

## ADF7021、ADF7021-N和ADF7021-V的镜像抑制校准

作者: Michael Dalton

### 简介

外差无线电(例如ADF7021系列收发器)利用混频器将接收到的RF信号下变频至中频(IF)。混频器的输出包含需要的频率成分和不需要的镜像频率成分。镜像频率处的干扰信号可能会降低接收机的灵敏度,导致目标信道上的信号丢失。

理论上,采用IQ接收架构的收发器可以配置为无限地抑制镜像频率的影响。该理论假设混频器正交路径的增益平衡和相位正交性完全一致。实际应用中,由于混频器不完美,会存在一些不平衡。镜像校准过程通过数字控制寄存器调整混频器的增益和相位,直到正交信号实现最佳平衡,提供最大的镜像抑制能力。

本应用笔记提供有关镜像频率产生机制的信息,并介绍在ADF7021、ADF7021-N和ADF7021-V上如何实现镜像校准。

### 缩写词

本应用笔记中用到了以下缩写词:

- 中频(IF)
- 信号的同相和正交成分(IQ)
- 镜像抑制(IR)
- 射频(RF)
- 接收信号强度指示(RSSI)

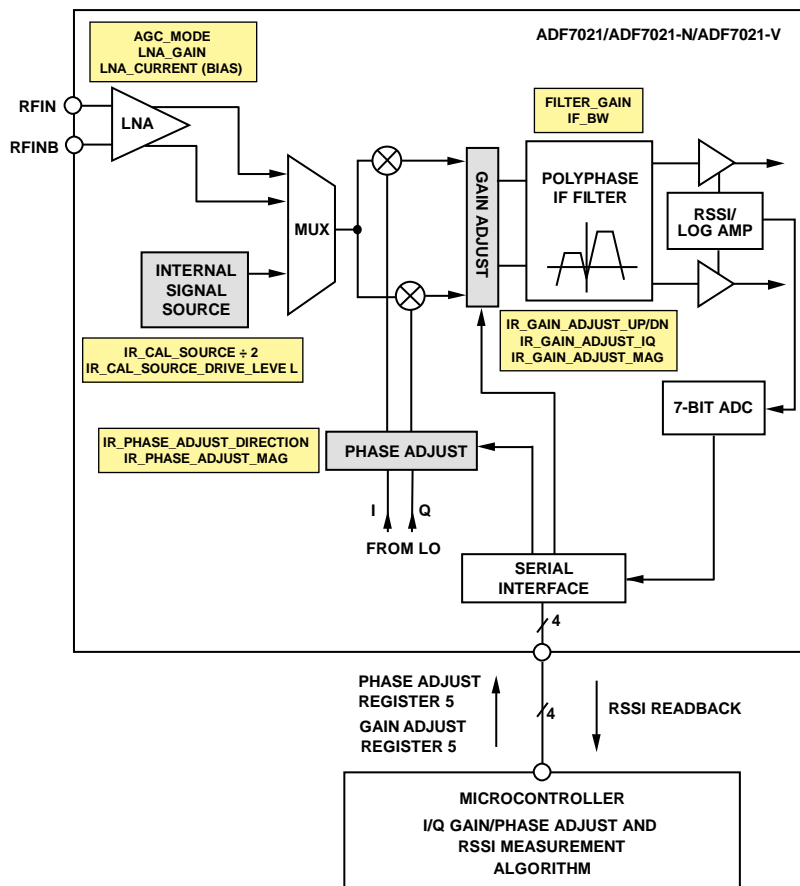


图1. 镜像校准功能模块图

## 目录

简介.....	1	内部信号音设置.....	5
缩写词.....	1	蛮力扫描.....	7
修订历史.....	2	梯度下降算法概述.....	9
实现镜像校准.....	3	梯度下降算法终止条件.....	10
镜像频率机制.....	3	其他考虑因素.....	11
镜像校准概述.....	3		
寄存器设置.....	4		

## 修订历史

2013年11月—修订版0：初始版

## 实现镜像校准

### 镜像频率机制

图2显示有两个信号施加于正交接收机的输入端。

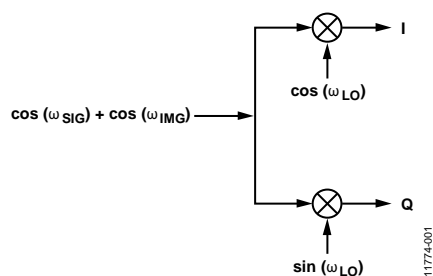


图2. 正交接收机

对于ADF7021系列器件，中频 $\omega_{IF}$ 设置为100 kHz。公式1描述了这种机制。

$$\omega_{SIG} - \omega_{LO} = \omega_{IF} = 100 \text{ kHz} \quad (1)$$

如果在比 $\omega_{LO}$ 低200 kHz的 $\omega_{IMG}$ 处存在另一个信号，则在 $-\omega_{IF}$ 处也会产生一个信号，它会干扰 $+\omega_{IF}$ 处的目标信号。这就是镜像频率。公式2描述了这种机制。

$$\omega_{IMG} - \omega_{LO} = -\omega_{IF} = -100 \text{ kHz} \quad (2)$$

图3显示了这些频率的相对位置。

理论上，如果I和Q路径之间的增益平衡和相位正交性完全一致，就可以无限地抑制镜像频率成分。镜像校准程序确定正交路径最佳匹配的增益和相位设置。

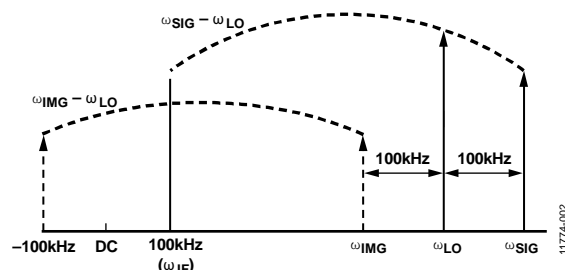


图3. ADF7021系列器件的频率

### 镜像校准概述

镜像校准按如下方法执行：施加一个镜像频率的信号音，监视幅度，然后利用增益和相位调整寄存器设置进行衰减。

图1给出了ADF7021系列器件的镜像校准功能框图。RSSI通过7位片内ADC回读。增益和相位通过对寄存器5执行数字寄存器写操作来调整，然后重复RSSI回读操作。

重复该过程，直至找到使RSSI值最小的增益和相位值。

镜像频率的信号音既可以利用外部信号源提供，也可以是内部生成的信号音。本应用笔记将详细说明如何产生内部信号音。

为了找到最佳增益和相位值，既可以使用蛮力法，也可以使用梯度下降算法。蛮力法就是穷尽所有可能的增益和相位值。梯度下降算法是一种行之有效的寻找RSSI最小值算法，所需的操作少于蛮力扫描法。本应用笔记将详细说明这一算法。

# AN-1258

## 寄存器设置

表1概要说明了校准过程中调整的主要寄存器。表中的“注释”栏给出了推荐值。图3也显示了这些参数。

表1. 寄存器设置

设置	寄存器	注释
Tx/Rx	R0_DB27	设置器件为发射或接收模式。要求的设置是“接收”(十进制1)。
IR_CAL_SOURCE ÷ 2	R6_DB30	影响内部信号音的功率。推荐设置是“开启”(十进制1)。
IR_CAL_SOURCE_DRIVE_LEVEL	R6_DB[28:29]	影响内部信号音的功率。推荐设置是“高”(十进制3)。
IR_GAIN_ADJUST_UP/DN	R5_DB31	决定施加的电平是增强还是衰减。建议仅使用“衰减”(十进制1)。
IR_GAIN_ADJUST_I/Q	R5_DB30	设置增益调整是应用于I通道(十进制0)还是Q通道(十进制1)。
IR_GAIN_ADJUST_MAG	R5_DB[25:29]	在衰减模式下, 仅使用4个增益调整水平位(设置0至15)。 在增益模式下, 可以使用所有5位(设置0至31)。 然而, 5位的结果会绕回, 因此建议不要使用。
IR_PHASE_ADJUST_DIRECTION	R5_DB24	设置相位调整是应用于I通道(十进制0)还是Q通道(十进制1)。
IR_PHASE_ADJUST_MAG	R5_DB[20:23]	设置相位调整水平。
IF_CAL_COARSE	R5_DB4	设置“执行校准”(十进制1)。不需要精密校准。
AGC_MODE	R9_DB[18:19]	设置校准期间“手动”(十进制1)。
LNA_GAIN	R9_DB[20:21]	外部信号音的最佳设置取决于所施加信号音的功率。 使用内部信号音时的推荐设置是“低”(十进制0), 确保天线拾取的镜像频率的外部噪声影响最小。 虽然信号音是在LNA之后注入, 但该设置仍会影响 内部信号音的功率。试图提高内部信号音的功率时, LNA增益只能用作最后的手段。
FILTER_GAIN	R9_DB[22:23]	影响内部和外部信号音的功率。最佳设置取决于所施加 外部信号音的功率或内部源功率水平的配置。
LNA_CURRENT (BIAS)	R9_DB[26:27]	默认值为“默认值”(十进制0)。使用内部信号音时, 应将其提高到“高”(十进制3), 目的是隔离RFIN引脚 上的任何噪声, 防止校准失真。
DEMODO_CLK_DIVIDE	R3_DB[6:9]	设置DEMODO_CLK, 即内部信号音的基频。将其设置为 尽可能小的值以增强信号音。根据XTAL的值, 可能需要提高此值以产生接近工作频率的信号音。
IF_BW	R4_DB[30:31]	设置为“最宽设置”(十进制2)。

## 内部信号音设置

内部信号音由DEMOD\_CLK的整数倍频率产生。信号音的功率随所用的参考晶体和RF频段而变化。因此，需要进行一定的评估以获得产生信号音的最佳设置。评估的目标是产生一个足够强的信号音，以便在扫描增益和相位时，能够提供相当大的RSSI摆幅。

表1列出了产生信号音所要调整的寄存器设置。本部分说明产生信号音的机制和方法。

$$DEMOD\ CLK = \frac{XTAL}{DEMOD\_CLK\_DIVIDE}$$

$$Internal\ RF\ Tone = DEMOD\_CLK \times N$$

其中，N=1、2、3...，或者

$$Internal\ RF\ Tone = \frac{DEMOD\_CLK}{2} \times N$$

当IR\_CAL\_SOURCE ÷ 2 = ON时。

ADF7021系列收发器应编程如下

$$ADF7021\ RF = Internal\ RF\ Tone + 200\ kHz$$

建议DEMOD\_CLK\_DIVIDE保持较低的值以产生更强的信号音。奇次谐波也能产生较强的信号音(其中N=1、3、5、...)。

例如，考虑以下情况：

$$RF\ 频段 = 868\ MHz$$

$$XTAL = 19.68\ MHz$$

$$DEMOD\_CLK\_DIVIDE = 2$$

$$IR\_CAL\_SOURCE \div 2 = ON$$

$$DEMOD\ CLK = \frac{19.68\ MHz}{2} = 9.84\ MHz$$

$$Fundamental\ Tone = \frac{9.84\ MHz}{2} = 4.92\ MHz$$

其中，N = 177，Internal RF Tone = 870.84 MHz。

将收发器编程为：

$$870.84\ MHz + 200\ kHz = 871.04\ MHz$$

虽然内部信号音并不是恰好在868 MHz处产生，但870.84 MHz处获得的结果是对868 MHz处的最佳校准值的良好估计。务必选择最接近工作频段中心的奇次谐波。

定义表1中列出的寄存器之后，按照图4所示的步骤设置内部信号音。在流程图中标有TONE PRESENT?(信号音存在?)的步骤，执行RSSI回读。图5更详细地说明了该步骤。

执行RSSI回读时，从ADC读出0到80之间的值。并无必要将此值转换为以1 mW为基准的RSSI dB值(dBm)，不过产品数据手册中说明了转换方法。

ADC值为0时，可以认为它是一个很弱的信号音；值80则对应一个很强的信号音。

如流程图所示，判断是否产生了一个适当的信号音时，应将器件设置为I/Q范围的极端值并回读RSSI。这是因为，RSSI最小值可能位于当前I/Q设置的附近，这可能会让用户误认为存在弱信号音。

建议多次回读RSSI值并取平均值。流程图要求读取10次，但在必要时，也可以减少读取次数，其影响是最小值附近的精度会降低。

理想情况下，未校准的回读值在60到80之间。这样在搜索最小RSSI时，值的摆幅足够大。如果RSSI的连续回读结果不一致，变化幅度在0到30之间，那么接收机上可能仅存在噪声。图4右侧流程图中列出了纠正这种情况并提高信号音功率的步骤。

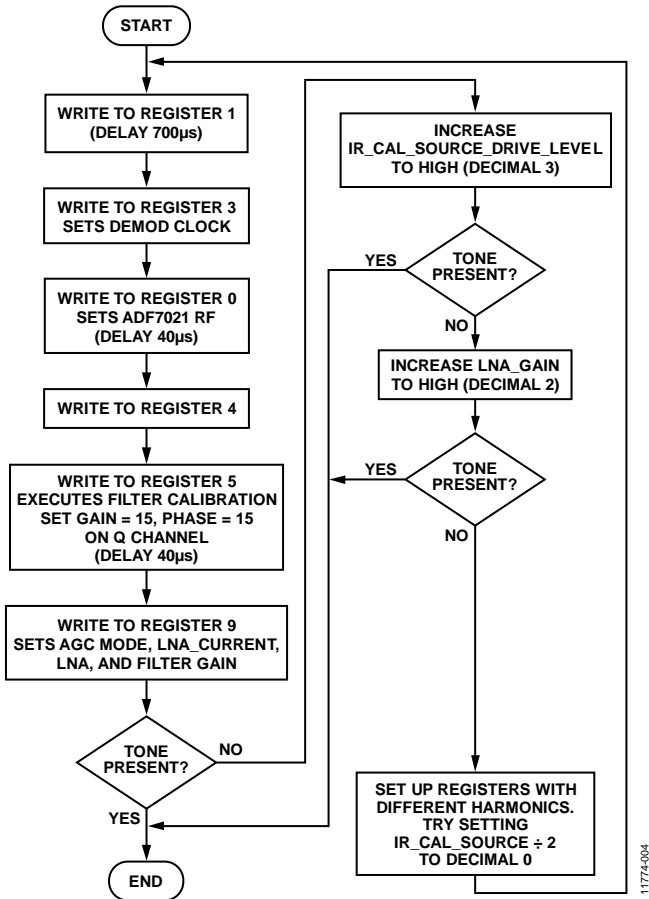


图4. 内部信号音设置

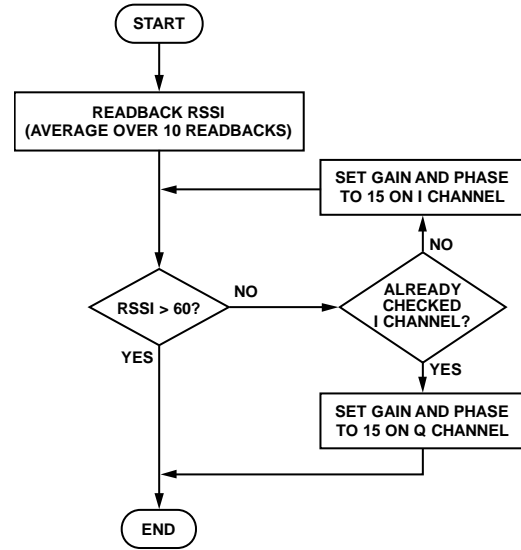


图5. 判断信号音是否存在的程序

## 蛮力扫描

图6给出了扫描所有I/Q增益和相位值的建议方法。结果数组包含 $31 \times 31 = 961$ 个RSSI值。最小值代表最佳设置。

注意，如果使用增益模式，而不是衰减模式，则结果数组将包含 $63 \times 31 = 1953$ 个RSSI值。但在这种模式下，结果会绕

回，2D表面上将有两个相同的最小值。因此，使用增益模式并无好处。

图7显示了采用IR\_Sweep\_Cal软件获得的结果数组示例。该软件由ADI公司提供，与评估软件一起安装。

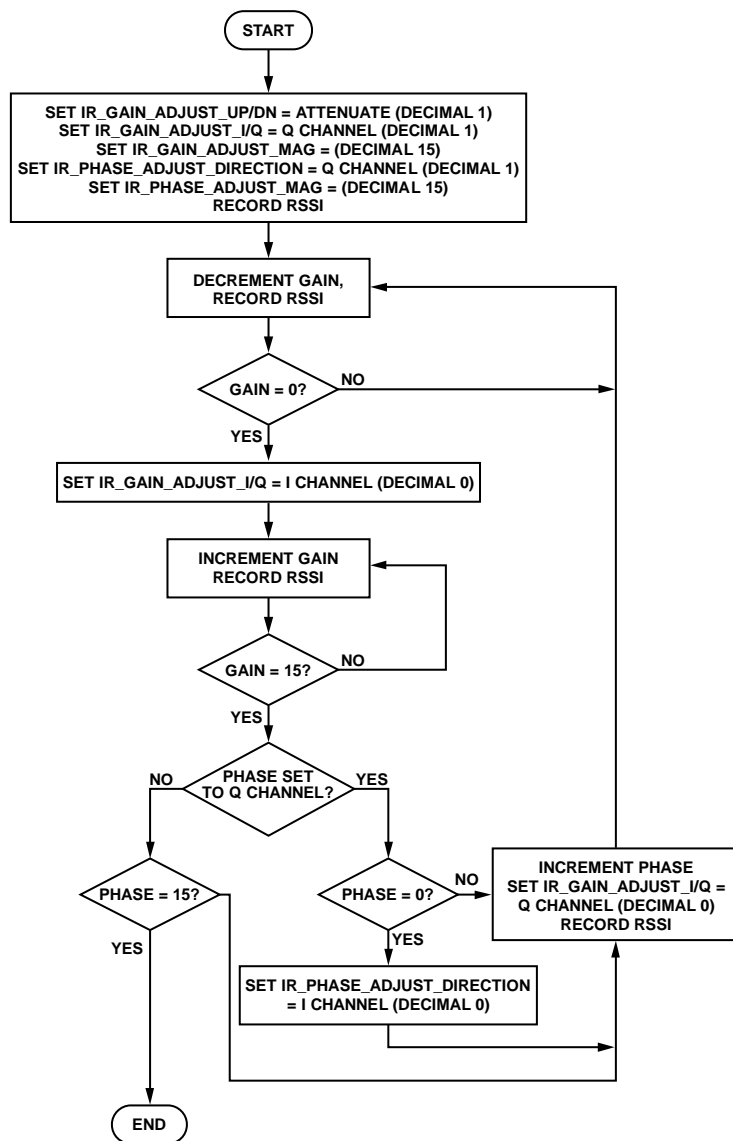


图6. 蛮力程序

11774-006

# AN-1258

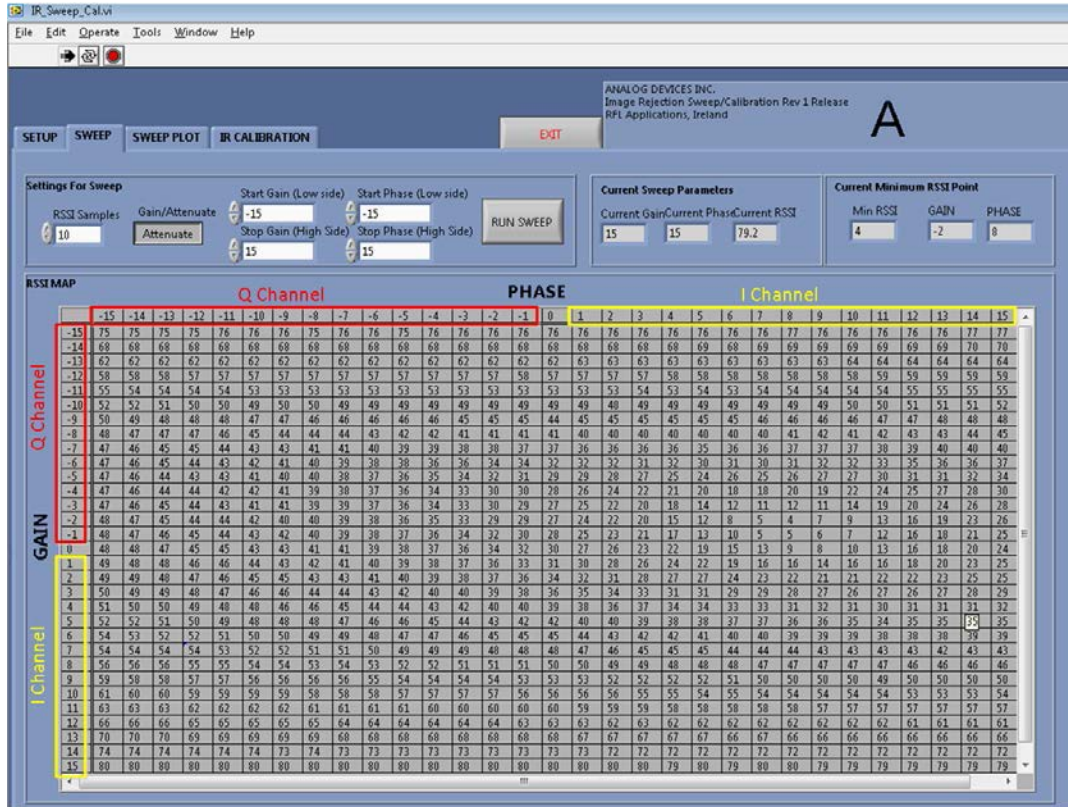


图7. 蛮力扫描结果示例



## 梯度下降算法概述

此算法比蛮力扫描更有效率。计算2D表面上一点的梯度可产生一个朝向最佳校准值的矢量。该算法以迭代方式工作。必须提供初始条件，作为控制表面的起始坐标。测量起始点的梯度，然后根据其幅度和符号，选择下一个与起始点相同或相距1单位的点。重复梯度测量程序，直到满足终止条件为止。

这里将描述一个单次迭代示例，如图8所示。假设A点为迭代的起始点。

要测量x(增益)轴的梯度，将x轴值提高1至B点。测量B点的镜像信号功率，称之为 $IP_B$ 。

增益梯度计算如下： $\Delta Gain = IP_A - IP_B$ 。

要测量y(相位)轴的梯度，将y轴值提高1至C点。测量C点的镜像信号功率，称之为 $IP_C$ 。

相位梯度计算如下： $\Delta Phase = IP_A - IP_C$ 。

如果B点的镜像抑制优于A点，则 $\Delta Gain > 0$ ，增益应提高1。如果 $\Delta Gain < 0$ ，增益应降低1。如果 $|\Delta Gain| \ll |\Delta Phase|$ ，则增益梯度与相位梯度相比不明显，增益坐标将保持不变。

对于相位梯度计算，采用与增益梯度相同的逻辑。假设终止条件未得到满足，则下一次迭代的起始点可以是A点周围8个坐标中的任意坐标。

图9中的流程图详细说明了这些步骤。

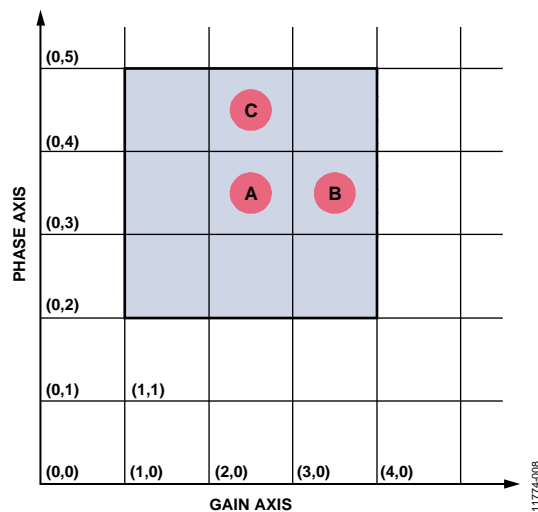


图8. 梯度下降算法的一次迭代

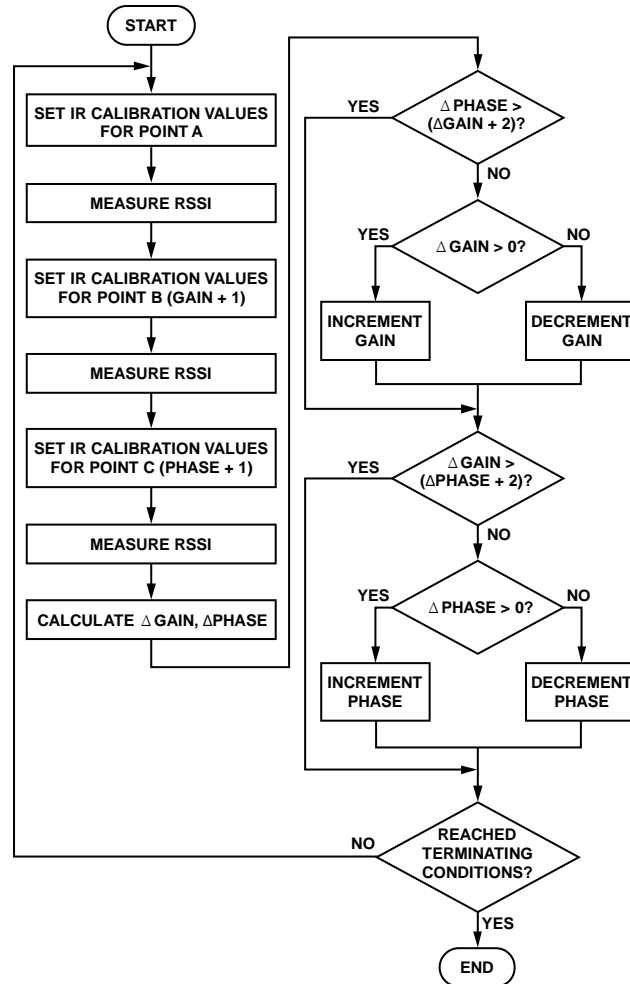


图9. 梯度下降算法流程图

### 梯度下降算法终止条件

梯度下降算法持续迭代，直至找到最小值或用户确信无法找到最小值为止。

第一个终止条件是找到最小值。实现原理是使用一个变量 (*best*) 来存储测得的最低镜像功率和对应的坐标。

算法的每次迭代都会选择一个新的中心(A点)。如果在A点测得的镜像功率低于现有最佳值，则A点成为新的*best*值，*best*更新为该值和A点的坐标。

如果A点的值不比现有*best*好，则它是一个次优校准点，标为*suboptimal*的计数器递增。如果此计数器达到一个阈值 (*x*)，则*x*指向*best*中的点，校准未使其得到改善。这种情况下，*best*中存储的点被视为最佳结果，算法停止迭代。建议将次优计数器的最大允许值设为5。

对于算法的每次迭代，迭代计数器都会递增。如果此计数器超过某一较大的数，则说明无法找到唯一最佳点，算法终止。*best*中存储的值是最佳点。建议将此计数器的最大允许值设为50。

图10中的流程图显示了这些步骤。

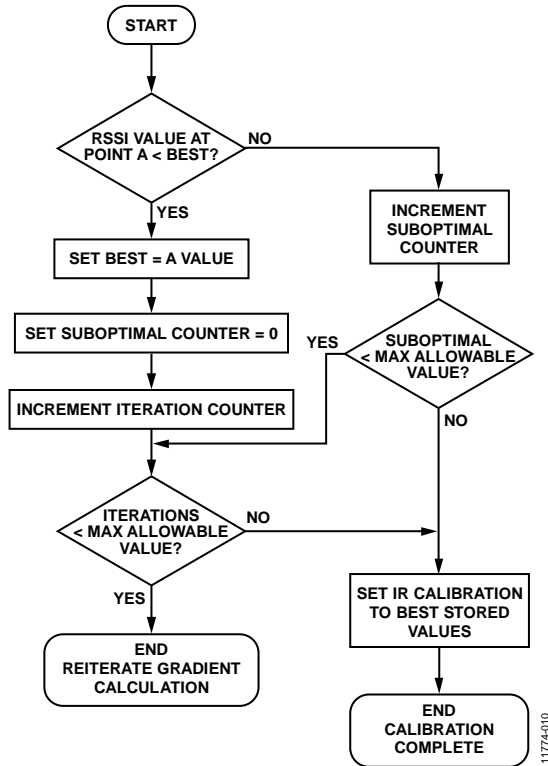


图10. 梯度下降算法终止条件

### 其他考虑因素

ADI公司提供IR校准评估软件，它包括在ADF7xxx评估软件中。

最佳校准值随温度而变化。图11显示了镜像抑制随温度的变化。当温度改变20°C时，建议重新校准。片内温度传感器可检测这种温度变化。ADF7021、ADF7021-N和ADF7021-V数据手册说明了如何读取温度传感器。注意，回读温度传感器时，ADF7021系列器件必须切换到发射模式。此外，必须写入R8\_DB8以使能ADC。

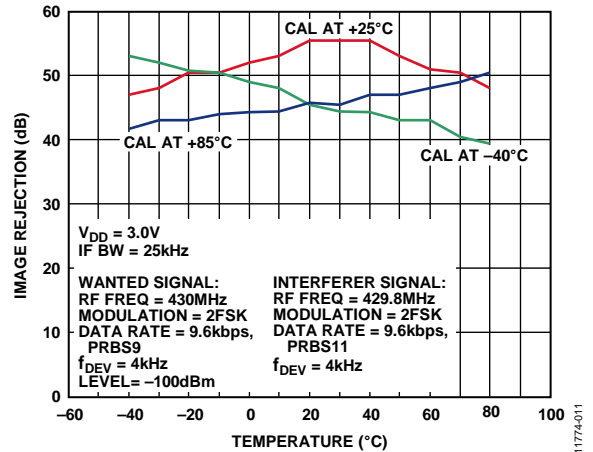


图11. 温度为-40°C、+25°C和+85°C时，初始校准后镜像抑制随温度的变化

**注释**