAC 代码，则可在针对前端校准的计算中使用这些 DAC 代码。

图 2：经校准的传感器的理想输出与来自感测元件的信号的比较

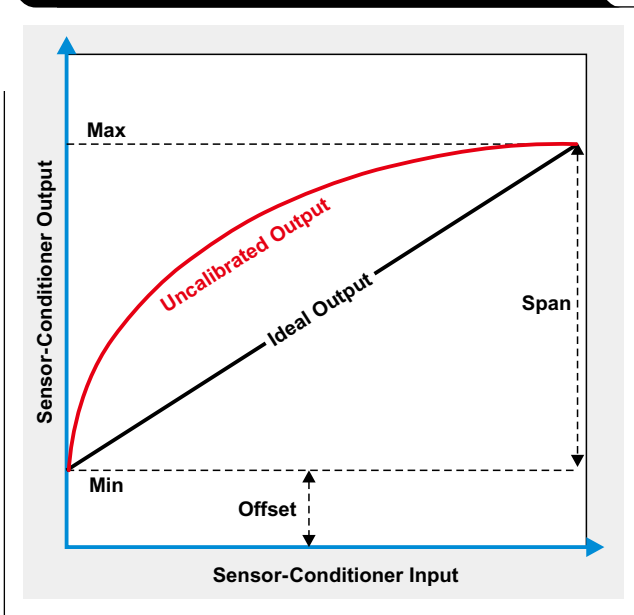
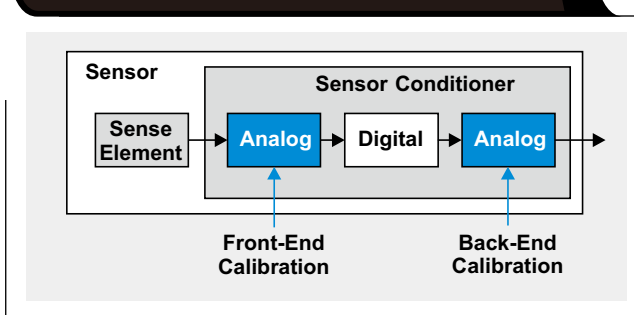


图 3：传感器校准要求前端和后端曲线拟合



### 前端校准

前端校准在很大程度上取决于感测元件的输出信号线性。而且，由于传感器的校准是由制造商完成的，因此时间和成本也是驱动因素。如前文所述，可以依据期望的传感器准确度实施不同的方法。

一般来说，当感测元件由与应用相关的特定刺激因素（比如：压力和温度）激励时，传感器调节器采用数学算法来校准传感器输出。测量的次数取决于传感器调节器处理数据的能力，以及完成传感器校准所需的时间。例如：可通过在三个输入信号点上测量 ADC 的输出来校准一个压力传感器的前端。标准的曲线拟合方法可用于确定从 ADC 输出至 DAC 输入的期望转移函数。（接下页）

（续上页）这是采用在后端电路的校准期间计算的 ADC 数据和 DAC 代码来实现的。然而，在三种不同的温度条件下可以取相同的三个压力点。这将产生总共 9 个测量结果 — 三种温度条件下的三个压力值。于是，用于传感器调节器输出的最终数学表达式是一个二次方程：（续

$$\text{Output} = \left( h_0 + h_1 T + h_2 T^2 \right) + \left( g_0 + g_1 T + g_2 T^2 \right) P + \left( n_0 + n_1 T + n_2 T^2 \right) P^2 \quad (1)$$

式中的  $h_0$ 、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $g_0$ 、 $g_1$ 、 $g_2$ 、 $n_0$ 、 $n_1$  和  $n_2$  是用于使感测元件的输出与传感器调节器的期望输出相匹配的系数。由于后端电路结果被用于计算这些系数，因此必须首先完成后端校准。

不难推断，相比于只在一种温度条件下进行所有的三个压力测量 (3P:1T)，在三种不同的温度下实施三个不同的压力测量 (3P:3T) 将会更加耗时和复杂。不过，采用 3P:3T 法可获得比 3P:1T 法更高的准确度。视应用和传感器调节器功能的不同，可以组合的方式来运用这两种方法，例如：在两种温度条件下进行两个压力测量 (2P:2T) 或在四种温度下实施四个压力测量 (4P:4T)。

## 结论

在具有模拟输出的混合信号传感器调节器中可以采用一种两步校准过程。一般而言，该过程可通过减轻模拟信号链路中的误差达到改善传感器准确度的目的。

## 相关网站

汽车解决方案：

[www.ti.com/automotive](http://www.ti.com/automotive)

产品信息：

[www.ti.com/PGA400-Q1](http://www.ti.com/PGA400-Q1)

[www.ti.com/PGA300](http://www.ti.com/PGA300)

订阅 AAJ：

[www.ti.com/subscribe-aaaj](http://www.ti.com/subscribe-aaaj)

TI Designs 参考设计库提供完整的设计方案，由资深工程师团队精心创建，支持汽车、工业、医疗、消费等广泛应用的设计。在这里，您能找到包括原理图、物料清单、设计文件及测试报告的全面设计方案。登陆TI Designs，找寻更多适合您的参考设计！简单设计，从TI起步。

马上登录 [ti.com.cn/tidesigns](http://ti.com.cn/tidesigns) 查询最适合您的设计文档。



**WEBENCH**  
Design Center



WEBENCH® 设计中心: 易于使用且可提供定制结果的设计工具。  
PowerLab™ 参考设计库, 包含了近千个适用于所有应用的参考设计。  
电源在线培训课程

[www.ti.com.cn/webench](http://www.ti.com.cn/webench)  
[www.ti.com.cn/powerlab](http://www.ti.com.cn/powerlab)  
[www.ti.com.cn/powertraining](http://www.ti.com.cn/powertraining)

**WEBENCH® Designer** My Designs

Clocks	Filters	传感器
电源	FPGA/μP	LED

输入您的供电要求:

直流  交流

最小                      最大

输入电压    14.0 V                      22.0 V

输出                      3.3 V                      2.0 A

环境温度                      30 °C

多负载                      单输出

**Power Architect**                      **开始设计**

**WEBENCH® Designer** My Designs

最小                      最大

输入电压    14.0 V                      22.0 V

输出                      3.3 V                      2.0 A

环境温度                      30 °C

**SIMPLE SWITCHER®**

**开始设计** ▶

德州仪器在线技术支持社区

[www.deyisupport.com](http://www.deyisupport.com)

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



[weibo.com/tisemi](http://weibo.com/tisemi)

## 热门产品

DAC8760	用于 4-20mA 电流回路应用的单通道、16 位、可编程电流/电压输出 DAC
DAC7760	单通道、12 位可编程电流输出和电压输出 DAC
ADS1247	极低噪声、精密 24 位 模数转换器
ADS1120	具有串行外设接口的低功耗、低噪声、16 位 ADC
ISO7242	四通道 2/2 25Mbps 数字隔离器
ISO7631FM	4kV <sub>PK</sub> 低功耗三通道、150Mbps 数字隔离器
TPS54062	4.7V 至 60V 输入、50mA 同步降压转换器
TLK105L	工业温度、单端口 10/100Mbps 以太网物理层
SN65HVD255	CAN 收发器具有快速循环次数, 可用于高度已加载网络

了解更多, 请搜索以下产品型号:

DAC8760



## 重要声明

德州仪器及其下属子公司 (TI) 有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的半导体产品和服务进行修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准终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, 并验证这些信息是最新且完整的。所有半导体产品 (本文也指“组件”) 的销售都遵循在确认订单时 TI 的销售条款与条件。

TI 确保其销售的组件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。TI 仅在认为有必要时才采用测试或其它质量控制技术。除非相关法律有强制规定, 否则 TI 没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 没有义务承担应用帮助或客户产品设计。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, 客户应提供充足的设计与操作安全保障措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或使用了 TI 组件或服务的任何产品组合、机器或流程相关的其他 TI 知识产权中授予的直接或隐含权限做出任何担保或解释。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、担保或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其他知识产权方面的许可, 或 TI 的专利权以及 TI 其他知识产权的许可。

如需复制 TI 产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 不得对内容进行任何篡改, 且须带有相关授权、条件、限制和声明。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遵从其他限制条件。

经销 TI 组件或服务时, 如果经销商对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数之间存在差异或存在虚假成分, 则相关 TI 组件或服务的所有明示或暗含的保修将作废, 且此行为被视为不正当的欺诈性商业行为。TI 不对任何此类虚假陈述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可能仍由 TI 提供, 但其将自行负责符合与其产品及其在其应用中使用 TI 组件相关的所有法律、法规和安全方面的要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的所有专业技术和知识, 可预见故障的危险、监测故障及其后果、降低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攸关的应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些情况下, TI 可能进行特别促销推进安全应用的发展。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相关功能安全标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然受这些条款约束。

TI 组件未获得用于 FDA 三级 (或类似生命攸关的医疗设备) 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 组件才是专门设计用于军事/航空应用或环境的产品。客户认可并同意, 如将不带有该标识的 TI 组件用于军事或航空航天应用, 则风险由客户自行承担, 客户自行负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 特别标示了符合 ISO/TS16949 要求的特定组件, 这类组件主要用于汽车。在任何情况下, TI 均不因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 的要求而承担任何责任。

### 产品

音频	<a href="http://www.ti.com/audio">www.ti.com/audio</a>
放大器	<a href="http://amplifier.ti.com">amplifier.ti.com</a>
数据转换器	<a href="http://dataconverter.ti.com">dataconverter.ti.com</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>
DSP	<a href="http://dsp.ti.com">dsp.ti.com</a>
时钟与定时器	<a href="http://www.ti.com/clocks">www.ti.com/clocks</a>
接口	<a href="http://interface.ti.com">interface.ti.com</a>
逻辑	<a href="http://logic.ti.com">logic.ti.com</a>
电源管理	<a href="http://power.ti.com">power.ti.com</a>
微控制器	<a href="http://microcontroller.ti.com">microcontroller.ti.com</a>
RFID	<a href="http://www.ti-rfid.com">www.ti-rfid.com</a>
OMAP 应用处理器	<a href="http://www.ti.com/omap">www.ti.com/omap</a>
无线连接	<a href="http://www.ti.com/wirelessconnectivity">www.ti.com/wirelessconnectivity</a>

### 应用

汽车与运输	<a href="http://www.ti.com/automotive">www.ti.com/automotive</a>
通信与电信	<a href="http://www.ti.com/communications">www.ti.com/communications</a>
计算机及外设	<a href="http://www.ti.com/computers">www.ti.com/computers</a>
消费电子	<a href="http://www.ti.com/consumer-apps">www.ti.com/consumer-apps</a>
能源和照明	<a href="http://www.ti.com/energy">www.ti.com/energy</a>
工业控制	<a href="http://www.ti.com/industrial">www.ti.com/industrial</a>
医疗	<a href="http://www.ti.com/medical">www.ti.com/medical</a>
安防	<a href="http://www.ti.com/security">www.ti.com/security</a>
空间、航空和国防	<a href="http://www.ti.com/space-avionics-defense">www.ti.com/space-avionics-defense</a>
视频和影像	<a href="http://www.ti.com/video">www.ti.com/video</a>
TI E2E 社区	<a href="http://e2e.ti.com">e2e.ti.com</a>

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

© 2014 年德州仪器公司版权所有

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

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2015, Texas Instruments Incorporated