

## 摘要

多个 AWR2243 雷达器件可以级联在一起来实现更大的天线阵列传感器。在此类系统中，负责控制和校准各器件中模拟部分的固件例程必须协同工作，以确保具有良好的角度精度性能。本应用手册提供了一些建议来帮助改进级联系统在时间、温度及其天线范围内的一致性，并说明了如何利用传感器上的主机处理器来更好地控制 AWR 器件。建议的程序还可用于需要雷达返回信号的绝对相位在雷达帧范围内保持稳定而没有突变的高级单芯片应用。本应用手册还提供了关于 TX 移相器校准的建议，这些建议适用于单芯片以及级联使用，并且与 AWR1843 和 AWR2243 相关。

## 内容

<b>1 引言</b> .....	3
1.1 背景 - 简单的单芯片应用.....	3
<b>2 级联不一致性来源及缓解策略</b> .....	4
2.1 PCB 布线不平衡与器件工艺.....	4
2.2 温度漂移.....	4
2.3 安排运行时校准.....	4
<b>3 实现级联一致性和改进的相位性能</b> .....	5
3.1 简要总结.....	5
3.2 保存客户工厂的 RF INIT 校准结果.....	5
3.3 客户工厂处基于角反射器的失调测量.....	7
3.4 现场恢复工厂校准结果.....	10
3.5 基于主机的现场温度校准.....	11
<b>4 概念展示</b> .....	18
<b>5 其他 ( 干扰、增益变化、采样抖动 )</b> .....	20
5.1 处理现场干扰.....	20
5.2 关于 TX 功率和 RX 增益漂移与温度间关系的信息.....	20
5.3 线性调频脉冲开始与 ADC 采样开始之间的抖动.....	21
<b>6 结论</b> .....	22
<b>A 附录</b> .....	23
A.1 术语.....	23
A.2 参考文献.....	23
A.3 级联一致性拟议方案的流程图.....	23
A.4 用于降低 TX 移相器温漂的 LUT.....	29
A.5 TX 移相器校准数据保存和恢复 API 的循环移位.....	34

## 插图清单

图 3-1. 25°C 时 AWR2243 标称器件信息的移相器 INL 图：(a) 使用内部 RF INIT 移相器校准时 (b) 使用基于外部波导来回的测量值时.....	7
图 3-2. AWR2243 运行时校准温度指数强制时序图.....	12
图 3-3. AWR1843 的 TX 相移误差温度校正 1.....	14
图 3-4. AWR2243 的 TX 相移误差温度校正 1.....	14
图 3-5. AWR2243 中的 TX 移相器精度 1, 2.....	15
图 3-6. 校准过程中测得的原始 PS INL，以及对校准测量期间相位变化温漂的线性补偿图示.....	16
图 3-7. 25°C 时不同移相器设置下的振幅变化 1.....	16
图 4-1. 在器件中执行独立自主周期性运行时校准时的绝对相位变化.....	18
图 4-2. 外部触发校准更新时的绝对相位变化 1.....	19
图 4-3. 外部触发校准更新时的绝对相位变化 1.....	19

图 A-1. 客户工厂校准：保存 ( 处理 ) RF INIT 校准结果.....	24
图 A-2. 在客户工厂测量不同偏置设置下的通道间不平衡.....	25
图 A-3. 在客户工厂测量 TX 移相器误差.....	25
图 A-4. 现场操作：将工厂中得到的 RF INIT 校准结果恢复到器件上.....	26
图 A-5. 现场操作：处理涉及通道间不平衡的温度转换 - 第 1 代器件.....	27
图 A-6. 现场操作：处理涉及通道间不平衡的温度转换 - AWR2243.....	28
图 A-7. 现场操作：处理温度对 TX 移相器误差的影响.....	29

## 表格清单

表 3-1. 示例 ( 器件 ) 温度范围和 TX/RX 增益代码.....	8
表 3-2. 双芯片级联中通道间不平衡的示例结构.....	9
表 3-3. TX 移相器误差工厂校准的示例线性调频脉冲配置.....	10
表 5-1. TX 功率与器件温度间的关系 ( 用于获取温度范围内的相对“漂移” ).....	20
表 5-2. 各种温度条件下不同设置的 RX 增益.....	21
表 A-1. 术语.....	23
表 A-2. AWR1843 的 TX 相移校准温度校正 LUT.....	29
表 A-3. 25°C 条件下 AWR2243 的工厂测量相移数组.....	31
表 A-4. AWR2243 的 TX 相移校准温度校正 LUT.....	32
表 A-5. TX2 和 TX3 相移校准数据保存/恢复 API 的循环移位.....	34
表 A-6. TX1 相移校准数据保存/恢复 API 的循环移位.....	34

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

第 1 代 ( AWR1243、AWR1843、AWR1642 和 AWR1443 ) 和第 2 代 ( AWR2243 ) 雷达器件具有自校准功能，可降低工艺和温度对模拟性能的影响。校准包括用于降低制造工艺差异影响的 **RF INIT** ( 即引导时间 ) 校准和用于降低温度影响的运行时校准。这些校准多数都涉及到根据内置温度传感器的温度读数来针对 **TX**、**RX** 和 **LO** 优化射频寄存器设置。在简单的单芯片使用环境中，由于每个器件内固有的通道匹配，这些自校准能够实现模拟性能稳定的目标，而不影响通道间不平衡。

不同器件之间存在制造工艺差异，并且多个器件上运行的自校准程序是相互独立的，因此在多器件级联传感器上保持通道间匹配会更加具有挑战性。本应用手册介绍了一些建议来帮助改进级联系统在时间和温度范围内的一致性，并说明了如何利用传感器上的主机处理器来更好地控制 **AWR** 器件。此外，建议的程序还可用于需要雷达返回信号的绝对相位在雷达帧范围内保持稳定而没有突变的高级单芯片应用。

另外，本应用手册中的建议还探讨了关于器件在容易受到干扰的环境中工作时如何避免损坏自校准结果这一主题。请注意，*自校准 TI 的毫米波雷达器件 (SPRACF4)* ( 适用于单芯片用例 ) 也简单介绍了相同的内容。最后，本应用手册还探讨了另一个重要主题，那就是 **TX** 移相器 ( **AWR1843** 和 **AWR2243** )。通过客户工厂校准以及现场校准可以提高这些器件的精度，本应用手册介绍了相关的建议。

### 1.1 背景 - 简单的单芯片应用

在无干扰的单芯片使用环境中，可以启用所有自校准功能，包括 **RF INIT** 校准和运行时校准。通常，主机预计会在下电上电开始时触发一次 **RF INIT** 校准。主机还会通过将器件配置为以可配置的周期 ( 例如每 **N** 帧一次，总计约为 1 秒 ) 自行触发校准更新，启用运行时校准。然后，器件会调度周期性自动校准并具有 10°C 迟滞，以避免不必要的连续再触发。另外，主机还可以在检测到显著的温度变化 ( 例如约 30°C ) 时，以显式方式触发运行时校准。

由于每个器件内固有的通道匹配，这些校准不会干扰任何通道间不平衡。但这种情况与级联系统和高级单芯片用法中的不同。关于级联使用环境，本应用手册就降低工艺和温度变化的影响而不干扰通道间不平衡提供了一些指导原则。本应用手册还提供了一些指导原则来帮助实现需要雷达返回信号的绝对相位一段时间内在雷达帧范围内保持稳定的高级单芯片用例。

另外，在典型汽车用例中，预计其他雷达会造成干扰，因此不建议在现场使用其中的一些校准，以免干扰损坏校准结果。本应用手册建议避免在现场运行那些容易受到干扰损坏的 **RF INIT** 或运行时校准。本应用手册推荐了一些适合无干扰客户工厂的校准程序 ( 每个器件一次 ) 和另一些适合现场操作的温度调整规程。

**TX** 移相器精度也可以通过类似的校准方法得到提高。这些在干扰和级联环境中是相关的。

## 2 级联不一致性来源及缓解策略

本节介绍了级联不一致性的可能来源，并简要概述了缓解策略。后面一节会进一步阐述解决问题的程序。

### 2.1 PCB 布线不平衡与器件工艺

在具有大型天线阵列的级联传感器中，80GHz TX 和 RX 线路以及 20GHz (FMCW Sync LO) 线路的 PCB 布线可能存在轻微的不平衡。不同器件的 TX、RX 和 20GHz LO 电路也会具有制造不确定性。这些都可能导致级联系统中各器件之间存在通道间不平衡。

客户通常会执行工厂校准来测量级联系统的通道间不平衡和 TX 相移误差，并将这些数据存储在非易失性存储器 (NVM) 中，以便在进行现场误差补偿时使用。现场操作期间器件的模拟配置（即射频寄存器设置）需要与工厂校准期间的配置保持一致，这样补偿才会生效。

由于测量噪声和不同执行之间的温度差异，RF INIT 校准会在每次执行时收敛到不同的模拟配置。因此，每次下电上电时现场触发 RF INIT 校准（在单芯片环境中）会导致器件的模拟配置变得与工厂校准期间的配置不同，从而导致基于工厂校准的补偿失效。作为避免此类情况发生的一种方法，TI 建议仅在客户工厂校准过程中触发每个 AWR 器件的 RF INIT 校准。相关结果可以存储在传感器上的非易失性存储器中，并在现场操作期间在每次上电时恢复到 AWR 器件上。

### 2.2 温度漂移

级联传感器的通道间不平衡可以顺利地随温度的变化而变化，因为 80GHz 和 20GHz PCB 布线延迟的温度系数存在不匹配。预计负责控制 AWR 器件的 DSP 或主机处理器会使用更高层的算法（例如使用现实对象方向的粗略估算来优化通道间不平衡估算）来考虑该问题的影响。由于不同器件的 TX、RX 和 LO 路径中存在制造差异，这也会导致类似的平滑不平衡漂移，这时可以使用相同的算法来降低该问题的影响。

### 2.3 安排运行时校准

在单芯片用例中，自校准/运行时校准会以 10°C 的温度区间重新配置模拟部分，从而降低温度带来的影响。如果级联系统中的器件可以单独进行校准（例如在自动周期性校准模式下），则各器件可以在不同的时间执行校准更新，具体取决于各器件的温度。由于每个器件的模拟重新配置会导致其相位响应发生变化，这些校准更新会导致级联系统的通道间不平衡突然发生变化（请参阅本应用手册后续几节中的图形）。这些校准更新还会导致雷达返回信号的绝对相位在一段时间内发生突变并损坏高级单芯片算法。

为了避免此类突变，TI 建议客户使用传感器的工厂校准程序（如后续几节中所述），并且在现场实时操作期间，主机处理器应使用某个温度指数更新序列来重新配置 AWR 器件，从而控制校准触发并针对处理中的预期相位突变提供补偿。

### 3 实现级联一致性和改进的相位性能

建议完成以下测量，以确保通道间不平衡会在不同时间、下电上电和温度条件下保持可预测性。首先介绍的是解决方案摘要，随后详细介绍了其中涉及各个步骤。

#### 备注

后续各节主要涉及通道间不平衡的话题，但各节都穿插介绍了与 TX 移相器精度改进相关的信息/程序。

#### 3.1 简要总结

1. 工艺差异：为了考虑到制造工艺差异，器件必须在客户工厂执行 RF INIT 自校准，但只能执行一次。环境温度（称为工厂校准温度）可能为 25°C 或预期现场温度范围的中间值。
2. 保存恢复：将 RF INIT 校准结果保存在非易失性存储器内并稍后在现场操作期间在每个 RF INIT 之前恢复到器件上。
3. 客户工厂的失调测量：客户工厂校准程序必须测量各种失调（例如通道间不平衡和相移非线性度）。这些失调必须存储在非易失性存储器中并在现场操作期间供 DSP 使用。
4. 多个前端设置：客户工厂校准程序必须使用 AWR 器件在多个 (3) 不同的校准设置下完成，并针对各种工作温度进行优化。环境温度仍相同，而仅根据其他温度设置来改变器件的模拟配置。
5. 现场温度补偿：主机必须实时了解温度趋势（例如，上升或下降，以及预期的工作温度范围），并据此告知所有级联的 AWR 器件其所选的温度指数。为了最大限度地减少突变幅度，建议这个转换温度要接近工厂校准温度。
6. DSP 补偿：除了校准设置更改外，DSP 层处理还必须使用根据工厂校准得到的相应失调数据。

##### 3.1.1 建议步骤的序列和介绍性流程图

下文列出了客户工厂处和现场操作中建议程序的步骤。每个步骤中都引用了“附录”部分中的相关流程图。

1. 保存客户工厂的 RF INIT 校准结果。
  - 图 A-1 展示了此步骤的概念流程图。
2. 客户工厂处的失调测量
  - 图 A-2 展示了通道间不平衡测量概念。
  - 图 A-3 展示了 TX 移相器误差测量概念。
3. 现场恢复客户工厂校准结果。
  - 图 A-4 展示了此步骤的概念流程图。
4. 现场基于主机降低温漂影响。
  - 图 A-5 展示了降低通道间不平衡影响的概念。
  - 图 A-6 展示了降低 TX 移相器误差影响的概念。

后续几节将详细介绍上面列出的每个步骤。

#### 3.2 保存客户工厂的 RF INIT 校准结果

在客户工厂校准过程中，TI 建议主机在所有 RF INIT 校准（下文提到的一些校准除外）均处于启用状态的情况下触发每个级联板上每个器件的 RF INIT 校准。这让器件能够通过自校准来消除制造工艺差异带来的影响。环境温度（称为工厂校准温度）可能为 25°C 或传感器通常预期的现场温度。工厂校准应在传感器的目标射频频率范围内完成。

可以为级联传感器中的器件逐个（不重叠）触发 RF INIT 校准，从而防止以相互干扰的方式损坏 RF INIT 校准数据。

用于启用和触发各种校准的相关消息是 AWR RF INIT CALIBRATION CONF SB 和 AWR RF INIT SB。RF INIT 校准频率可以使用 AWR CAL MON FREQUENCY LIMITS SB 来控制。

在级联系统的每个 AWR 器件都完成各自的 RF INIT 校准后，建议由主机来获取每个器件的校准数据并将其存储在非易失性存储器中。此数据供现场操作期间使用，而无需在现场再次运行 RF INIT 校准。

用于保存校准数据的相关消息是 AWR CAL DATA SAVE SB。此消息并不保存 TX 移相器校准结果，这方面的内容会在本应用手册的后续部分中加以介绍。

### 3.2.1 LODIST 校准说明

在第 1 代器件 ( AWR1243、AWR1843、AWR1642、AWR1443 ) 中，对于需要在时间和帧范围内保持一致性的高级单芯片用例，TI 建议需要在客户工厂校准期间将 AWR RF INIT CALIBRATION CONF SB 中的字段“启用 LODIST 校准”设为 0。这会使 TX 和 RX 部分的 LO 分布缓冲器配置保持不变 ( 这是避免因为重新配置而出现相位突变的一种措施 )。因此，校准报告 API 消息 ( AWR AE RF INITCALIBSTATUS SB ) 也会将“LODIST 校准”状态报告为 0。

在 AWR2243 中，TI 建议在执行工厂校准期间启用 LO DIST 校准，即应该将 AWR RF INIT CALIBRATION CONF SB 的“启用 LODIST 校准”字段设为 1。LO DIST 校准结果会存储到 NVM 中。在现场操作期间，会恢复 LO DIST 校准结果并强制设置 LO DIST 温度指数 ( 低偏置、中偏置和高偏置 )，以便具有相应的 LO DIST 配置。

### 3.2.2 在客户工厂执行 TX 移相器校准并保存结果

TX 移相器存在固有的误差，该误差会因工艺和温度而变化。有两种可能的方法来降低工艺差异的影响 ( 温度差异的影响会在后续几节中加以介绍 )。

1. 使用 RF INIT TX 相移校准。
  - 本节中对此进行了介绍。
  - 此选项要求启用 RF INIT 中的 TX 移相器校准。
2. 使用客户工厂角反射器。
  - 本文档稍后的失调测量部分会对此进行介绍。
  - 此选项要求禁用 RF INIT 中的 TX 移相器校准。

在 RF INIT 过程中，会执行 AWR 器件的 TX 移相器自校准。这些校准使用器件的内部 TX 环回路径和算法。这些校准的结果可以用作所有现场 TX 移相器误差减小措施的基准。

消息 AWR PHASE SHIFTER CAL DATA SAVE SB 可用于针对级联系统中的每个 TX 将数据保存到传感器的非易失性存储器上。这个数据可以恢复到 AWR 器件上，该部分内容会在本文档的稍后部分中加以介绍。

如果从器件的客户工厂内部 RF INIT TX 移相器校准获取移相器校准值：

$$\text{PS Cal Result Array}_{\text{TXn}}(0-63) = \text{工厂的 AWR PHASE SHIFTER CAL DATA SAVE SB API(TXm) 结果} \quad (1)$$

$$\text{PS Cal Result Array Degree}_{\text{TXm}}(0-63) = (360^\circ / 1024) \times \text{PS Cal Result Array}_{\text{TXm}}(0-63) \quad (2)$$

用户应考虑 API 的相位索引格式，该格式可能会因 TX 不同而不同；具体请参阅 7.5 小节。

$$\text{Factory Measured Phase Shift Array}_{\text{RF INIT TX PS Cal, TXm}}(0-63) = \text{PS Cal Result Array Degree}_{\text{TXm}}(0-63) \quad (3)$$

在工厂温度条件下收集的 Factory Measured Phase Shift Array<sub>RF INIT TX PS Cal, TXm</sub> (0-63) 数组必须恢复到器件上 ( 本文档稍后部分会加以介绍 )。公式 1 中 Measured Phase Shift Array 的示例值：[0, 5, 11, ... 356] 度，对应于 [0, 5.625, 11.25, ... 354.375] 度移相器设置。这些相当于 INL 误差值为 [0, 0.625, 0.25, ..., -1.625] 度，即与理想预期值的偏差。INL 误差一词是指积分非线性误差 ( 本应用手册的很多地方都用到 )。

图 3-1(a) 展示了 25°C 条件下通过内部 RF INIT 校准测得的原始模拟 TX 移相器 INL。图 3-1(a) 中还展示了校准后残留的 PS INL，用以说明 RF INIT TX 相移校准的效果。另外，图 3-1(b) 展示了使用外部/独立方法测得的原始模拟 TX 移相器 INL。图 3-1(a) 和图 3-1(b) 中的图形比较相似，展示了内部校准的效果。这些都是几个基于标称流程的器件的 TI 实验室评估中得到的。

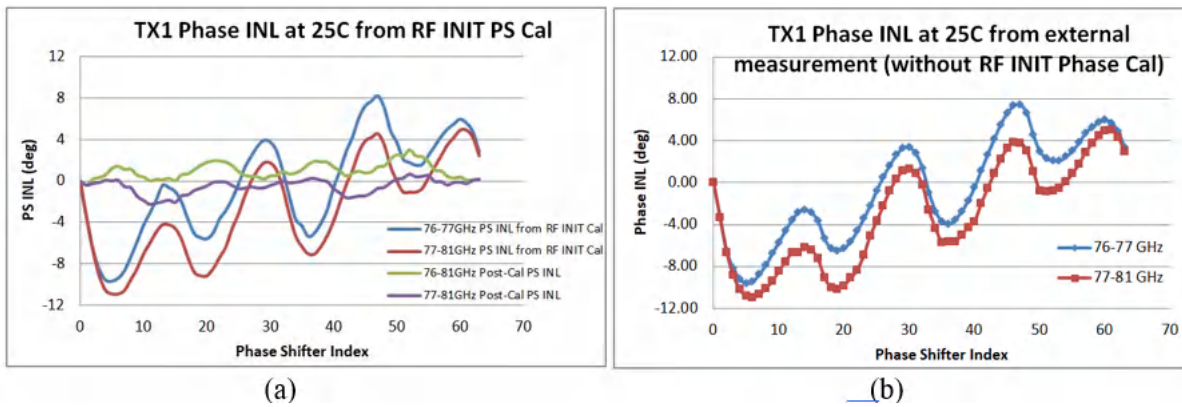


图 3-1. 25°C 时 AWR2243 标称器件信息的移相器 INL 图：(a) 使用内部 RF INIT 移相器校准时 (b) 使用基于外部波导环回的测量值时

上述方法介绍了如何降低工艺差异的影响，而关于如何降低温漂影响的策略会在本应用手册的后续部分加以介绍。

### 3.3 客户工厂处基于角反射器的失调测量

TI 建议在客户工厂处测量级联系统中的失调或非理想因素（例如 RX 间和 TX 间不平衡，以及 TX 相移非线性）。在此过程中，建议禁用所有运行时校准，以确保模拟状态的可预测性。

#### 3.3.1 基于角反射器的通道间不平衡

不平衡测量应使用 AWR 器件在多个不同的校准设置下完成，并针对各种工作温度进行优化。为了降低现场温漂，必须根据工作温度重新配置模拟设置。TI 建议在工厂以三种配置（温度指数/指标）执行失调测量：

- 低偏置设置 - 即针对 -40°C 至 10°C 等低温优化的 RF 设置
- 中偏置设置 - 即针对 0°C 至 50°C（大致为工厂校准温度）等中温优化的 RF 设置
- 高偏置设置 - 即针对 40°C 至 140°C 等高温优化的 RF 设置

环境温度仍相同，而仅根据其他温度设置来改变器件的模拟配置。客户可以根据传感器预计的现场温度范围来固定对应于低偏置、中偏置和高偏置设置的温度范围，并允许存在较小的转换重叠。

测量步骤如下文所示。

1. 发出配置文件、线性调频脉冲和帧配置 API 来设定所需的线性调频脉冲序列，包括 RX 增益、TX 功率和射频频率等。
2. 在 0° TX 相移条件下执行这些测量，以避免 TX 相移非线性效应。
3. 以迭代方式设定低偏置、中偏置和高偏置对应的 TX 增益代码、RX 增益代码（以及 AWR2243 的 LO DIST 代码）以及温度指数。表 3-1 展示了一个采用建议温度指标的示例。下文介绍了为 TI 毫米波 MMIC 设定各代码以及所需温度指标的建议步骤。
  - 对于 AWR1243、AWR1843、AWR1642：
    - a. 使用 AWR RX GAIN TEMPLUT GET SB API 和 AWR TX GAIN TEMPLUT GET SB API 来获取各器件的自校准算法在此增益、功率和视频条件下的结果。输出为 LUT，它是温度的函数（分辨率为 10°C）。
    - b. 根据上述 API 的结果，选择低偏置、中偏置或高偏置设置的 RX 和 TX 增益代码。
    - c. 使用 AWR RX GAIN TEMPLUT SET SB API 和 AWR TX GAIN TEMPLUT SET SB API 来为每个级联的 AWR 器件设定所需的模拟设置（每个器件都具有其各自的值）。
  - 对于 AWR2243：
    - a. 在为 TX、RX 和 LODIST 启用温度指数覆盖的情况下，使用 AWR RUN TIME CALIBRATION CONF AND TRIGGER SB，以及低偏置、中偏置或高偏置设置对应的温度指标。
4. 使用 0° 方向的角反射来估算所有 TX<sub>m</sub>-RX<sub>n</sub> 组合条件下的通道间不平衡。测量每种偏置设置（低偏置、中偏置、高偏置）条件下的该值。表 3-2 展示了一个双芯片级联系统中不平衡数据的示例结构。
5. 将每个指数（低偏置、中偏置、高偏置）的不平衡数据保存在传感器的非易失性存储器中，以供现场使用。

**表 3-1. 示例 ( 器件 ) 温度范围和 TX/RX 增益代码**

设置	温度范围 ( 示例 )	建议用于 TX 增益代码的温 度指数	建议用于 RX 增益代码的 温度指数	建议用于 LO DIST 代码的 温度指数 ( 仅适用于 AWR2243 )
低偏置	-40°C* 至 10°C	10°C	- 40°C ( 可确保 P1dB 的最低温 度范围 )	10°C
中偏置	0°C 至 50°C	50°C	25°C ( 中温度范围 )	50°C
高偏置	40°C 至 140°C*	140°C	140°C ( 可确保噪声系数的最高 温度范围 )	140°C
指导原则	* 限制为传感器的现场预计 工作范围	可确保输出功率的各个最 高温度范围		

1. 在该条件下，RX 增益会在各个温度范围内随温度发生漂移，但不会对噪声系数和 P1dB 带来不利影响。
2. 上述示例假定工厂测试期间器件温度为 25°C。如果器件温度明显更高，可以考虑进行适当的调整；另外，如果应用需要不同的工作温度范围，也可以进行适当的调整。
3. 可从 RF INIT 校准状态报告 (AWR\_AE\_RF\_INITCALIBSTATUS\_SB) 或使用器件的温度监测 API 来获取器件温度。
4. 各设置之间的转换温度不应与工厂校准温度相差过大。这样可以确保低偏置和高偏置条件下校准更加准确。



表 3-2. 双芯片级联中通道间不平衡的示例结构

器件 1			器件 2							
			RX1	RX2	RX3	RX4	RX1	RX2	RX3	RX4
低偏置	器件 1	TX1	0	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18
		TX2	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28
		TX3	A31	A32	A33	A34	A35	A36	A37	A38
	器件 2	TX1	A41	A42	A43	A44	A45	A46	A47	A48
		TX2	A51	A52	A53	A54	A55	A56	A57	A58
		TX3	A61	A62	A63	A64	A65	A66	A67	A68
中偏置	器件 1	TX1	0	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18
		TX2	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28
		TX3	B31	B32	B33	B34	B35	B36	B37	B38
	器件 2	TX1	B41	B42	B43	B44	B45	B46	B47	B48
		TX2	B51	B52	B53	B54	B55	B56	B57	B58
		TX3	B61	B62	B63	B64	B65	B66	B67	B68
高偏置	器件 1	TX1	0	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
		TX2	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28
		TX3	C31	C32	C33	C34	C35	C36	C37	C38
	器件 2	TX1	C41	C42	C43	C44	C45	C46	C47	C48
		TX2	C51	C52	C53	C54	C55	C56	C57	C58
		TX3	C61	C62	C63	C64	C65	C66	C67	C68

### 3.3.2 基于角反射器的 TX 移相器误差

客户可以选择在工厂使用角反射器对 TX 移相器进行校准（以提高精度等）。此过程是使用器件通过 RF INIT 实现的 TX 相移自校准的替代方案。示例测量步骤如下文所示。

1. 在执行此步骤之前，应该在 TX 相移校准处于禁用状态的情况下执行 RF INIT。这用于测量原始模拟的非线性特征，随后在现场对其进行补偿。
2. 器件应该配置为根据每种线性调频脉冲相移模式使用。
3. 使用 profile config API 将射频频率设在传感器的现场工作范围内并配置 TX/RX 以获得良好的 SNR。
4. 使用不同的相移指数/指标配置多个线性调频脉冲。例如，0、1、2、3、4、... 63、0（如果测量期间存在温漂，则应该降低温漂的影响）。配置多个 TX 以在一个帧内按顺序逐个发送这些线性调频脉冲，从而避免连续相位测量期间出现明显的温漂。表 3-3 展示了此类校准帧的示例性线性调频脉冲配置。
5. 收集 RX ADC 数据，并进行处理以为每个 TX 找到每个相移指数的角反射器音调的相位。此数据必须保存在每个级联 TX 的传感器非易失性存储器中。

如果从客户工厂的角反射器测量获取移相器校准值：

$$\text{Factory Measured Phase Shift Array}_{\text{CornerReflector, TXm}}(0-63) = \text{针对移相器设置 } 0 \text{ 至 } 63 \text{ 在 RX ADC 输出测得的角反射器音调} \quad (4)$$

在工厂温度条件下收集的 Factory Measured Phase Shift Array<sub>CornerReflector, TXm</sub> (0-63) 数组必须恢复到器件上（本文档稍后会进行介绍）。公式 2 中 Measured Phase Shift Array 的示例值：[0, 5, 11, ... 356] 度，对应于 [0, 5.625, 11.25, ... 354.375] 度移相器设置。这些相当于 INL 误差值为 [0, 0.625, 0.25, ..., -1.625] 度，即与理想预期值的偏差。在这里，INL 误差是指积分非线性误差。

下面是一些与实现此目的相关的 API：

1. AWR RF INIT CALIBRATION CONF SB（字段：“Enable TX Phase calibration” = 0 会禁用器件在 RF INIT 条件下的 TX 相移误差自校准）。
2. AWR RF RADAR MISC CTL SB（字段：PERCHIRP PHASESHIFTER EN）和 AWR PERCHIRPPHASESHIFT CONF SB 用于控制相移值。

表 3-3. TX 移相器误差工厂校准的示例线性调频脉冲配置

器件 1				器件 2			
线性调频脉冲指数	Enable TX1	Enable TX2	Enable TX3	Enable TX1	Enable TX2	Enable TX3	相移指数 (所有 TX 共用)
0	1	0	0	0	0	0	0 (0o)
1	1	0	0	0	0	0	1 (5.625o)
2	1	0	0	0	0	0	2 (11.25o)
:	1	0	0	0	0	0	:
63	1	0	0	0	0	0	63 (354.375o)
64+0	0	1	0	0	0	0	0 (0o)
64+1	0	1	0	0	0	0	1 (5.625o)
64+2	0	1	0	0	0	0	2 (11.25o)
64+:	0	1	0	0	0	0	:
64+63	0	1	0	0	0	0	63 (354.375o)
2*64+0	0	0	1	0	0	0	0 (0o)
2*64+1	0	0	1	0	0	0	1 (5.625o)
2*64+2	0	0	1	0	0	0	2 (11.25o)
2*64+:	0	0	1	0	0	0	:
2*64+63	0	0	1	0	0	0	63 (354.375o)
3*64+0	0	0	0	1	0	0	0 (0o)
3*64+1	0	0	0	1	0	0	1 (5.625o)
3*64+2	0	0	0	1	0	0	2 (11.25o)
3*64+:	0	0	0	1	0	0	:
3*64+63	0	0	0	1	0	0	63 (354.375o)
4*64+0	0	0	0	0	1	0	0 (0o)
4*64+1	0	0	0	0	1	0	1 (5.625o)
4*64+2	0	0	0	0	1	0	2 (11.25o)
4*64+:	0	0	0	0	1	0	:
4*64+63	0	0	0	0	1	0	63 (354.375o)
5*64+0	0	0	0	0	0	1	0 (0o)
5*64+1	0	0	0	0	0	1	1 (5.625o)
5*64+2	0	0	0	0	0	1	2 (11.25o)
5*64+:	0	0	0	0	0	1	:
5*64+63	0	0	0	0	0	1	63 (354.375o)

在 25°C 条件下，在基于角反射器的实验中从典型 AWR2243 器件（标称流程）的 TX1 测得的相移数组如“附录”部分中的表 8 所示。图 3-1(b) 以移相器 INL 图的形式展示了 25°C 条件下的相同数据。这些都是几个基于标称流程的器件的 TI 实验室评估中得到的。它们提供了代表性信息并可用于初始传感器开发中的示例。INL 情况下可能存在一定的流程偏差，但预计会大致相似（基于 TI 实验室的 DoE 器件评估）。

对于使用角反射器通过 25°C 工厂校准实现的校准后移相器精度，请参阅图 5(b)。

### 3.4 现场恢复工厂校准结果

建议现场完成以下工作，以确保所有器件都恢复到与客户工厂校准期间相同的状态。

#### 3.4.1 现场恢复 RF INIT 校准结果

在现场上电时，传感器中的主机处理器可以将每个器件恢复到与客户工厂中相同的 RF INIT 校准状态。这可以按照以下程序来实现。它与正常的 RF INIT 调用和启动序列略有不同。

1. 从传感器的非易失性存储器恢复每个器件的 RF INIT 校准结果。
  - 使用 AWR CAL DATA RESTORE SB 来完成此步骤。

- 这是正常启动序列之外的一个额外步骤。
- 2. 将所有 RF INIT 校准配置为禁用。
  - 使用 AWR RF INIT CALIBRATION CONF SB 来完成此步骤。
  - 这是正常启动序列之外的一个额外步骤。
- 3. 触发 RF INIT。
  - 使用 AWR RF INIT SB 来完成此步骤。

上述恢复操作不包含 TX 相移校准和数字延迟补偿设置。

上述过程中所有校准都处于禁用状态，因此校准报告 API 消息 (AWR AE RF INITCALIBSTATUS SB) 也会将校准状态报告为 0。强制校准 (例如将 PLL 保持锁定) 会在没有主机控制的情况下完成。与工厂校准期间以非叠加式向所有级联的器件发出 RF INIT API 并保存的时间限制 (以避免互干扰) 不同，恢复阶段不存在特殊的时间限制 (因为这里校准测量实际上处于禁用状态)。

### 3.4.2 现场恢复 TX 相移校准结果

TX 相移工厂校准结果 (可在公式 1 或公式 2 中找到) 可以使用 AWR PHASE SHIFTER CAL DATA RESTORE SB 恢复到 AWR 器件上。

对于恢复基于客户工厂角反射器的移相器校准值，请将以下代码发送到上述 API：

```
modulo (1024/360° × Factory Measured Phase Shift ArrayCornerReflector,TXm (0 to 63),1024) (5)
```

对于将基于客户工厂所执行 RF INIT TX 移相器校准的值恢复到器件上，请将以下代码发送到上述 API：

```
modulo (1024/360° × Factory Measured Phase Shift ArrayRF INIT TX PS Cal,TXm (0 to 63)) (6)
```

用户应该考虑此 API 的相位索引格式，该格式可能因 TX 不同而不同 (请参阅表 A-5 和表 A-6)。

为了方便说明，这里假定上电时的温度与工厂校准温度一致。此假定并非必要，如果有误，第 3.5.4 小节中详细介绍了所需的步骤。

## 3.5 基于主机的现场温度校准

确保器件都恢复到其客户工厂校准状态 (关于 RF INIT 校准结果) 后，TI 建议主机按照此处所述来控制器件的运行温度校准。

### 3.5.1 禁用 AWR 器件的自主运行时校准

在建议的程序中，AWR 器件的内部自主运行时校准很多都保持禁用状态，其中一些校准处于启用状态。例外包括：

1. 强制校准 (例如将 PLL 保持锁定) 会在没有主机控制的情况下完成。
2. 功率检测器校准必须处于启用状态。这是因为监控功能要使用这些校准，并且它们需要针对温漂进行连续校准。如果其他 TX 和 RX 校准都处于禁用状态，则它们对功能性线性调频脉冲没有影响。

相关的 API 为 AWR RUN TIME CALIBRATION CONF AND TRIGGER SB，而功率检测器校准可以通过将字段 PD CALIBRATION EN 设为 1 来启用。如前所述，其他校准应处于禁用状态。

在这些重要运行时校准处于禁用状态时，传感器中的主机处理器必须使用合适的偏置设置 (低偏置、中偏置、高偏置) 来配置器件。该过程将会在后文进行介绍。

### 3.5.2 实现基于主机的通道间不平衡温度校准

主机必须监控器件温度，并在需要时更改 AWR 器件中的模拟配置，以降低温漂的影响。下列步骤展示了该过程。

1. 读取器件温度：使用 AWR 器件的温度传感器来测量器件温度。根据所有器件中所有模拟 (TX、RX、CLK) 温度传感器的平均值来确定一个平均温度。用于温度测量的相关 API 如下所示：
  - AWR RF TEMPERATURE GET SB (它可以用作按需提供的温度传感器读数，并且在第一个帧开始前会非常有用)。
  - AWR MONITOR TEMPERATURE CONF SB (它可用于预先配置周期性温度监控报告)。

2. 确定偏置设置：利用平均温度和主机了解到的温度趋势（上升或下降，以及预期的长期温度范围），确定要用于传感器的偏置设置（低偏置、中偏置或高偏置）。
3. 配置 TX、RX 和 LO 代码：根据所选偏置设置，按如下方式配置 TX、RX 和 LO 代码：
  - 对于 AWR1243、AWR1843、AWR1642：分别使用 AWR TX GAIN TEMPLUT SET SB API 和 AWR RX GAIN TEMPLUT SET SB API，针对所选偏置设置设定保存在非易失性存储器中的 TX 和 RX 增益代码。在这两个 API 中，对于所有温度区间（ $-40^{\circ}\text{C}$  至  $-30^{\circ}\text{C}$ 、 $-30^{\circ}\text{C}$  至  $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$  至  $-10^{\circ}\text{C}$  ...  $120^{\circ}\text{C}$  至  $130^{\circ}\text{C}$ 、 $130^{\circ}\text{C}$  至  $140^{\circ}\text{C}$ ），这些代码都必须设定为相同的值，并且对于不同的器件，这些代码可能会有所不同。
  - 对于 AWR2243：通过发出 AWR RUN TIME CALIBRATION CONF AND TRIGGER，覆盖与 TX、RX 和 LO DIST 的所选偏置设置相对应的温度指数。
4. 在第一个雷达帧之前：主机必须执行上述程序，然后在 RF INIT 之后触发第一个雷达帧。
5. 转换时序和 API 序列：在 RF INIT 之后，甚至在帧开始之后，主机必须持续监控器件温度并确定是否需要转换偏置设置。需要时，它必须执行上述具有时序限制的程序。
  - 对于 AWR1243、AWR1843 和 AWR1642，时序限制如下所示：
    - a. 必须以协同方式以及在无帧/线性调频脉冲时向所有级联的器件发出上述 SET API。
    - b. 为此，应该先向所有器件发出 AWR FRAMESTARTSTOP CONF SB API（停止）。然后必须发出各个 SET API。接着使用 AWR FRAMESTARTSTOP CONF SB API（启动）来恢复发送帧。
    - c. 在收到此 API 消息时，器件会完成进行中的雷达帧，然后停止其他帧。
  - 对于 AWR2243，即使是帧正在运行时，也可以发出 AWR RUN TIME CALIBRATION CONF AND TRIGGER SB 并用合适的温度指数进行覆盖。主机必须观察以下时序限制，以确保所有级联的器件都遵守相关要求并在同一帧应用必要的调整，同时避免任何间歇性器件间不匹配：
    - a. 主机应该等待与监测周期（例如监测周期 N）相对应的监测报告标头 API 消息。该消息指示上个监测周期已结束，下个周期即将开始。
    - b. 然后，主机应该发出 AWR RUN TIME CALIBRATION CONF AND TRIGGER SB 并确保其同一监测周期（即监测周期 N+1）到达所有级联器件。主机应确保级联器件在下个监测周期（即监测周期 N+2）开始之前（约 1 毫秒或更短）接收到新的 API。
    - c. 器件执行与下个监测周期（即监测周期 N+2）中的校准调整相关的必要计算。新的校准调整设置会在随后的监测周期（即监测周期 N+3）生效。图 3-2 展示了相应时序。
6. 各设置之间的转换温度不应与工厂校准温度相差过大。这可以通过为低偏置、中偏置和高偏置选择合适的温度范围来实现。
  - 更改 TX、RX 和 LO DIST 代码会导致相位突变。这些突变预计会通过 DSP 后处理（将在后续几节中加以介绍）进行补偿。
  - 为了最大限度地减少 DSP 后置补偿之后残留的相位突变，该字段中的突变幅度必须与工厂测量的幅度一致。为此，建议在温度尽可能接近工厂校准温度时（通常为中偏置的中间）时进行转换。

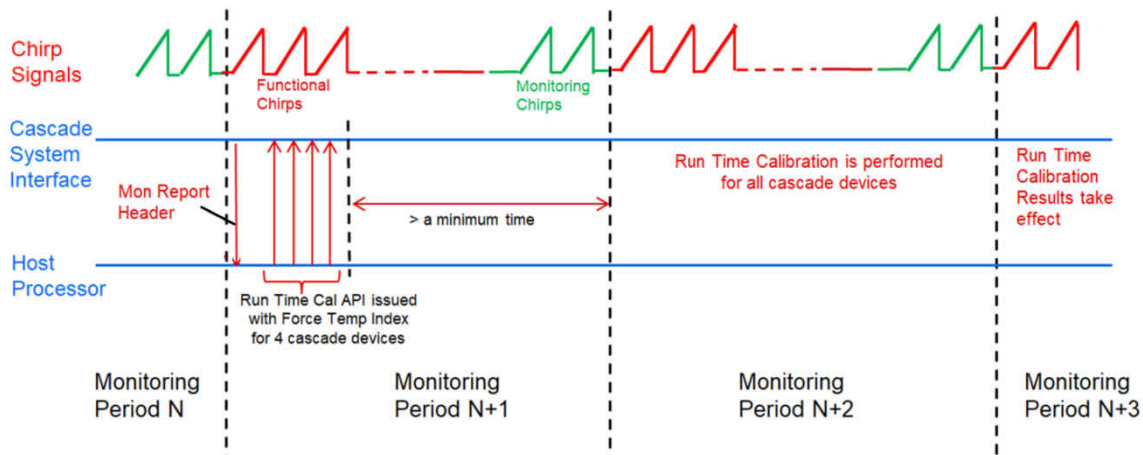


图 3-2. AWR2243 运行时校准温度指数强制时序图

### 3.5.3 切换 DSP 不平衡数据

与 AWR 器件温度指数转换结合使用时，DSP 也必须转换为相应的不平衡数据，该数据存储在传感器用于存储客户工厂校准数据的非易失性存储器中。

这确保即使 AWR 器件切换模拟设置，也不会因为不平衡而出现显著的相位突变，因为 DSP 算法会从工厂校准数据获得新的不平衡数据。如果转换温度与工厂校准温度（通常为中间偏置温度范围的中间值）一致，残留的不平衡预计会很小。

### 3.5.4 实现 TX 移相器基于主机的温度校准

即使在使用本文档前面所述的方法降低 TX 相移误差中的过程变化影响后，仍可能会存在由温漂导致的残留 TX 相移误差。下面介绍了一种用于减少该残留误差的典型策略，该策略是工作人员在 TI 实验室中在不同温度条件下评估多个器件（AWR1843 和 AWR2243，标称流程）而得出的。

按照下列步骤操作：

1. 估算“当前”温度下的 TX 相移值。这包括回顾工厂校准值和 LUT 中的温度校正项。
2. 将估算的 TX 相移值恢复到器件上。

后续几节对此进行了说明。

#### 3.5.4.1 估算任何温度下的 TX 相移值

在任何温度 ( $T_{\text{present}}$ ) 条件下，器件原始模拟移相器的估算相移值都可以通过以下方式得出：

$$\text{Estimated Phase Shift Array}_{\text{TXm}}(0-63) = \text{Factory Measured Phase Shift Array}_{\text{CornerReflector, TXm}}(0-63) + \text{Temperature Correction LUT}(T_{\text{present}}) \quad (7)$$

在这里， $\text{Factory Measured Phase Shift Array}_x$  表示在工厂温度 ( $T_{\text{factory}}=25^\circ\text{C}$ ) 条件下在工厂内针对每个 TX 为 64 个原始模拟移相器设置中的每一个测得的相移值，并且是从公式 1 或公式 2 得出的。另外， $\text{Temperature Correction LUT}(T_{\text{present}})$  表示温度相关校正，必须施加该校正，才能获得  $T_{\text{present}}$  的等效估算相移值。后续几节对此进行了说明。

#### 3.5.4.2 AWR1843TX 移相器的温度校正 LUT

假定  $T_{\text{factory}} = 25^\circ\text{C}$ ，“附录”中的表格 7 提供了  $T_{\text{present}} = -40^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$ 、 $85^\circ\text{C}$ 、 $130^\circ\text{C}$  条件下 AWR1843 的温度校正 LUT ( $T_{\text{present}}$ )。图 3-3 以图表形式展示了相同的信息。这些都是在 TI 实验室中对几个基于标称流程的器件进行评估而得到的。所有温度的 LUT 都使用 0 至 63 建立索引，对应于 6 位相移指数，而输出为所需的相位角校正正值。如有需要，可以对这些温度进行线性内插/外推来得出其他温度下的对应值。下图所示的数据是在一次一个 TX 处于开启状态下测得的。如果多个 TX 同时处于打开状态，Tx-Tx 天线耦合可能会对相位造成次级影响。

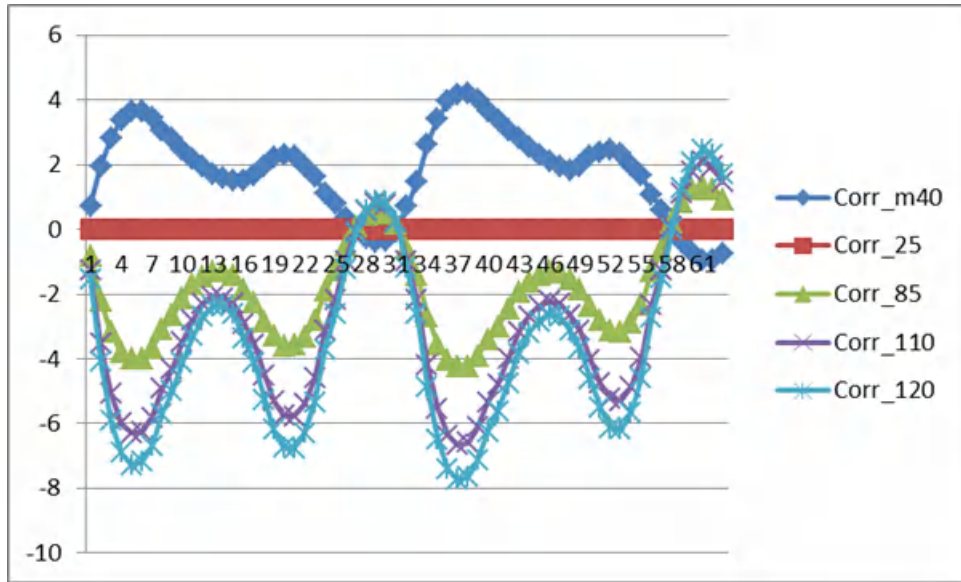


图 3-3. AWR1843 的 TX 相移误差温度校正 1

1. 假定在 25°C 下进行客户工厂校准，y 轴为相位误差，单位为度，而 x 轴为相移。

### 3.5.4.3 AWR2243 TX 移相器的温度校正 LUT

假定  $T_{\text{factory}} = 25^{\circ}\text{C}$ ，“附录”部分中的表格 9 提供了  $T_{\text{present}} = -40^{\circ}\text{C}$ 、 $25^{\circ}\text{C}$ 、 $85^{\circ}\text{C}$ 、 $130^{\circ}\text{C}$  条件下 AWR2243 的温度校正 LUT ( $T_{\text{present}}$ )。图 3-4 中以图表形式提供了相同的信息。这些都是在 TI 实验室中对几个基于标称流程的器件进行评估而得到的。评估是在通过波导环回将 TX 连接到 RX 的雷达系统上执行的。这里分别针对 TX1 的 76GHz 至 77GHz 频段和 77GHz 至 81GHz 频段提供了 LUT，以便捕获不同射频频率之间的细微差异。所有温度的 LUT 都使用 0 至 63 建立索引，对应于 6 位相移指数，而输出为所需的相位角校正。如有需要，可以通过线性内插/外推来得出其他温度下的对应值。下图所示的数据是在一次一个 TX 处于开启状态下测得的。如果多个 TX 同时处于打开状态，Tx-Tx 天线耦合可能会对相位造成次级影响。

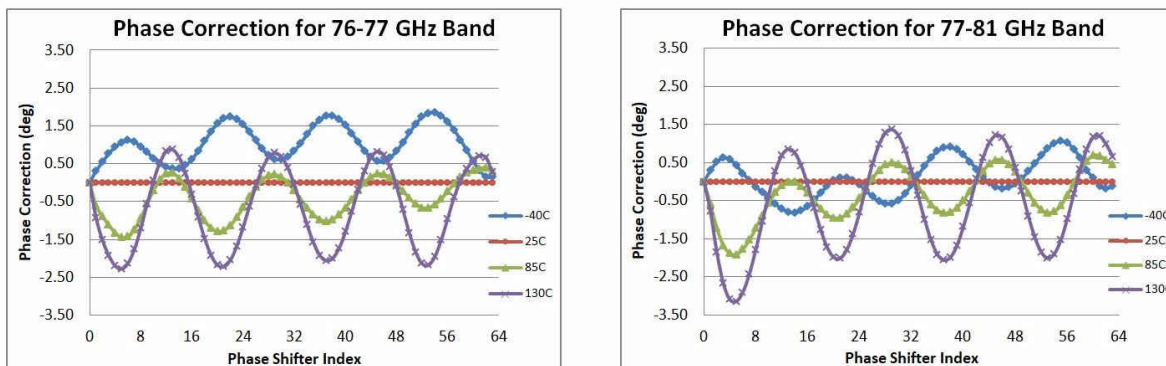


图 3-4. AWR2243 的 TX 相移误差温度校正 1

1. 假定在 25°C 下进行客户工厂校准，y 轴为相位误差，单位为度，而 x 轴为相移指数，单位 = 360/64。

### 3.5.4.4 恢复 TX 相移值 - 格式转换

API AWR PHASE SHIFTER CAL DATA RESTORE SB 可用于在现场操作中将 TX 移相器校准数据恢复到器件中。

若要恢复当前温度条件下原始模拟的估算相移值，请将以下代码发送至上述 API：

$$\text{modulo}(1024/360^{\circ}) \times \text{Estimated Phase Shift Array}_{\text{Txm}}(0 \text{ to } 63), 1024) \quad (8)$$

用户应该考虑此 API 的相位索引格式，该格式可能会因 TX 不同而不同（请参阅附录第 7.5 节）。

### 3.5.4.5 恢复 TX 相移值 - 转换时序和限制

仅当没有雷达帧正在处理时，例如发出 FRAME STOP 命令之后（使用 AWR FRAMESTARTSTOP CONF SB）和发出下一个 FRAME START 命令之前，才应向器件发送 AWR PHASE SHIFTER CAL DATA RESTORE SB 消息。如果客户希望在不停止帧的情况下发送 AWR PHASE SHIFTER CAL DATA RESTORE SB，则主机负责确保存在活动帧时不会发出该 API。这一点适用于 AWR1843 和 AWR2243。

### 3.5.4.6 典型校准后 TX 移相器精度

图 3-5 展示了标称 AWR2243 器件的代表性 TX 移相器精度（使用与不使用涉及上述温度校正 LUT 的校准程序）。在一些 DoE 器件的 TI 实验室评估中，可以观察到移相器 INL 约小于 +/- 2 度。评估时在 AWR2243 器件的 TX 和 RX 之间使用了一个波导环回，并通过 TX 移相器代码进行扫描并处理 RX 上收到的 ADC 数据，测量了 TX 移相器误差。

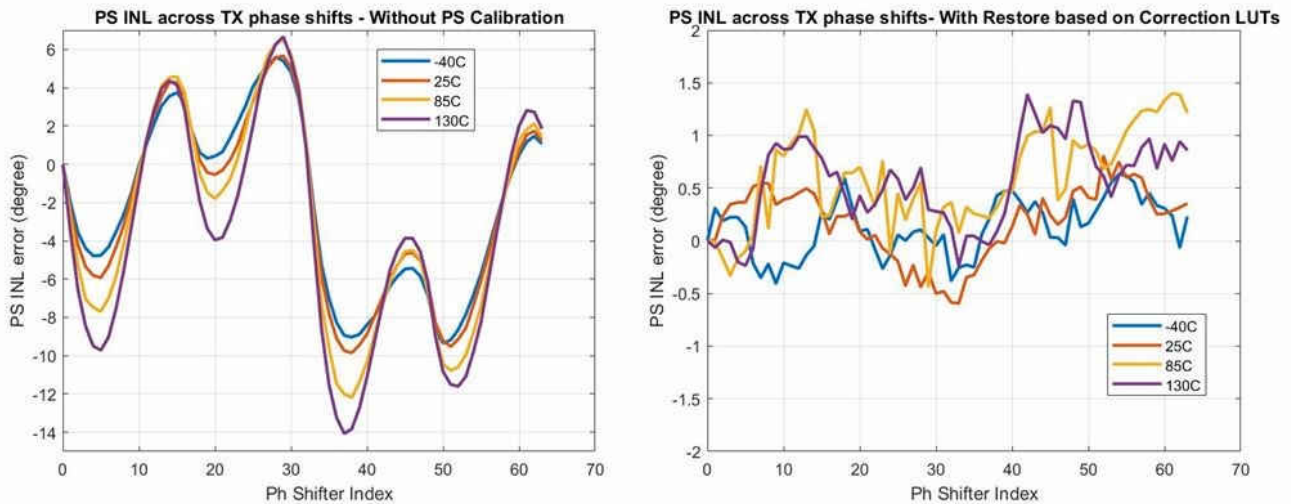


图 3-5. AWR2243 中的 TX 移相器精度 1, 2

1. (a) 不执行任何移相器校准时的 PS INL。
2. (b) 基于校正 LUT 执行主机温度校准时的 PS INL，其中显示了多个温度。

### 3.5.4.7 在不同相位设置之间进行扫描时的温漂校正

本节介绍了关于工厂校准期间温漂的次要方面，以及 Factory Measured Phase Shift Array<sub>CornerReflector,TXm</sub> (0-63) 的构成。即使环境温度是稳定的，如果在移相器设置从 0 到 63 进行扫描期间，器件温度因为自热而出现轻微的漂移，它可能会在试验过程中导致器件的 PS INL 测量出现漂移。如果不同相位设置之间存在显著的漂移，那么客户可以考虑在客户工厂测量的最后阶段重复执行 0 移相器设置测量，即针对设置 0、1、2、3、...、62、63、0 测量移相器 INL。从测量值推导出移相器 INL 后，主机处理器可以按照以下公式所述施加呈线性增加的校正，使得 0 相位设置测量的移相器 INL 最终变为 0。

$$\text{Factory Measured Phase Shift Array (0-64)} = \text{Factory Measured Phase Shift Array (0-64)} - \text{Factory Measured Phase Shift Array (0)} \quad (9)$$

$$\text{Factory Measured Phase Shift Array (0-63)} = \text{Factory Measured Phase Shift Array (0-63)} + ((360^\circ - \text{Factory Measured Phase Shift Array (64)}) * [0:63] / 64) \quad (10)$$

在这里，Factory Measured Phase Array (64) 是指在最后阶段重复使用 0 相位设置时测得的相移值。

这可以补偿在不同移相器设置之间进行扫描时温漂带来的影响。图 3-6 展示了通过在各相位设置上施加线性校正来补偿对 PS INL 测量的温漂影响。

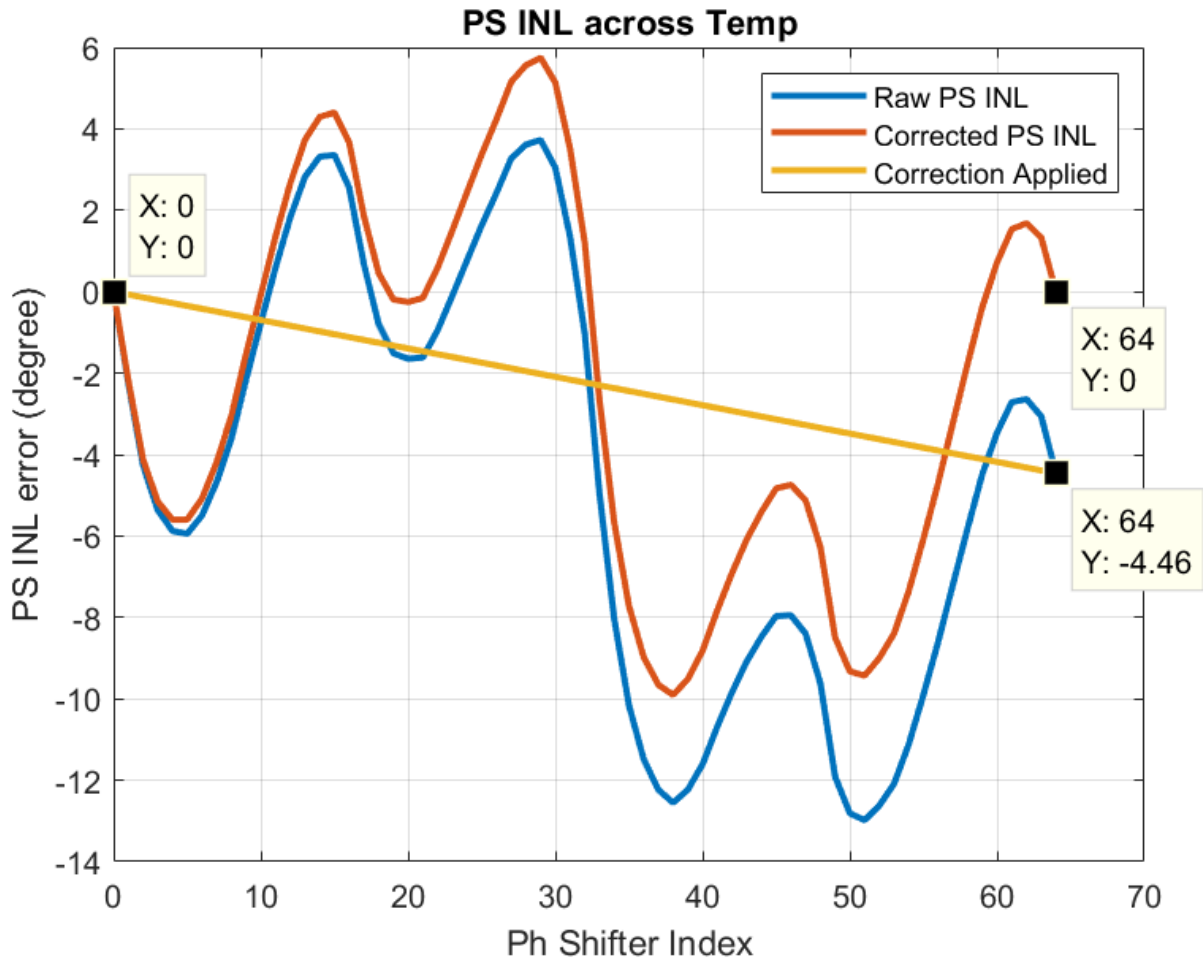


图 3-6. 校准过程中测得的原始 PS INL，以及对校准测量期间相位变化温漂的线性补偿图示

### 3.5.4.8 不同移相器设置下的振幅稳定性

图 3-7 展示了标称 AWR2243 器件在不同 TX 移相器代码条件下的代表性振幅稳定性（使用与不使用涉及上述温度校正 LUT 的校准程序）。在一些 DoE 器件的 TI 实验室评估中，可以观察到移相器 INL 约小于  $\pm 0.3\text{dB}$ 。评估时在 AWR2243 器件的 TX 和 RX 之间使用了一个波导环回，并通过对 TX 移相器代码进行扫描并处理 RX 上收到的 ADC 数据，测量了 TX 移相器振幅变化。下图所示的数据是在一次一个 TX 处于开启状态下测得的。如果多个 TX 同时处于打开状态，Tx-Tx 天线耦合可能会对振幅造成次级影响。

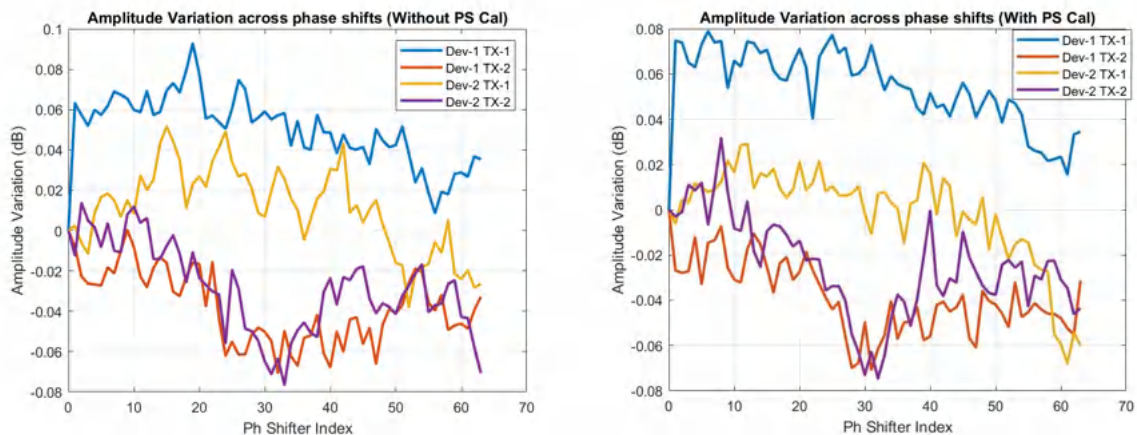


图 3-7. 25°C 时不同移相器设置下的振幅变化 1



1. 不执行移相器校准，在级联传感器 ( 2 个器件的 2 个 TX ) 中测得。

#### 3.5.4.9 客户 PCB 20GHz 同步路径衰减对 TX 移相器的影响

在 AWR2243 级联系统中，来自主器件上 ClockOut 或 SyncOut 引脚的 20GHz LO 信号通过 PCB 馈入所有器件的 SyncIn 引脚，从而实现射频同步。该 PCB 布线会导致 20GHz 同步路径中出现损耗，而 20GHz SyncIn 功率水平的变化可能间接地改变 TX 移相器属性。

在多个 DoE 工艺角和温度条件下且 SyncIn BGA 功率设为约 -0.5dBm 至 -4.5dBm 时对一些器件执行的 TI 实验室评估表明，在所有移相器设置下，完成上述所有建议程序和 LUT 后在 PS INL 上观察到的变化小于 1 度。

由于 20GHz 功率水平高度依赖于客户的 PCB 设计，如果需要进一步提高移相器精度，客户可以考虑使用几个自有传感器来确定 TX 移相器在温度范围内的特征，然后重新评估并重新获得本应用手册中与其自有传感器相对应的 LUT。

#### 3.5.5 环境温度与器件温度

执行客户工厂测量时，应确保器件温度充分稳定并在整个测量过程中保持一致 ( 在约 5°C 范围内 )。另外，在上述情况下，“工厂校准温度”这个词宽泛地定义为环境温度，并假定器件温度保持不变。但是，如果器件在校准过程中温度升高 ( 模拟温度传感器的平均值 )，那么工厂温度应指器件温度。工厂测量期间的器件温度可以通过 RF INIT 校准状态报告消息 (AWR\_AE\_RF\_INITCALIBSTATUS\_SB) 中的 TEMPERATURE 字段或通过使用器件的温度监控 API 来获得。

## 4 概念展示

以下图片展示了本应用手册中介绍的解决方案概念。这些图片都基于 AWR1243 级联传感器与两个器件的实验，其中分析时考虑每个器件一个 RX 和一个 TX。

在本应用手册中，预计 AWR2243 对应的结果彼此相似。在此条件下，共有 4 个虚拟通道或 TX-RX 组合。实验中的温度并不固定，图中绘制的是各种 TX-RX 组合条件下雷达返回信号的绝对相位。在其中一个图形中，AWR 器件配置为采用独立的自主周期性运行时（温度）校准（单芯片用例中通常建议采用此配置）。器件可能会以 10°C 分辨率自行触发校准更新，并在不同的温度条件下形成未知振幅的相位突变，如此图所示。下一张图片展示了相同配置，但会通过 3 个偏置设置（低偏置、中偏置和高偏置，如前文所述）从外部触发温度校准。最后一张图片展示了相同的配置，但根据之前 25°C 环境温度条件下测得的突变针对低-中-高范围内的相位突变进行了额外的后置补偿，因此没有相位突变。

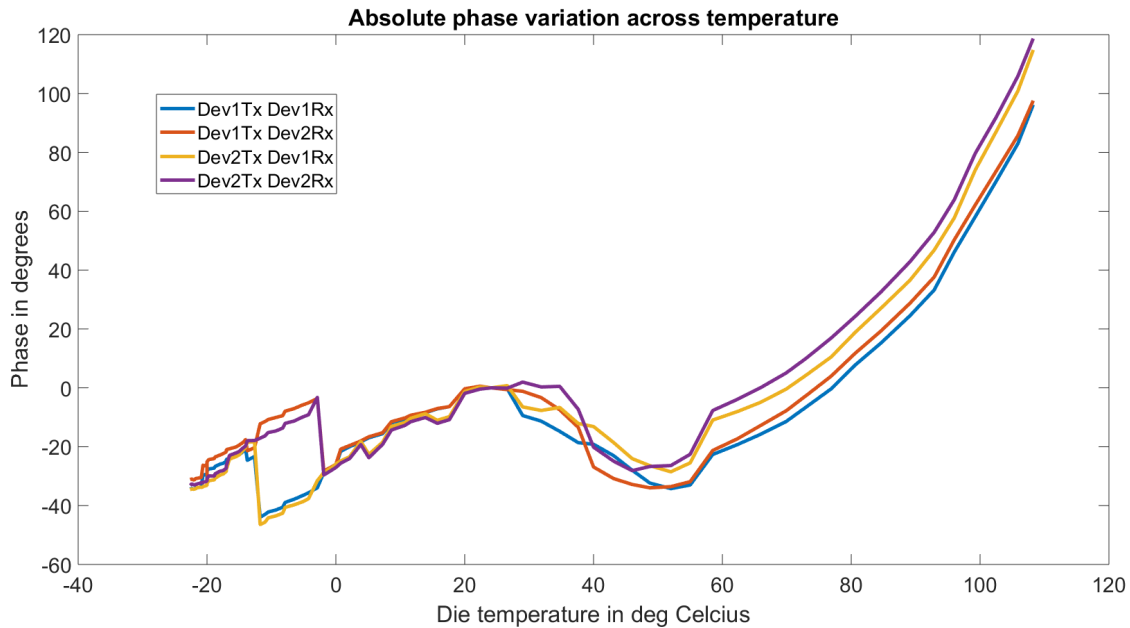


图 4-1. 在器件中执行独立自主周期性运行时校准时的绝对相位变化

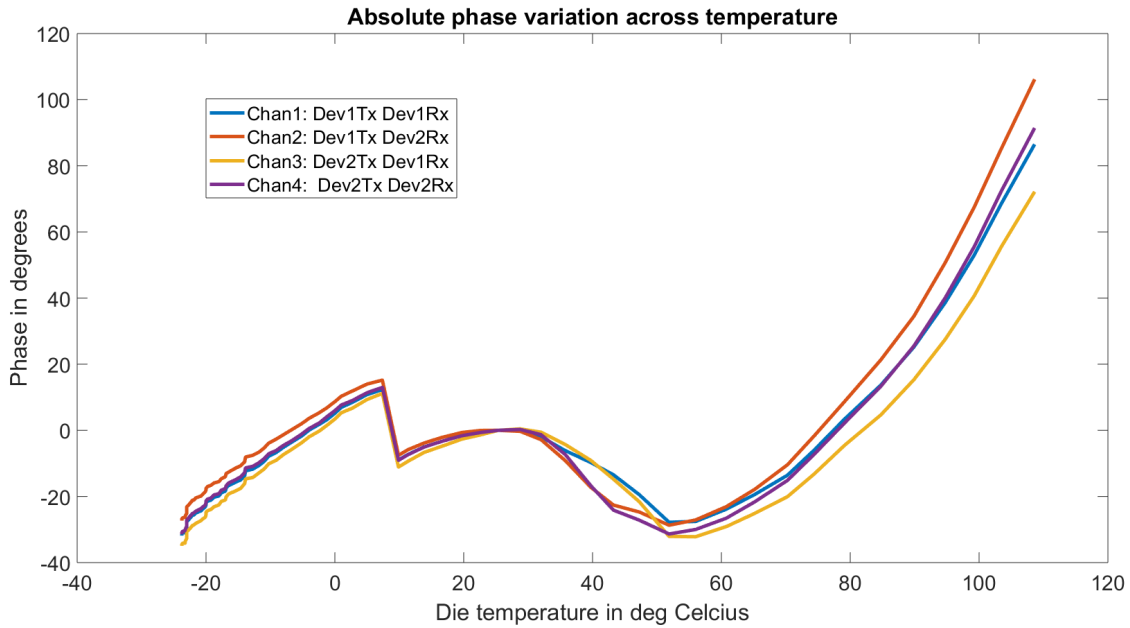


图 4-2. 外部触发校准更新时的绝对相位变化 1

1. 基于低偏置、中偏置和高偏置温度范围。

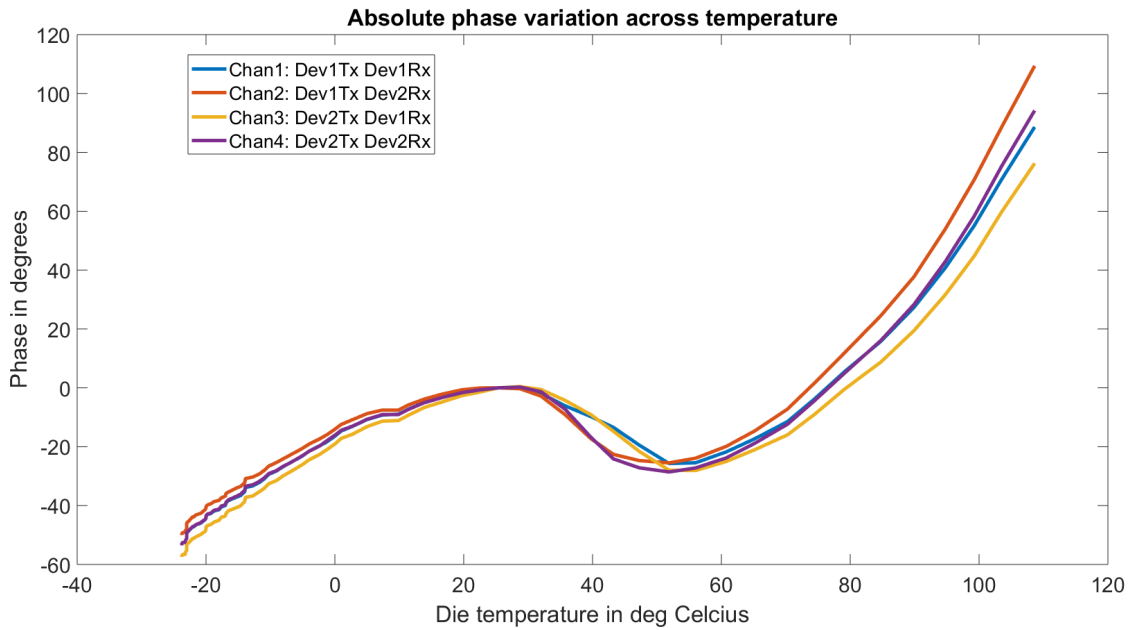


图 4-3. 外部触发校准更新时的绝对相位变化 1

1. 基于低偏置、中偏置和高偏置温度范围以及使用之前的 25°C 突变估算而实现的相关后置补偿。

## 5 其他 ( 干扰、增益变化、采样抖动 )

### 5.1 处理现场干扰

器件的内部校准和监测功能会受到外部干扰的影响。缓解策略与级联一致性相关策略相似，具体包括在客户工厂的无干扰环境中执行 RF INIT，以及在现场操作期间使用校准数据保存和恢复 API 来保存这些结果并将它们恢复到器件中。器件的自校准应用手册包含更多细节 ( 请参阅参考文献部分 )。

### 5.2 关于 TX 功率和 RX 增益漂移与温度间关系的信息

一般来说，采用上文建议的策略会使视频模拟偏置设置在较大的温度范围内保持不变 ( 例如  $-50^{\circ}\text{C}$  至  $140^{\circ}\text{C}$  可以使用相同的 TX 和 RX 偏置设置 )。在这种情况下，雷达返回信号强度会随温度变化，具体取决于偏置设置选择。本节介绍了 TX 功率和 RX 增益如何随温度而变化 ( 基于标称 AWR2243 设计的预期 )。它以表格形式提供了不同偏置设置下的数据，并且假定主机能够基于 API 控制温度/偏置设置。

#### 备注

这些信息都来自于标称器件仿真，不同的制造工艺之间会存在一些差异。

表 5-1. TX 功率与器件温度间的关系 ( 用于获取温度范围内的相对“漂移” )

温度	TX 输出功率 (dBm)				
	-40°C 设置	10°C 设置	25°C 设置	50°C 设置	140°C 设置
-40	13.11	13.48	13.57	13.77	14.43
-30	13.00	13.38	13.5	13.66	14.41
-20	12.87	13.28	13.41	13.56	14.38
-10	12.71	13.17	13.31	13.46	14.34
0	12.54	13.05	13.2	13.36	14.28
10	12.35	12.93	13.08	13.27	14.21
20	12.14	12.79	12.95	13.17	14.13
30	11.91	12.65	12.8	13.06	14.04
40	11.65	12.50	12.64	12.95	13.94
50	11.38	12.34	12.47	12.83	13.82
60	11.09	12.16	12.29	12.71	13.69
70	10.78	11.96	12.1	12.57	13.55
80	10.45	11.76	11.89	12.43	13.4
90	10.09	11.54	11.67	12.29	13.24
100	9.72	11.26	11.44	12.11	13.06
110	9.33	11.01	11.2	11.94	12.87
120	8.92	10.76	10.95	11.77	12.67
130	8.49	10.48	10.68	11.58	12.46
140	8.03	10.17	10.4	11.36	12.24

表 5-2. 各种温度条件下不同设置的 RX 增益

温度	RX 增益 (dB)		
	-40°C 设置	25°C 设置	140°C 设置
-40	37.53	40.07	43.35
-30	37.09	39.59	42.85
-20	36.65	39.13	42.37
-10	36.24	38.68	41.9
0	35.83	38.24	41.44
10	35.44	37.82	40.99
20	35.06	37.41	40.56
30	34.69	37.01	40.14
40	34.34	36.62	39.73
50	33.99	36.25	39.32
60	33.66	35.89	38.93
70	33.33	35.53	38.55
80	33.01	35.19	38.17
90	32.69	34.85	37.79
100	32.38	34.51	37.42
110	32.07	34.17	37.05
120	31.76	33.84	36.68
130	31.45	33.5	36.31
140	31.14	33.16	35.94

### 5.3 线性调频脉冲开始与 ADC 采样开始之间的抖动

由于合成器线性调频脉冲启动路径中存在数据同步器，对于 RX ADC 采样，每个 RF 线性调频脉冲开始时都可能存在 0/1.1ns 双峰抖动。这会导致出现较小的线性调频脉冲到线性调频脉冲相位抖动，并且抖动幅度取决于 IF 频率。例如，当 IF 频率为 1MHz 时，这会在尺寸范围内转化为  $360^\circ \times 1.1\text{ns} \times 1\text{MHz} = 0.4^\circ$ ；IF 频率为 10MHz 时为  $4^\circ$ ，而在 IF 频率为 20MHz 时则为  $8^\circ$ 。在多普勒处理期间，这种线性调频脉冲到线性调频脉冲相位抖动可能在相同的 IF 频率条件下导致速度维度出现轻微的音调泄露。该行为预计是随机的，会随时间、温度和器件的变化而变化。

## 6 结论

在没有干扰的环境中，唯一要考虑的问题是通道间不平衡，因此简单的单芯片应用可以继续在现场使用器件全部的自校准功能 ( RF INIT 以及运行时校准 )。但是，在还需要绝对相位稳定性、不包含突变以及用于级联传感器的单芯片应用中，所有器件之间需要实现通道间平衡。为此，本应用手册记录了一些必要的建议。另外，本应用手册还提供了关于 TX 移相器精度和改进方法的信息。

## A 附录

### A.1 术语

表 A-1 简单说明了本应用手册中使用的一些术语。

**表 A-1. 术语**

器件	TI 的雷达片上系统，例如 AWR1243 或 AWR2243
单芯片	一种使用场景，其中雷达传感器仅包含一个 AWR 器件，并仅在帧内而不跨帧执行数据的相干处理。
级联	一个结合使用了多个 AWR 器件来改进感测的雷达系统
高级单芯片	一种使用场景，其中单芯片雷达传感器会跨多个帧执行相干处理，因此需要帧之间保持相位稳定。
主机	负责控制级联中多个 AWR 器件的处理器或微控制器
数字信号处理器 (DSP)	负责处理 AWR 器件上 RX ADC 数据的 (内部或外部) 处理器
模拟	器件中的毫米波射频模拟电路和子系统
模拟配置	控制模拟操作的偏置电流、电压、电容和电阻值
偏移	针对多种误差的一种统称，例如通道间不平衡、TX 移相器非线性误差。
客户	利用 AWR 器件来制造雷达传感器 PCB 的客户。
非易失性存储器 (NVM)	传感器中的一个存储单元，可在工厂校准过程中填充信息 (例如校准结果) 并在现场读取。
工厂校准温度	执行客户工厂校准时的温度 (通常为 25°C)。
冷、中、热设置	一种命名规则，用于展示与电路板温度范围相对应的 AWR 模拟设置。
DoE、DoE 器件	实验设计以及相关器件。这指的是特意使器件制造工艺参数出现偏差来制造几种用于进行 TI 实验室评估的器件，从而捕获了解工艺偏差对器件大规模制造的影响。
INL 误差	积分非线性误差，表示 TX 移相器与理想 0° 至 360° 特性的偏差。

### A.2 参考文献

这些参考文献提供了有用的背景信息，作为本应用手册的依据。

1. [AWR1xx 和 AWR2243 雷达接口控制文档 \(\)](#)
2. [对 TI 雷达器件中的线性调频脉冲参数进行编程 \(\)](#)
3. [自校准 TI 的毫米波雷达器件 \(\)](#)

### A.3 级联一致性拟议方案的流程图

此附录部分包含多个流程图，介绍了拟议方案的客户工厂校准和现场操作过程。

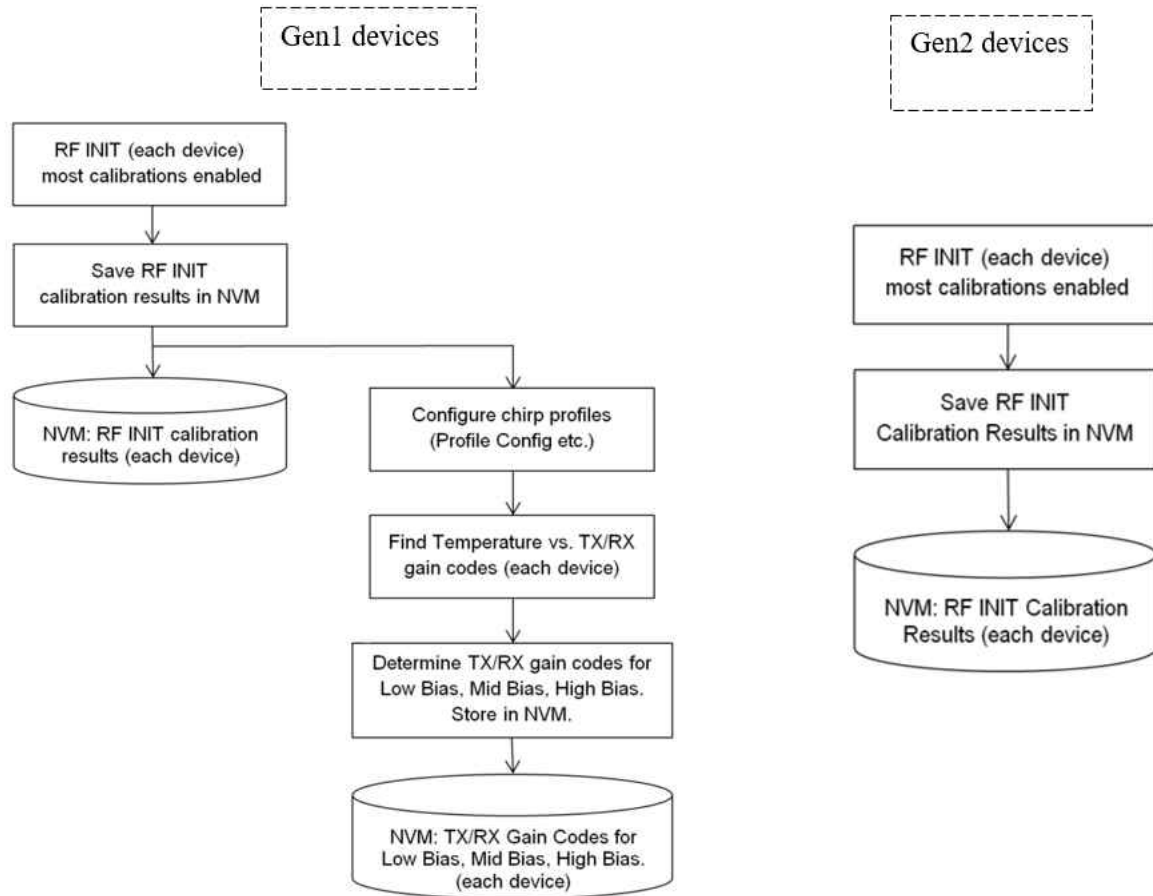


图 A-1. 客户工厂校准：保存（处理）RF INIT 校准结果



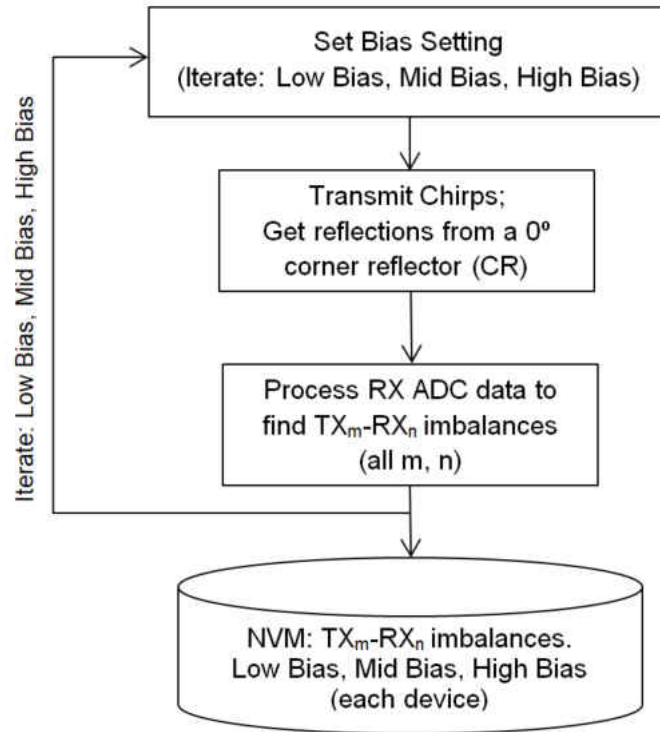


图 A-2. 在客户工厂测量不同偏置设置下的通道间不平衡

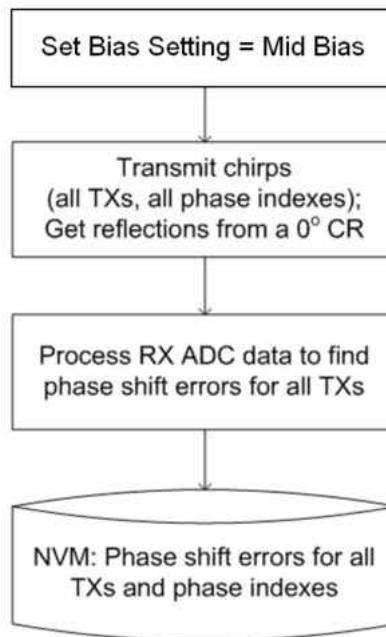


图 A-3. 在客户工厂测量 TX 移相器误差

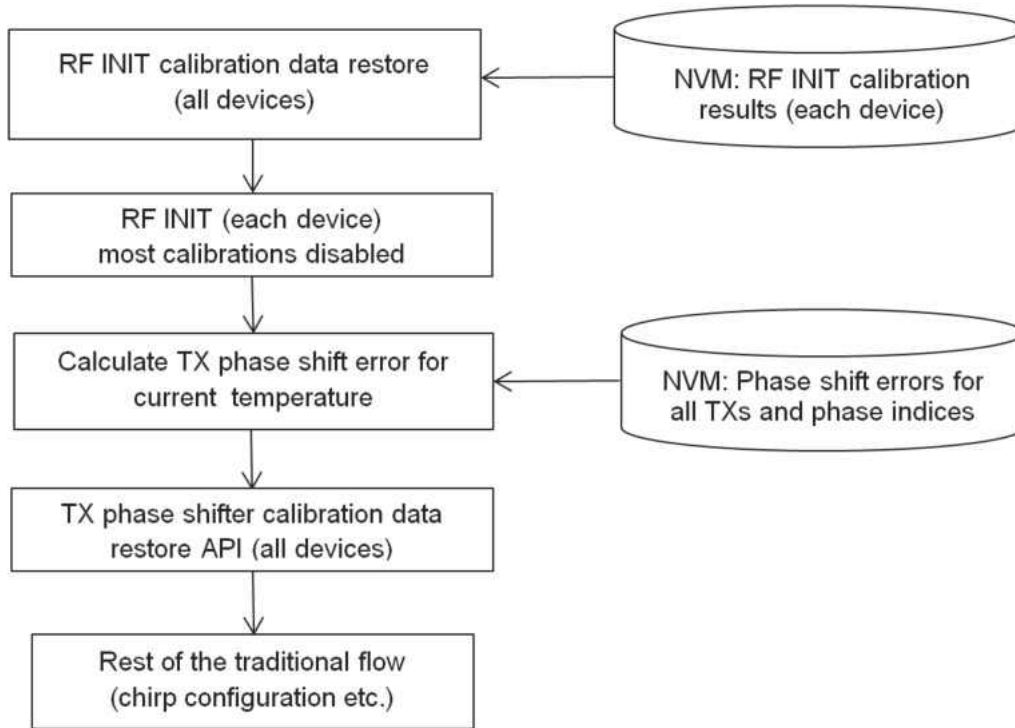


图 A-4. 现场操作：将工厂中得到的 RF INIT 校准结果恢复到器件上

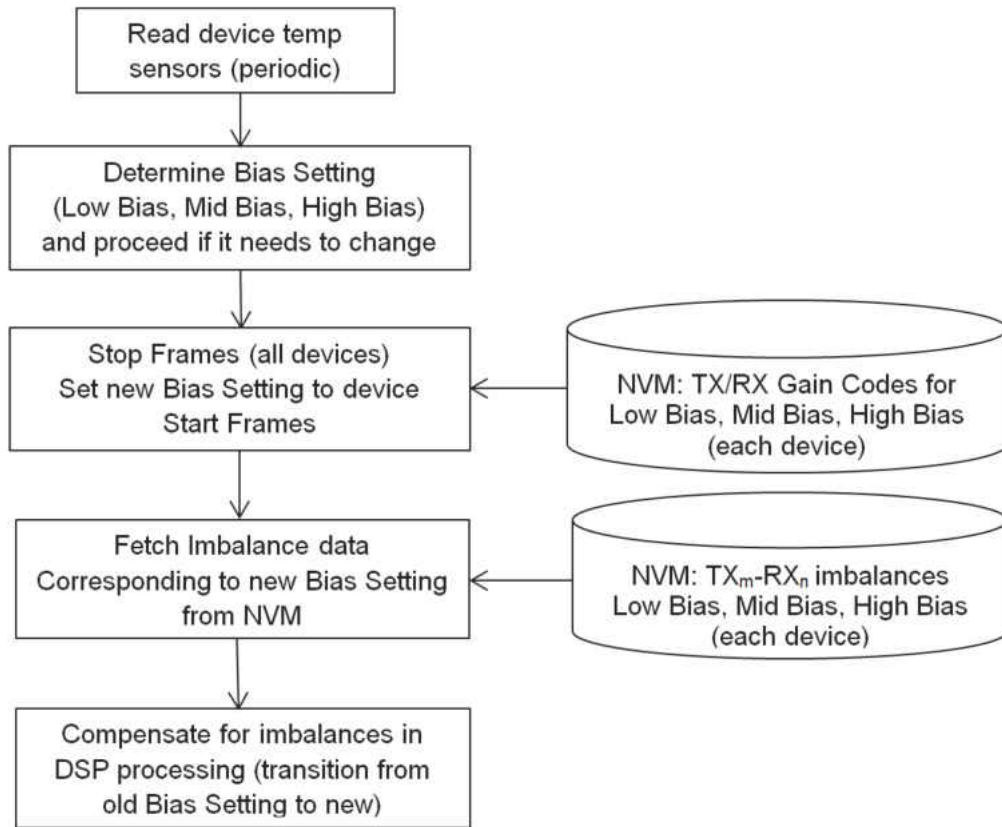


图 A-5. 现场操作：处理涉及通道间不平衡的温度转换 - 第 1 代器件

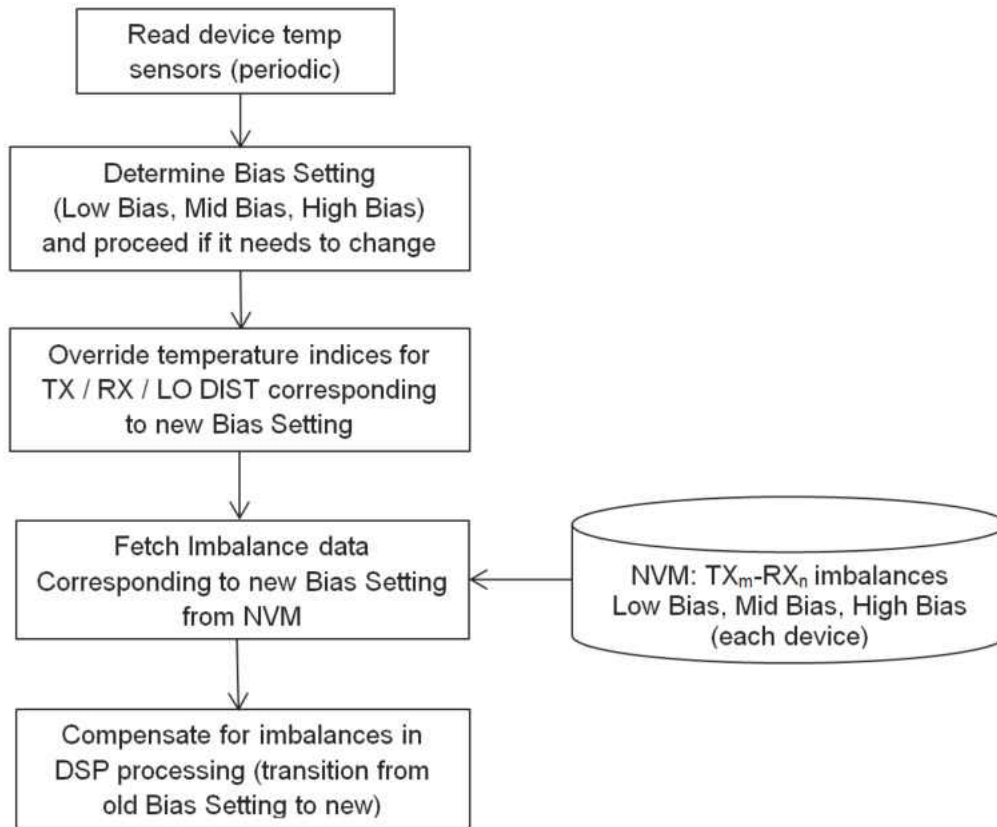


图 A-6. 现场操作：处理涉及通道间不平衡的温度转换 - AWR2243

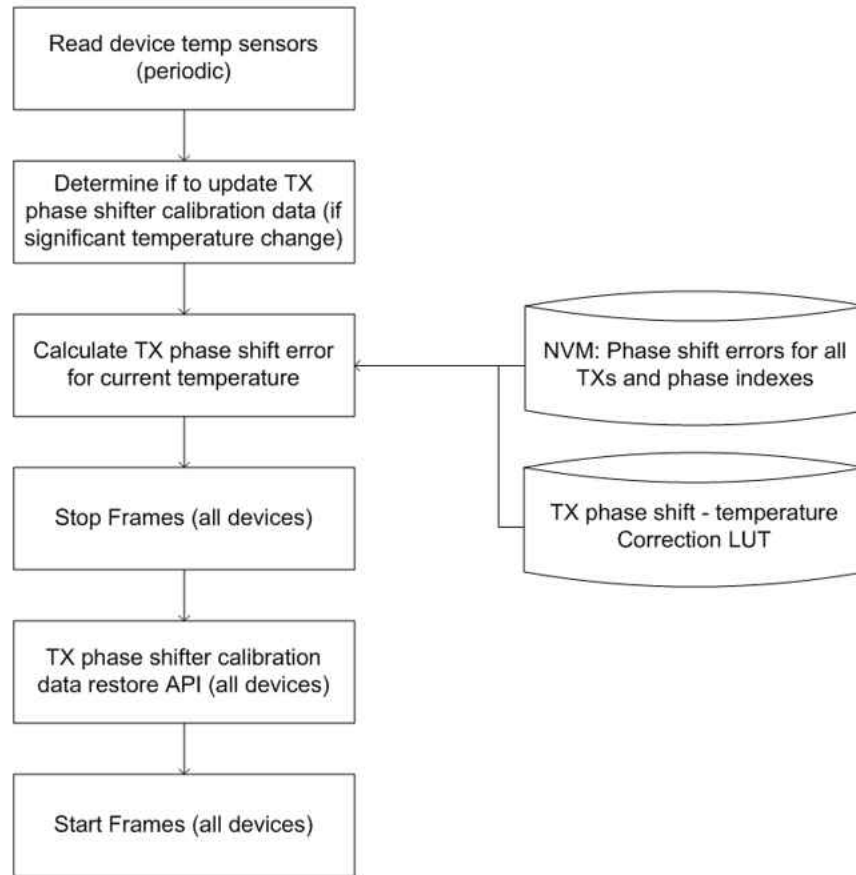


图 A-7. 现场操作：处理温度对 TX 移相器误差的影响

#### A.4 用于降低 TX 移相器温漂的 LUT

此附录部分列出了本应用手册其余部分中提到的几个查找表 (LUT)。这些 LUT 具有一些常用值，但指标对于 TX1 和 TX2/3 会略有不同。下文所列的值是在一次一个 TX 处于开启状态下获得的。如果多个 TX 同时处于打开状态，TX 之间的天线耦合可能会对相位造成次级影响。

表 A-2. AWR1843 的 TX 相移校准温度校正 LUT

TX1 的相移指数	TX2 和 TX3 的相移指数	温度校正 LUT (-40°C)	温度校正 LUT (25°C)	温度校正 LUT (85°C)	温度校正 LUT (110°C)	温度校正 LUT (120°C)
0	32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	33	0.73	0.00	-0.82	-1.28	-1.53
2	34	1.95	0.00	-2.21	-3.53	-4.07
3	35	2.81	0.00	-3.19	-5.06	-5.91
4	36	3.38	0.00	-3.81	-5.98	-6.91
5	37	3.63	0.00	-4.02	-6.29	-7.29
6	38	3.64	0.00	-3.99	-6.27	-7.18
7	39	3.45	0.00	-3.70	-5.82	-6.70
8	40	3.07	0.00	-3.10	-4.92	-5.70
9	41	2.82	0.00	-2.67	-4.32	-4.99
10	42	2.46	0.00	-2.15	-3.48	-4.11
11	43	2.18	0.00	-1.72	-2.79	-3.29
12	44	1.94	0.00	-1.46	-2.28	-2.69
13	45	1.72	0.00	-1.31	-2.11	-2.39
14	46	1.60	0.00	-1.30	-2.13	-2.37

表 A-2. AWR1843 的 TX 相移校准温度校正 LUT (continued)

TX1 的相移指数	TX2 和 TX3 的相移指数	温度校正 LUT (-40°C)	温度校正 LUT (25°C)	温度校正 LUT (85°C)	温度校正 LUT (110°C)	温度校正 LUT (120°C)
15	47	1.50	0.00	-1.41	-2.31	-2.63
16	48	1.49	0.00	-1.85	-2.93	-3.38
17	49	1.65	0.00	-2.24	-3.55	-4.12
18	50	1.94	0.00	-2.86	-4.50	-5.25
19	51	2.23	0.00	-3.29	-5.29	-6.19
20	52	2.29	0.00	-3.60	-5.76	-6.75
21	53	2.26	0.00	-3.58	-5.78	-6.77
22	54	1.95	0.00	-3.34	-5.41	-6.30
23	55	1.64	0.00	-2.83	-4.61	-5.33
24	56	1.11	0.00	-1.90	-3.13	-3.71
25	57	0.78	0.00	-1.29	-2.19	-2.62
26	58	0.36	0.00	-0.51	-0.98	-1.23
27	59	-0.02	0.00	0.07	-0.04	-0.13
28	60	-0.26	0.00	0.44	0.57	0.59
29	61	-0.41	0.00	0.57	0.81	0.89
30	62	-0.36	0.00	0.50	0.74	0.81
31	63	-0.07	0.00	0.17	0.23	0.24
32	0	0.71	0.00	-0.61	-0.98	-1.19
33	1	1.48	0.00	-1.41	-2.19	-2.60
34	2	2.62	0.00	-2.68	-4.20	-4.88
35	3	3.42	0.00	-3.55	-5.54	-6.48
36	4	3.95	0.00	-4.05	-6.38	-7.42
37	5	4.16	0.00	-4.25	-6.67	-7.74
38	6	4.18	0.00	-4.23	-6.59	-7.64
39	7	4.02	0.00	-3.94	-6.11	-7.13
40	8	3.65	0.00	-3.39	-5.33	-6.26
41	9	3.39	0.00	-3.00	-4.78	-5.61
42	10	3.05	0.00	-2.46	-4.00	-4.74
43	11	2.80	0.00	-1.94	-3.18	-3.84
44	12	2.53	0.00	-1.63	-2.69	-3.20
45	13	2.29	0.00	-1.44	-2.37	-2.83
46	14	2.09	0.00	-1.31	-2.22	-2.65
47	15	1.95	0.00	-1.33	-2.29	-2.69
48	16	1.82	0.00	-1.55	-2.65	-3.13
49	17	1.95	0.00	-1.87	-3.13	-3.68
50	18	2.25	0.00	-2.39	-4.03	-4.63
51	19	2.39	0.00	-2.83	-4.77	-5.52
52	20	2.45	0.00	-3.12	-5.23	-6.13
53	21	2.32	0.00	-3.17	-5.31	-6.19
54	22	2.00	0.00	-2.91	-4.87	-5.66
55	23	1.68	0.00	-2.32	-3.97	-4.58
56	24	1.05	0.00	-1.29	-2.33	-2.72
57	25	0.61	0.00	-0.63	-1.25	-1.51
58	26	0.08	0.00	0.18	0.07	0.01
59	27	-0.38	0.00	0.83	1.13	1.29
60	28	-0.71	0.00	1.22	1.79	2.08

表 A-2. AWR1843 的 TX 相移校准温度校正 LUT (continued)

TX1 的相移指数	TX2 和 TX3 的相移指数	温度校正 LUT (-40°C)	温度校正 LUT (25°C)	温度校正 LUT (85°C)	温度校正 LUT (110°C)	温度校正 LUT (120°C)
61	29	-0.94	0.00	1.36	2.09	2.44
62	30	-0.97	0.00	1.22	1.94	2.29
63	31	-0.74	0.00	0.91	1.45	1.70

表 A-3. 25°C 条件下 AWR2243 的工厂测量相移数组

相移指数		T <sub>Factory</sub> = 25°C 时的工厂测量相移数组	
TX1	TX2 和 TX3	76GHz 至 77GHz 频段	77GHz 至 81GHz 频段
0	32	0.00	0.00
1	33	8.97	8.98
2	34	17.88	17.77
3	35	25.67	25.04
4	36	32.66	31.68
5	37	38.97	37.75
6	38	44.71	43.18
7	39	50.06	48.15
8	40	55.06	52.86
9	41	60.02	57.41
10	42	64.69	61.93
11	43	69.38	66.49
12	44	74.20	71.09
13	45	79.75	75.94
14	46	84.92	81.34
15	47	90.80	87.24
16	48	97.26	93.67
17	49	104.68	100.97
18	50	111.28	107.55
19	51	117.04	113.37
20	52	122.33	118.76
21	53	127.20	123.75
22	54	132.11	128.38
23	55	136.30	132.80
24	56	140.08	137.21
25	57	144.28	141.39
26	58	148.44	145.71
27	59	152.64	150.23
28	60	157.17	154.87
29	61	162.02	159.84
30	62	167.43	165.41
31	63	173.44	171.59
32	0	180.23	178.61
33	1	188.25	186.52
34	2	195.58	193.98
35	3	202.61	200.59
36	4	208.16	206.47
37	5	213.73	211.70
38	6	218.76	216.51

表 A-3. 25°C 条件下 AWR2243 的工厂测量相移数组 (continued)

相移指数		T <sub>Factory</sub> = 25°C 时的工厂测量相移数组	
TX1	TX2 和 TX3	76GHz 至 77GHz 频段	77GHz 至 81GHz 频段
39	7	223.63	221.11
40	8	228.68	225.45
41	9	232.61	229.50
42	10	236.79	233.56
43	11	240.95	237.74
44	12	245.26	241.95
45	13	249.87	246.49
46	14	254.93	251.41
47	15	260.59	256.92
48	16	266.96	263.38
49	17	274.53	271.07
50	18	282.01	278.27
51	19	287.73	284.56
52	20	293.27	290.42
53	21	298.63	296.05
54	22	303.61	301.29
55	23	308.49	306.35
56	24	313.18	311.19
57	25	317.76	315.91
58	26	322.49	320.97
59	27	327.42	326.12
60	28	332.57	331.51
61	29	338.08	337.42
62	30	344.39	343.85
63	31	351.40	351.02

表 A-4. AWR2243 的 TX 相移校准温度校正 LUT

相移指数		76GHz 至 77GHz 频段的校正 LUT				77GHz 至 81GHz 频段的校正 LUT			
TX1	TX2 和 TX3	温度校正 LUT (-40°C)	温度校正 LUT (25°C)	温度校正 LUT (85°C)	温度校正 LUT (130°C)	温度校正 LUT (-40°C)	温度校正 LUT (25°C)	温度校正 LUT (85°C)	温度校正 LUT (130°C)
0	32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	33	0.31	0.00	-0.60	-0.93	0.29	0.00	-0.58	-0.77
2	34	0.54	0.00	-0.89	-1.52	0.52	0.00	-1.22	-1.86
3	35	0.77	0.00	-1.12	-1.93	0.63	0.00	-1.67	-2.67
4	36	0.94	0.00	-1.33	-2.20	0.59	0.00	-1.88	-3.09
5	37	1.06	0.00	-1.45	-2.28	0.43	0.00	-1.91	-3.14
6	38	1.12	0.00	-1.43	-2.13	0.22	0.00	-1.77	-2.90
7	39	1.08	0.00	-1.24	-1.76	0.04	0.00	-1.53	-2.42
8	40	0.95	0.00	-0.93	-1.20	-0.13	0.00	-1.22	-1.78
9	41	0.81	0.00	-0.56	-0.56	-0.28	0.00	-0.88	-1.05
10	42	0.63	0.00	-0.20	0.05	-0.44	0.00	-0.55	-0.33
11	43	0.50	0.00	0.08	0.54	-0.58	0.00	-0.28	0.28
12	44	0.41	0.00	0.24	0.83	-0.71	0.00	-0.09	0.69
13	45	0.36	0.00	0.25	0.87	-0.79	0.00	0.00	0.86
14	46	0.37	0.00	0.11	0.66	-0.81	0.00	-0.01	0.76
15	47	0.45	0.00	-0.12	0.24	-0.76	0.00	-0.12	0.42



表 A-4. AWR2243 的 TX 相移校准温度校正 LUT (continued)

相移指数		76GHz 至 77GHz 频段的校正 LUT				77GHz 至 81GHz 频段的校正 LUT			
TX1	TX2 和 TX3	温度校正 LUT (-40°C)	温度校正 LUT (25°C)	温度校正 LUT (85°C)	温度校正 LUT (130°C)	温度校正 LUT (-40°C)	温度校正 LUT (25°C)	温度校正 LUT (85°C)	温度校正 LUT (130°C)
16	48	0.62	0.00	-0.42	-0.31	-0.64	0.00	-0.30	-0.09
17	49	0.84	0.00	-0.74	-0.92	-0.47	0.00	-0.51	-0.69
18	50	1.10	0.00	-1.01	-1.48	-0.29	0.00	-0.71	-1.26
19	51	1.35	0.00	-1.20	-1.92	-0.11	0.00	-0.87	-1.72
20	52	1.56	0.00	-1.29	-2.18	0.03	0.00	-0.95	-1.98
21	53	1.69	0.00	-1.26	-2.22	0.11	0.00	-0.95	-2.01
22	54	1.73	0.00	-1.13	-2.05	0.11	0.00	-0.85	-1.79
23	55	1.68	0.00	-0.92	-1.68	0.04	0.00	-0.67	-1.37
24	56	1.54	0.00	-0.65	-1.18	-0.08	0.00	-0.43	-0.79
25	57	1.34	0.00	-0.37	-0.62	-0.24	0.00	-0.16	-0.14
26	58	1.11	0.00	-0.12	-0.08	-0.39	0.00	0.09	0.48
27	59	0.89	0.00	0.07	0.37	-0.51	0.00	0.31	0.98
28	60	0.72	0.00	0.19	0.67	-0.58	0.00	0.45	1.29
29	61	0.62	0.00	0.21	0.78	-0.57	0.00	0.50	1.37
30	62	0.61	0.00	0.14	0.68	-0.48	0.00	0.46	1.21
31	63	0.68	0.00	0.00	0.39	-0.31	0.00	0.33	0.83
32	0	0.84	0.00	-0.21	-0.05	-0.09	0.00	0.12	0.28
33	1	1.04	0.00	-0.44	-0.58	0.16	0.00	-0.12	-0.36
34	2	1.27	0.00	-0.66	-1.11	0.42	0.00	-0.37	-0.99
35	3	1.49	0.00	-0.85	-1.58	0.64	0.00	-0.59	-1.53
36	4	1.66	0.00	-0.97	-1.92	0.81	0.00	-0.75	-1.91
37	5	1.76	0.00	-1.02	-2.06	0.90	0.00	-0.82	-2.06
38	6	1.76	0.00	-0.97	-2.00	0.91	0.00	-0.80	-1.98
39	7	1.68	0.00	-0.85	-1.74	0.84	0.00	-0.68	-1.67
40	8	1.52	0.00	-0.66	-1.30	0.71	0.00	-0.49	-1.17
41	9	1.30	0.00	-0.44	-0.76	0.53	0.00	-0.24	-0.56
42	10	1.07	0.00	-0.21	-0.19	0.33	0.00	0.03	0.07
43	11	0.84	0.00	0.00	0.31	0.13	0.00	0.28	0.63
44	12	0.67	0.00	0.15	0.67	-0.03	0.00	0.47	1.03
45	13	0.57	0.00	0.23	0.82	-0.13	0.00	0.57	1.22
46	14	0.57	0.00	0.22	0.73	-0.18	0.00	0.57	1.16
47	15	0.66	0.00	0.13	0.41	-0.15	0.00	0.46	0.86
48	16	0.83	0.00	-0.03	-0.10	-0.06	0.00	0.26	0.36
49	17	1.06	0.00	-0.22	-0.72	0.09	0.00	0.00	-0.26
50	18	1.31	0.00	-0.41	-1.33	0.27	0.00	-0.29	-0.90
51	19	1.55	0.00	-0.57	-1.84	0.48	0.00	-0.55	-1.46
52	20	1.73	0.00	-0.66	-2.14	0.69	0.00	-0.74	-1.85
53	21	1.83	0.00	-0.67	-2.18	0.88	0.00	-0.82	-2.01
54	22	1.85	0.00	-0.58	-1.95	1.01	0.00	-0.78	-1.89
55	23	1.77	0.00	-0.43	-1.51	1.07	0.00	-0.62	-1.53
56	24	1.61	0.00	-0.23	-0.95	1.02	0.00	-0.35	-0.97
57	25	1.39	0.00	-0.03	-0.39	0.86	0.00	-0.03	-0.32
58	26	1.13	0.00	0.14	0.06	0.62	0.00	0.29	0.33
59	27	0.85	0.00	0.25	0.36	0.30	0.00	0.55	0.86

表 A-4. AWR2243 的 TX 相移校准温度校正 LUT (continued)

相移指数		76GHz 至 77GHz 频段的校正 LUT				77GHz 至 81GHz 频段的校正 LUT			
TX1	TX2 和 TX3	温度校正 LUT (-40°C)	温度校正 LUT (25°C)	温度校正 LUT (85°C)	温度校正 LUT (130°C)	温度校正 LUT (-40°C)	温度校正 LUT (25°C)	温度校正 LUT (85°C)	温度校正 LUT (130°C)
60	28	0.56	0.00	0.32	0.59	0.10	0.00	0.69	1.17
61	29	0.32	0.00	0.37	0.71	-0.11	0.00	0.68	1.20
62	30	0.15	0.00	0.40	0.66	-0.18	0.00	0.57	0.98
63	31	0.15	0.00	0.31	0.27	-0.12	0.00	0.45	0.66

### A.5 TX 移相器校准数据保存和恢复 API 的循环移位

如 ICD 中所述，在保存和恢复相位校正码时需要一个相移值的循环移位，以便克服器件数据存储和移相器电路内存在的一些小限制。该行为在各 TX 上会有所不同。这里介绍了每个 TX 对应的情况。

在 TX2 和 TX3 上，对于各功能 API（例如 Profile Config 和 Per Chirp Phase Shifter 等）所对应的移相器设置/索引 n=0 至 63，必须从 TX2 和 TX3 相位校准数据保存/恢复 API 的以下字节位置检索校准数据或将校准数据恢复到这些字节位置。

表 A-5. TX2 和 TX3 相移校准数据保存/恢复 API 的循环移位

n	所需相移	保存和恢复 API 数据包中的字节位置
49	49*5.625 度	字节[1]，字节[0]
50	50*5.625 度	字节[3]，字节[2]
51	51*5.625 度	字节[5]，字节[4]
:	:	:
62	62*5.625 度	字节[27]，字节[26]
63	63*5.625 度	字节[29]，字节[28]
0	0*5.625 度	字节[31]，字节[30]
1	1*5.625 度	字节[33]，字节[32]
2	2*5.625 度	字节[35]，字节[34]
:	:	:
47	47*5.625 度	字节[125]，字节[124]
48	48*5.625 度	字节[127]，字节[126]

在 TX1 上，对于各功能 API（例如 Profile Config 和 Per Chirp Phase Shifter 等）所对应的移相器设置/索引 n=0 至 63，必须从 TX1 相位校准数据保存/恢复 API 的以下字节位置检索校准数据或将校准数据恢复到这些字节位置。

表 A-6. TX1 相移校准数据保存/恢复 API 的循环移位

n	所需相移	保存和恢复 API 数据包中的字节位置
17	17*5.625 度	字节[1]，字节[0]
18	18*5.625 度	字节[3]，字节[2]
19	19*5.625 度	字节[5]，字节[4]
:	:	:
62	62*5.625 度	字节[91]，字节[90]
63	63*5.625 度	字节[93]，字节[92]
0	0*5.625 度	字节[95]，字节[94]
1	1*5.625 度	字节[97]，字节[96]
2	2*5.625 度	字节[99]，字节[98]
:	:	:
15	15*5.625 度	字节[125]，字节[124]

表 A-6. TX1 相移校准数据保存/恢复 API 的循环移位 (continued)

n	所需相移	保存和恢复 API 数据包中的字节位置
16	16*5.625 度	字节[127]，字节[126]

## 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