

Application Note

AFE7950-SP 单粒子效应检测



Shaily Jain, Nikhil Jain, Srinivas Murthy, Aleena Paul

摘要

AFE7950-SP 支持通过配置寄存器 (位) 监测、SNR 监测和 RX 偏置监测等监测技术来检测单粒子效应 (SEE)，如单粒子翻转和功能中断。固件通过触发警报来帮助检测辐射引发的事件，从而使外部主机能够从这些事件中恢复。

可触发配置寄存器 (位) 监测，以定期监测整个器件的配置寄存器组，并将其值与黄金参考值进行比较。黄金参考值是指在器件按预期用例配置完成后计算出的寄存器组奇偶校验值。如果某个位翻转，表示发生了单粒子翻转 (SEU) 事件，则会触发警报。

可通过 SNR 和 RX 偏置监测来检测单粒子功能中断 (SEFI)，并在专门用于 SEFI 的另一个 GPIO 警报引脚上发出信号。SNR 监测针对用户指定的频段提供并检查所有通道的 SNR。不同通道可使用不同的监测频段。通过器件内部的 FFT 引擎针对指定频段计算 SNR，并与用户可编程的触发 GPIO 警报的阈值进行比较。RX 偏置监测定期监测接收通道和反馈通道的偏置电压，当偏置电压超出规格时触发警报。

内容

1 简介.....	2
2 要求.....	3
3 配置 AFE79xx Latte Python 脚本.....	4
4 器件配置后.....	6
4.1 配置 SNR 监测参数.....	6
4.2 计算黄金参考值.....	8
4.3 启动监测.....	8
4.4 读取警报.....	8
4.5 设置监测周期.....	9
4.6 停止监测.....	10
5 配置后的动态更改.....	11
6 结果.....	12
7 恢复措施.....	13
8 参考资料.....	13

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

在 AFE7950-SP 针对预期用例配置完成后，用户必须提示固件计算当前寄存器组的奇偶校验值，作为黄金参考基准。计算出黄金参考值后，用户必须启用位监测。

对于 SNR 监测，用户必须指定用于监测所需通道本底噪声的频段以及相应的阈值。在这里，用户可以灵活地为每个通道独立选择监测频段和阈值。在指定频段时，必须注意，被监测的频段不应接收或发射任何信号，以避免任何虚警。完成频段和阈值配置后，用户即可开始监测所需通道，并通过 GPIO 或警报回读 CAPI 检查是否触发了任何警报。

类似地，对于 RX 偏置监测，用户可以启用需要监测的通道并启动监测，以检查是否发生了任何 SEFI 事件。

为了检测任何 SEU 或 SEFI 事件，有两个专用 GPIO 来分别指示。

如果发生了 SEFI 事件，以下机制会触发警报，可在 GPIO 引脚上观察到。请注意，只要以下任一机制失效，就会触发警报。

1. **SnrMonitor**：指示在监测频段内 SNR 已恶化并超出设定的阈值。
2. **RxBiasMonitor**：指示 RX 偏置超出规格。
3. **FwHungStatus**：指示看门狗计时器超时，意味着固件功能已失效。

如果发生 SEU 事件，可通过另一个 GPIO 引脚发出错误信号，让外部主机能够采取适当的措施。

1. **BitMonitor**：指示受监测的寄存器映射中发生了位翻转。

固件无法确定受 SEU 影响的寄存器会对性能造成灾难性影响还是无足轻重。因此，TI 建议主机系统采取适当的纠正措施。

上述监测技术完全在后台运行，不影响数据路径、延迟或 JESD 的正常工作。不过，对于 TX SNR 监测，由于信号在 TX 输出端被分接以在反馈通道上进行监测，预计功率会有小幅下降（小于 0.4dB）。

图 1-1 和图 1-2 演示了不同通道的 SNR 监测机制。

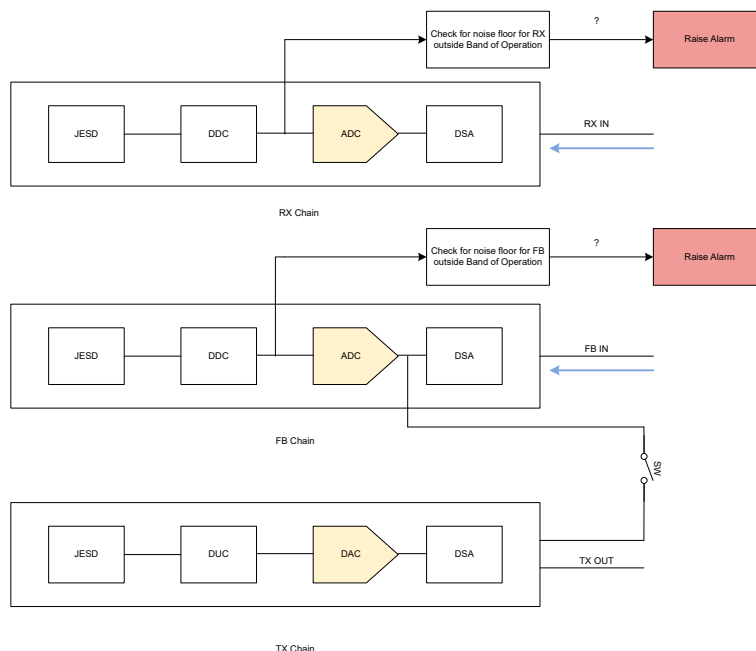


图 1-1. 在 RX 和 FB 上检查 SNR

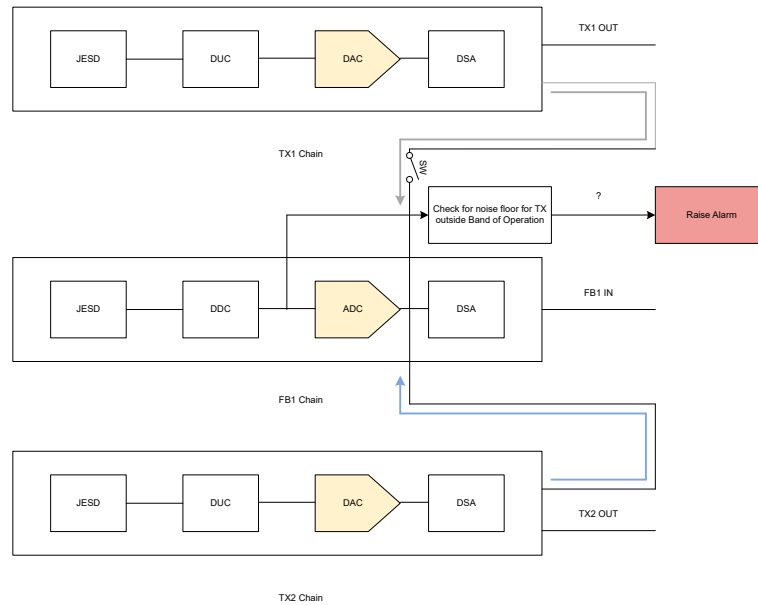


图 1-2. 通过 FB 上的回送在 TX 上检查 SNR

2 要求

在使用监测功能时，用户必须确保满足以下条件：

1. 反馈通道用于 TX SNR 监测，因此不得用于数据接收。
2. 必须确保两个反馈通道均具备外部 100 Ω 差分终端。
3. RX 通道无此要求。
4. SNR 监测频段的选择必须保证该频段内没有信号，且不得包含任何外部阻挡物。频段选择不当或信号泄漏到监测频段内可能会触发虚警。

3 配置 AFE79xx Latte Python 脚本

从 AFE79xx Latte V3.0 开始，已集成 SEFI 检测固件。安装 Latte 后，在将器件配置为所需模式时，设置以下参数：

1. `sysParams.isAFE7950SP = 1`

2. `sysParams.intPinsParams`：可以启用并监测来自各种模块（例如 JESD、PLL、位监测、SNR 监测、RX 偏置监测和固件看门狗超时）的多个警报。AFE7950-SP 提供了两个中断引脚：ALARM1 和 ALARM2。SEFI 和 SEU 事件可分别通过 ALARM1 和 ALARM2 触发。

格式：`sysParams.intPinsParams[alarmNo][<parameter>] = True/False`

示例：`sysParams.intPinsParams[0][ 'SNRMonitor' ]=True`

True = 已为该引脚启用警报

False = 未为该引脚启用警报

表 3-1. 不同警报的说明

参数	默认值和格式	说明
BitMonitor	1/True	配置寄存器组中的 SEU 事件。
FwHungStatus	1/True	看门狗计时器超时。
JESD	1/True	JESD 错误。
PLL	1/True	PLL 失锁。
SNRMonitor	1/True	SNR 恶化并低于某一阈值。
RxBiasMonitor	1/True	RX 偏置超出规格。

将“SNRMonitor”、“RxBiasMonitor”和“FwHungStatus”分配到 ALARM1，将“BitMonitor”分配到 ALARM2。

```
sysParams.intPinsParams[0]['BitMonitor']=0
sysParams.intPinsParams[0]['FwHungStatus']=1
sysParams.intPinsParams[0]['SNRMonitor']=1
sysParams.intPinsParams[0]['RxBiasMonitor']=1
sysParams.intPinsParams[1]['SNRMonitor']=0
sysParams.intPinsParams[1]['RxBiasMonitor']=0
sysParams.intPinsParams[1]['BitMonitor']=1
sysParams.intPinsParams[1]['FwHungStatus']=0
```

3. `sysParams.gpioMapping = {'M15':'ALARM1','L14':'ALARM2'}`

配置中断后，将它们分配到 GPIO M15 和 L14。参考下面的示例，其中 ALARM1 和 ALARM2 中断分别通过 GPIO M15 和 L14 输出。

4. `FbEnable = [True, True]`

为了监测 TX，需要使用 FB 通道，因此必须在启动配置中启用它们。TX1 和 TX2 通过 FB1 监测，TX3 和 TX4 通过 FB2 监测。因此，需要相应地设置 *FbEnable*。其他与反馈通道相关的参数可参照 RX 进行设置。

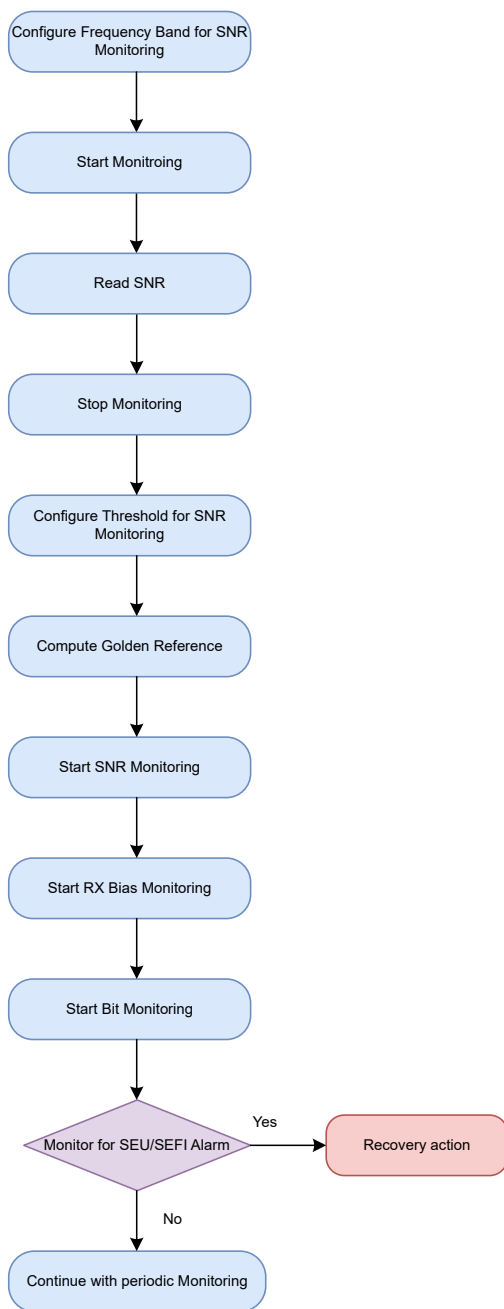


图 3-1. 首次启动后的操作顺序

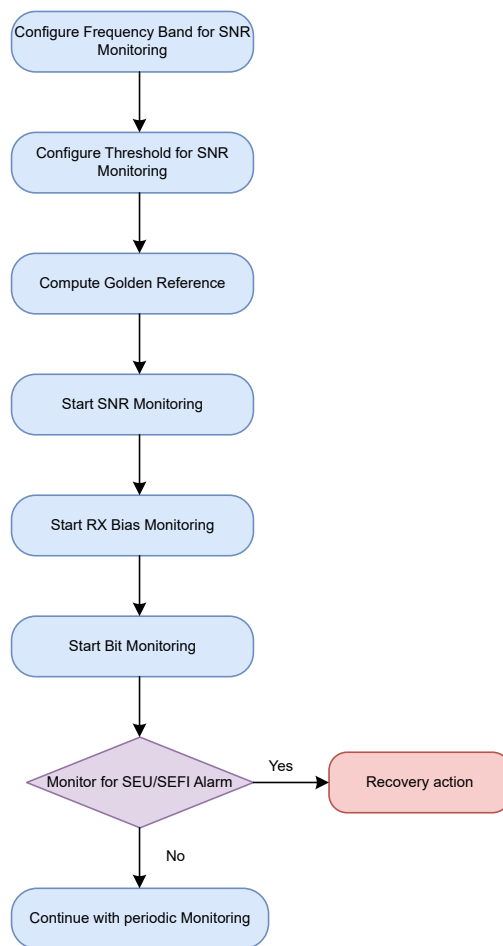


图 3-2. 后续启动后的操作顺序

4 器件配置后

在按照上一节的说明完成器件配置并成功启动后，需要遵循以下操作顺序：

1. 使用 **CAPI configSnrBand** 一次性为所有通道指定 SNR 监测频段，或通过通道选择分别对 RX、FB 和 TX 进行配置。
2. 使用 **CAPI startSnrMonitoring** 开始监测所选通道。
3. 使用 **CAPI readRxSnr**、**readFbSnr**、**readTxSnr** 分别读取 RX、FB 和 TX 的 SNR。务必确保在调用此 CAPI 之前已经调用了 **startSnrMonitoring** CAPI。使用报告的值来设置阈值。
4. 读取值后运行 **CAPI stopSnrMonitoring** 以停止监测。
5. 使用 **CAPI configSnrThreshold**，通过通道选择选项为所选通道设置阈值。对于 RX 和 FB 通道，将阈值设置为比报告值至少高 10dB。而对于 TX，将阈值设置为比报告值至少高 5dB。
6. (可选) 分别使用 **setSnrMonitorPeriod** 更改 SNR 监测周期、使用 **setRxBiasMonitorPeriod** 更改 RX 偏置监测周期、使用 **setBitMonitorPeriod** 更改配置监测周期。每种监测的默认周期均设置为 1 秒。
7. 一旦设置了所需的频段、阈值和监测参数，即可使用 **CAPI startSnrMonitoring** 对所选通道启动周期性 (默认周期约为 1 秒) 监测。
8. 使用 **CAPI startRxBiasMonitoring** 对所选通道启动周期性 (默认周期约为 1 秒) 监测。
9. 使用 **CAPI computeGolden** 计算多配置寄存器组的黄金参考奇偶校验值。
10. 使用 **CAPI startMonitoring** 启动周期性 (周期约为 1 秒) 监测。
11. 监测专用于 SEFI 检测的 GPIO 引脚 M15 是否有警报。此外，如果 SNR 恶化，可使用 **CAPI getSnrAlarm** 读取每个通道的警报状态；如果偏置超出规格，可使用 **CAPI getRxBiasAlarm** 获取 RX 和 FB 通道的警报状态。类似地，如果配置寄存器组中发生任何位翻转，可使用 **CAPI getBitAlarm** 获取警报状态。
12. 使用 **CAPI stopSnrMonitoring** 和 **stopRxBiasMonitoring** 停止 SEFI 监测，使用 **stopMonitoring** 停止 SEU 监测。

以上步骤仅适用于在特定模式下首次启动器件。对于后续启动，如果监测频段相同，可以跳过第二、三、四步，直接使用首次运行时获得的阈值进行设置。请参阅图 3-1 和图 3-2。

要调用 CAPI 序列，请使用以下命令。

4.1 配置 SNR 监测参数

1. 格式：**CAFE.configSnrBand(afInst, rxSelect, fbSelect, txSelect, startFreq, stopFreq)**

a. Example 1.1: `CAFE.configSnrBand(0, 15, 3, 0, 9300000, 9400000)`

b. Example 1.2: `CAFE.configSnrBand(0, 0, 0, 15, 9450000, 9550000)`

2. 格式：**CAFE.startSnrMonitoring(afInst, rxEnable, fbEnable, TxEnable)**

a. Example 2: `CAFE.startSnrMonitoring(0,15,3,15)`

3. 格式：**CAFE.readRxSnr(afInst, chNo)**

格式：**CAFE.readFbSnr(afInst, chNo)**

格式：**CAFE.readTxSnr(afInst, chNo)**

a. Example 3.1: `CAFE.readRxSnr(0,0)`

结果：-75

其他 RX 通道类似。

b. Example 3.2 `CAFE.readFbSnr(0,0)`

结果：-80

另一个 FB 通道类似。

c. Example 3.3: `CAFE.readTxSnr(0,0)`

结果：-55

其他 TX 通道类似。

4. 格式：`CAFE.stopSnrMonitoring(afelInst)`

a. Example 4: `CAFE.stopSnrMonitoring(0)`

5. 格式：`CAFE.configSnrThreshold(afelInst, rxSelect, fbSelect, txSelect, Threshold)`

a. Example 5.1: `CAFE.configSnrThreshold(0, 15, 0, 0, -65)`

b. Example 5.2: `CAFE.configSnrThreshold(0, 0, 3, 0, -70)`

c. Example 5.3: `CAFE.configSnrThreshold(0, 0, 0, 15, -50)`

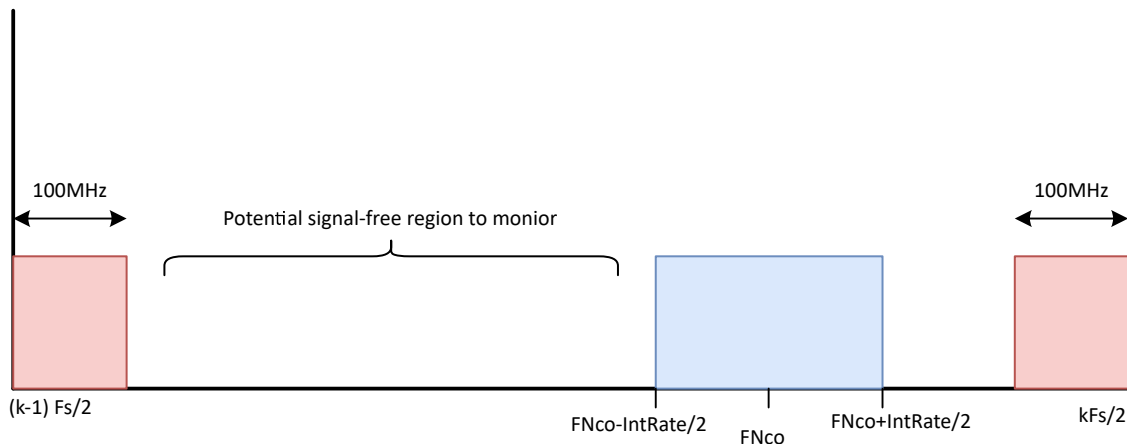


图 4-1. 100MHz 的监测频段必须选择在蓝色和红色区域之外，并位于接收信号的同一奈奎斯特区内

4.1.1 配置 RX 的监测参数

起始频率和终止频率的选择需满足以下条件：

1. 监测频段必须距离奈奎斯特频率至少 100MHz。
2. 所监测的频段不应接收任何信号，且必须位于 DDC 频段之外。必须消除外部阻挡物或干扰物的任何影响。
3. 选择的监测频段必须在与 NCO 频率相同的奈奎斯特区内。

例如，假设 ADC 的采样频率 (F_s) 为 3,000MHz，您的 NCO 频率为 9,500MHz，接口速率为 200MHz，那么可以选择 9,300MHz 或 9,700MHz 作为起始频率，只要满足上述条件即可。终止频率必须与起始频率相距 100MHz，确保监测带宽为 100MHz。要设置该阈值，请使用 CAPI `readRxSnr`。建议该阈值必须设置为至少比所报告的 SNR 高 10dB。这可确保 10dB 或更严重的 SNR 劣化能被检测出来。请参考上文示例 3.1。对所有 RX 通道执行该操作顺序。

4.1.2 配置 FB 的监测参数

将两个 FB 通道的起始频率 (kHz) 和终止频率 (kHz) 设置为与 RX 通道相同。监测带宽必须为 100MHz。要设置该阈值，请使用 CAPI `readFbSnr`。TI 建议该阈值必须设置为至少比所报告的 SNR 高 10dB。这可确保 10dB 或更严重的 SNR 劣化能被检测出来。请参考上文示例 3.2。对所有 FB 通道执行该操作顺序。

4.1.3 配置 TX 的监测参数

TX 通道监测通过内部回送机制将发送信号回送至 FB 通道来实现。起始频率和终止频率的选择需满足以下条件：

1. 监测频段必须距离 FB 通道的奈奎斯特频段边缘至少 100MHz。
2. 所监测的频段不应发射任何信号或包含其他杂散，且必须位于 TX 信号频段之外。在选择要监测的 TX 频段时，务必确保该频段不包含 TX DAC 镜像的混叠分量，这些混叠分量在通过 FB ADC 观测 TX 信号时就会出现。
3. 监测频段必须位于与发送频段相同的奈奎斯特区内。

这里的奈奎斯特频率须根据 FB ADC 的采样率来确定，因为 TX 输出是通过 FB 通道来监测的。在选择频段时还需考虑任何混叠效应。

例如，假设您的 TX NCO 频率为 9,250MHz，接口速率为 200MHz，那么可以选择 9,050MHz 或 9,450MHz 作为起始频率，只要满足上述条件即可。终止频率必须与起始频率相距 100MHz，以确保监测带宽为 100MHz。要设置该阈值，请使用 `CAPI readTxSnr`。TI 建议该阈值必须设置为比所报告的 SNR 高 5dB。请参考上文示例 3.3。对所有 TX 通道执行该操作顺序。

4.2 计算黄金参考值

格式：`CAFE.computeGolden(afInst)`

Example 6: `CAFE.computeGolden(0)`

黄金参考值是指在器件按预期用例配置完成后计算出的寄存器组奇偶校验值。可调用上述命令计算黄金参考值，该值将作为后续检查寄存器组是否发生损坏的参考基准。

4.3 启动监测

格式：`CAFE.startSnrMonitoring(afInst, rxEnable, fbEnable txEnable)`

Example 7.1: `CAFE.startSnrMonitoring(0, 15, 3, 15)`

分别使用参数 `rxEnable`、`txEnable` 和 `fbEnable` 选择要进行 SNR 监测的 RX、TX 和 FB 通道。每个参数都是通道索引的位表示形式，最低有效位对应第一个通道，依此类推。

格式：`CAFE.startRxBiasMonitoring(afInst, rxEnable, fbEnable)`

Example 7.2: `CAFE.startRxBiasMonitoring(0, 15, 3)`

分别使用参数 `rxEnable` 和 `fbEnable` 选择要进行监测的 RX 和 FB 通道。每个参数都是通道索引的位表示形式，最低有效位对应第一个通道，依此类推。

格式：`CAFE.startMonitoring(afInst)`

Example 7.3: `CAFE.startMonitoring(0)`

调用上述命令可启动位监测。

4.4 读取警报

运行上述序列并启用监测后，用户即可在分配的 GPIO 上观察警报。此外，也可以按以下方式调用警报回读函数。

格式：`CAFE.getSnrAlarm(afInst)`

Example 8.1: `CAFE.getSnrAlarm(0)`

格式：CAFE.getRxBiasAlarm(afelInst)

Example 8.2: CAFE.getRxBiasAlarm(0)

格式：CAFE.getBitAlarm(afelInst)

Example 8.3: CAFE.getBitAlarm(0)

CAPI getSnrAlarm 返回三个值，第一个值对应 RX 警报，第二个对应 FB 警报，第三个对应 TX 警报。RX 警报可按位解析，其中位 0 对应 RX1 的警报，位 1 对应 RX2 的警报，依此类推。同样，FB 警报也可按位解析，位 0 对应 FB1 的警报，位 1 对应 FB2 的警报。TX 警报的解析方式与 RX 警报相同。

请参考以下示例：

Output: [11,1,2]
Binary representation: [1011,01,0010]

这意味着以下通道的 SNR 已超出设定阈值：RX1、RX2、RX4、FB1 和 TX2。

CAPI getRxBiasAlarm 返回两个值，第一个值对应 RX 警报，第二个值对应 FB 警报。RX 警报可按位解析，其中位 0 对应 RX1 的警报，位 1 对应 RX2 的警报，依此类推。同样，FB 警报也可按位解析，位 0 对应 FB1 的警报，位 1 对应 FB2 的警报。

请参阅以下示例：

Output: [3,1]
Binary Representation: [0011,01]

这意味着以下通道的偏置已超出规格：RX1、RX2 和 FB1。

CAPI getBitAlarm 报告配置寄存器组是否因任何辐射事件而损坏。如果输出为 1，表示配置寄存器组中发生了位翻转（一个或多个）；若输出为 0，表示寄存器组未受影响。

这些警报具有粘滞特性。也就是说，一旦警报变为高电平，就会保持该状态。可以使用清除警报函数来清除这些警报，然后再次调用读取警报函数来获取当前状态。请参考以下清除警报的示例。

格式：CAFE.clearSnrAlarm(afelInst)

Example 10.1: CAFE.clearSnrAlarm(0)

格式：CAFE.clearRxBiasAlarm(afelInst)

Example 10.2: CAFE.clearRxBiasAlarm(0)

格式：CAFE.clearBitAlarm(afelInst)

Example 10.3: CAFE.clearBitAlarm(0)

4.5 设置监测周期

该机制还提供了选择监测周期的灵活性。周期必须以毫秒为单位设置，且必须始终大于 50 毫秒。当监测在后台运行时，不得更改监测周期。因此，调用此 CAPI 时，必须确保监测处于停止状态。因此，在更改周期之前，请先调用停止监测 CAPI。要将监测周期设置为三秒，请参考以下示例。

格式：CAFE.setBitMonitorPeriod(afelInst, period)

Example 11.1: CAFE.setBitMonitorPeriod (0,3000)

格式：*CAFE.setSnrMonitorPeriod(afelInst, period)*

Example 11.2: *CAFE.setSnrMonitorPeriod(0, 3000)*

格式：*CAFE.setRxBiasMonitorPeriod(afelInst, period)*

Example 11.3: *CAFE.setRxBiasMonitorPeriod (0, 3000)*

4.6 停止监测

要停止监测，请使用以下 CAPI：

格式：*CAFE.stopMonitoring(afelInst)*

Example 12.1: *CAFE.stopMonitoring(0)*

格式：*CAFE.stopSnrMonitoring(afelInst)*

Example 12.2: *CAFE.stopSnrMonitoring(0)*

格式：*CAFE.stopRxBiasMonitoring(afelInst)*

Example 12.3: *CAFE.stopRxBiasMonitoring(0)*

5 配置后的动态更改

如果在器件启动后需要进行动态更改（例如更新 NCO 或 DSA），CAPI 可以更改正在监测的寄存器组。这会导致虚警，因为固件可能将这种更改误判为 SEU 事件。为避免虚警，建议按以下顺序操作：

1. 使用 **CAPI stopMonitoring** 停止监测。
2. 执行所需的动态更新（例如更改 NCO）。
3. 使用 **CAPI computeGolden** 重新计算黄金奇偶校验值。
4. 使用 **CAPI startMonitoring** 重新启动监测。

在后台监测运行期间，若要更改监测频段、阈值、周期或任何其他监测相关参数，直接调用相应的 CAPI 可能会干扰后台监测，导致固件卡死。

为避免出现这种情况，建议按以下顺序操作：

1. 使用相应的 CAPI 停止监测（如示例 12 所示）。
2. 使用相应的 CAPI 执行所需更新。
3. 使用启动监测的 CAPI 重新启动监测（如示例 7 所示）。

6 结果

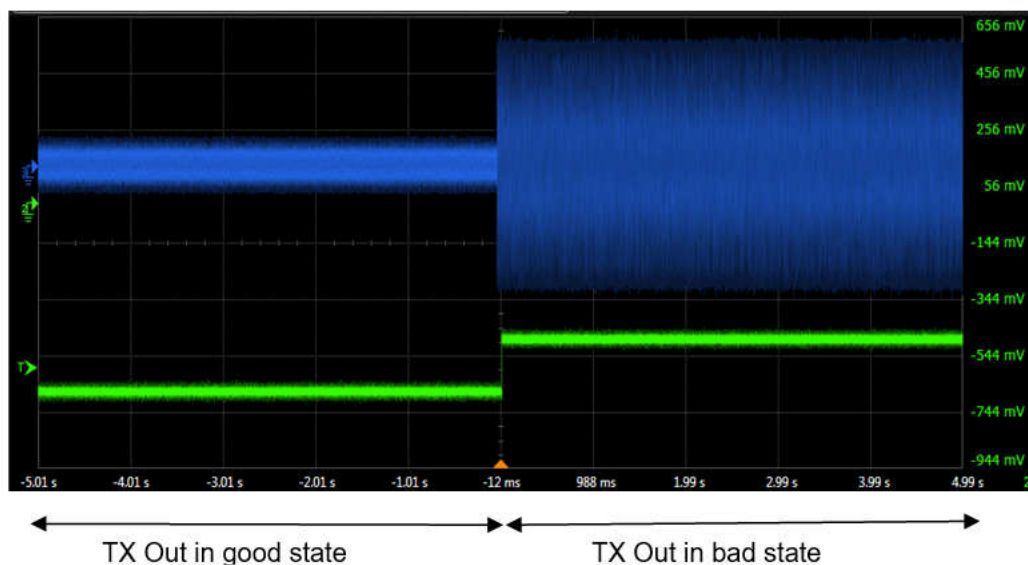


图 6-1. TX 输出以蓝色表示，GPIO 警报以绿色表示

启用监测后，一旦 SNR 超出设定阈值，就会触发警报，并可在 GPIO M15 上看到，如图 6-1 所示。

7 恢复措施

警报触发后，用户必须根据警报类型采取适当措施。如果为 **SEU** 警报，执行 **AFE** 硬件复位肯定能够消除该翻转事件，从而继续当前操作。复位完成后，用户必须重新加载配置并重新启动器件，然后按照步骤启动诊断空间固件。

如果为 **SEFI** 警报，除上述 **SEU** 恢复步骤外，还需要断电再上电（电源循环）来恢复器件，如图 7-1 所示。

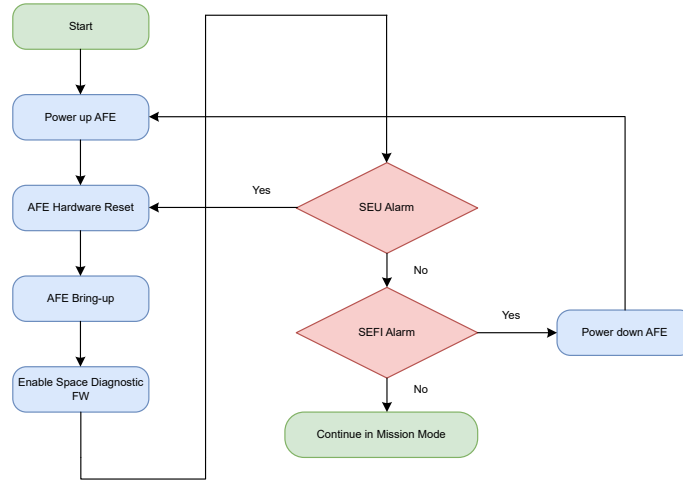


图 7-1. SEU 和 SEFI 警报的恢复措施

8 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[电子产品辐射手册](#)，电子书。
- 德州仪器 (TI)，[AFE7950-SP 单粒子效应报告](#)，辐射报告。

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月