

摘要

MSP430™ 微控制器 (MCU) 产品系列提供多种具有超低功耗和集成式模拟和数字外设的 16 位 MCU，适用于传感和测量应用。本应用报告介绍了 MSP430FR2xx/FR4xx 器件中的内部数控振荡器 (DCO) 和锁频环 (FLL)，以及如何在应用中使用 DCO+FLL 来实现精确的时钟频率，如何使用软件调整功能锁定工厂定义的频率或中间频率，如何在最大频率范围内快速锁定任何目标频率，以及如何使用增强型软件调整功能来覆盖温度和电压漂移。提供了 [MSP430FR2xx/FR4xx DCO+FLL 代码示例](#)，还讨论了测试结果。

内容

1 MSP430FR2xx/FR4xx 器件中的 DCO 和 FLL 简介	3
1.1 DCO 工作原理.....	3
1.2 MSP430FR2xx/4xx 与 MSP430F5xx 之间的 DCO 差异.....	4
1.3 FLL 工作原理.....	5
1.4 DCO 校准和稳定.....	6
2 如何通过 DCO+FLL 实现精确频率	7
3 如何通过 DCO+FLL 锁定工厂定义的频率和中间频率	9
3.1 FLL 锁定出厂调整频率.....	9
3.2 FLL 使用软件调整功能锁定其他工厂定义的频率和中间频率.....	10
4 如何通过 DCO+FLL 快速锁定目标频率	13
4.1 快速锁定出厂调整频率.....	13
4.2 快速锁定其他工厂定义的频率和中间频率.....	13
5 针对温度和电压漂移的 FLL 锁定目标频率	15
5.1 DCO+FLL 时钟精度随温度和电压漂移.....	15
5.2 针对温度和电压漂移的 FLL 锁定的增强型软件调整.....	15
6 总结	17
参考文献	17

插图清单

图 1-1. MSP430FR2xx/4xx 的 DCO 方框图.....	3
图 1-2. MSP430FR2311 的典型 DCO 频率.....	4
图 1-3. MSP430F5529 的典型 DCO 频率.....	4
图 1-4. MSP430FR2311 的 DCO 频率范围.....	5
图 1-5. MSP430FR2xx/FR4xx 的 FLL 方框图.....	5
图 2-1. MSP430FR2311 的 DCO+FLL 规格.....	8
图 3-1. MSP430FR2355 的 DCO 抽头调整数据.....	9
图 3-2. 提供快速锁定代码示例的 MSP430FR2355 LaunchPad™ 开发套件的 FLL 锁定时间.....	10
图 3-3. DCO+FLL 软件调整流程图.....	11
图 3-4. MSP430FR2355 的 DCO 频率范围.....	12
图 4-1. 具有快速锁定代码示例的 MSP430FR2355 的首次加电 FLL 锁定时间.....	13
图 4-2. 具有快速锁定代码示例的 MSP430FR2355 的后续加电或复位 FLL 锁定时间.....	14
图 5-1. DCO+FLL 快速锁定的流程图，增强型软件和 DCO 监视器.....	16

表格清单

商标

MSP430™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 MSP430FR2xx/FR4xx 器件中的 DCO 和 FLL 简介

时钟系统对于微控制器 (MCU) 系统来说非常重要。在 MSP430FR2xx/FR4xx 器件中，时钟系统 (CS) 模块集成了六个时钟源：

1. DCO - 数字控制振荡器
2. XT1CLK - 与外部晶体配合使用的高频或低频振荡器
3. VLOCLK - 超低功率 10kHz 典型频率振荡器
4. REFOCLK - 调整后的 32768Hz 典型频率振荡器
5. MODCLK - 5MHz 典型频率振荡器
6. FLL - 锁频环

有关时钟源和方框图的更多详情，请参阅 [MSP430FR4xx](#) 和 [MSP430FR2xx](#) 系列用户指南。本文档将介绍 DCO 和 FLL 以及它们如何协同工作以实现准确的目标频率。

1.1 DCO 工作原理

DCO 是内部数控振荡器，无需使用任何外部元件，例如晶体或 RC (电阻器、电容器) 组合。DCO 频率可通过配置 DCORSEL、DCO、MOD 和 DCOFTRIM 位的软件来调整。图 1-1 所示为 MSP430FR2xx/4xx 的 DCO 方框图。

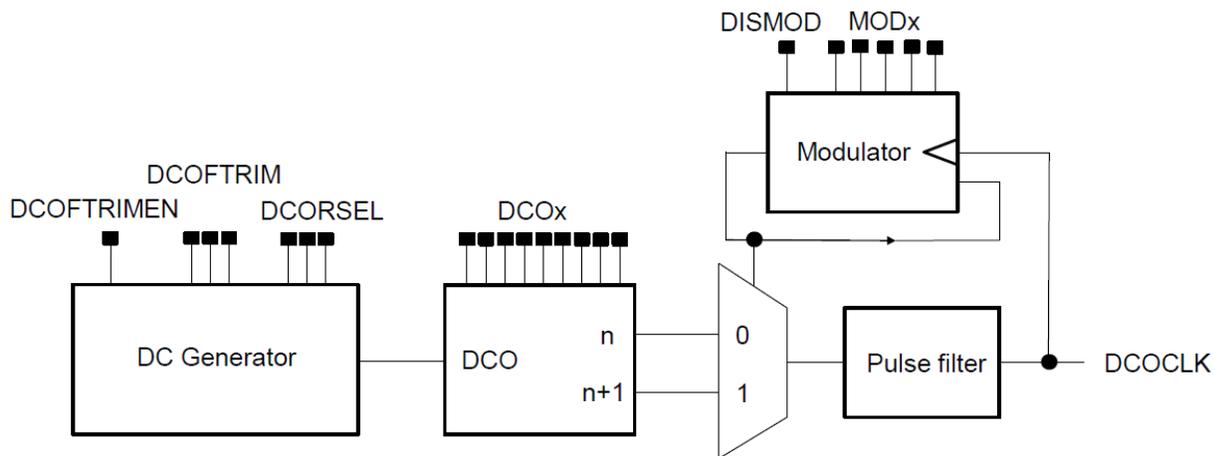


图 1-1. MSP430FR2xx/4xx 的 DCO 方框图

MSP430FR2xx/4xx 寄存器 CSCTL1.DCORSEL 定义了多个频率范围：1MHz、2MHz、4MHz、8MHz、12MHz、16MHz、20MHz 和 24MHz。请注意，只有 MSP430FR2x5x 支持 20MHz 和 24MHz 的高频范围选择。对于 DCO 频率设置，DCOFTRIM 3 位可被视为“粗调”，而 DCOx 9 位更多地代表“微调”。DCOFTRIM 有 7 个调整抽头，DCOx 有 512 个 DCO 抽头。

有关具有不同 DCO 寄存器设置的典型 DCO 频率，请参阅 MSP430FR2xx/FR4xx 器件特定数据表中的第 5.13.3 节“时钟规格”。图 1-2 所示为 MSP430FR231x 的典型 DCO 频率。它显示了当 DCO 频率范围小于 8MHz (DCORSEL=3) 时，相同 DCOFTRIM 配置的两个相邻 DCORSEL 设置之间的频差。

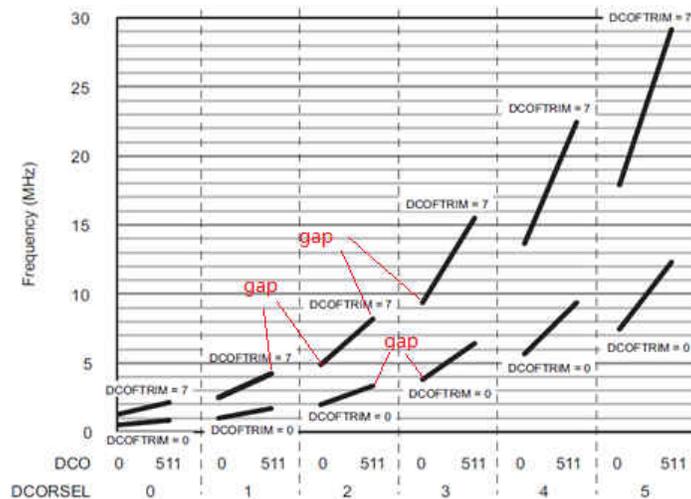


图 1-2. MSP430FR2311 的典型 DCO 频率

在 MCU 中，当 DCO 寄存器设置相同时，器件生产变化、温漂和电压漂移会导致 DCO 频率不同。为实现稳定且明确定义的目标频率，DCO 频率可以通过软件进行调整（请参阅节 1.4），也可以通过集成在 MSP430FR2xx/FR4xx 器件中的 FLL 进行调整并保持稳定。

1.2 MSP430FR2xx/4xx 与 MSP430F5xx 之间的 DCO 差异

MSP430F5xx 中也有 DCO。但是与 MSP430FR2xx/4xx 中的 DCO 存在一些显著差异。

1. DCO 抽头步骤

- 在 MSP430F5xx 中，DCO 寄存器为 5 位，DCO 抽头调谐范围为 0 到 31。
- 在 MSP430F2xx/4xx 中，DCO 寄存器为 9 位，DCO 抽头调谐范围为 0 到 511，因而频率步长远小于 MSP430F5xx DCO。这种变化所带来的一个好处是 MSP430F2xx/4xx DCO+FLL 的时钟抖动更小。

2. 频率调谐覆盖范围缺口

- 对于 MSP430F5xx DCO，DCO 抽头的相邻 DCORSEL 值没有任何频率覆盖范围缺口。图 1-3 所示为 MSP430F5529 的典型 DCO 频率。结果表明，DCOx = 31 的频率始终高于下一个 DCORSEL 的 DCOx = 0。

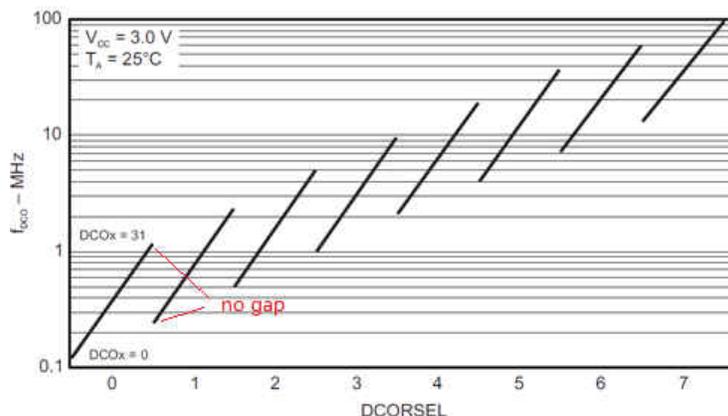


图 1-3. MSP430F5529 的典型 DCO 频率

- 对于 MSP430FR2xx/4xx DCO，DCO 抽头的相邻 DCORSEL 值存在频率覆盖范围缺口，并且具有相同的 DCOFTRIM 配置。当频率范围小于 8MHz 时，这在图 1-2 中可以明显观察到。
- 有关详细信息，请参阅特定数据表的“DCO 频率”部分。图 1-4 是从 MSP430FR231x 固定信号微控制器的表 5-6 中捕获的。
 - 对于 DCORSEL = 3 和 DCOFTRIM = 0，频率范围为 3.8MHz ~ 6.5MHz。
 - 对于 DCORSEL = 2 和 DCOFTRIM = 0，频率范围为 2MHz ~ 3.2MHz。

FLL 与 DCO 和基准时钟一起工作。基准时钟 $f_{\text{FLLREFCLK}}$ 可以来自 REFOCLK 或 XT1CLK，由寄存器 CSCTL3 中的 SELREF 位选择。有一个分频器 FLLREFDIV 来对供 FLL 使用的基准时钟进行分频。请注意，如果 REFOCLK 和 XT1CLK 仅为 32kHz 时钟，则 FLLREFDIV 始终被读取和写入为 0（分频比 $n=1$ ）。

1.4 DCO 校准和稳定

如节 1.1 中所述，由于工艺变化、温漂和电压漂移，DCO 变化很大。若要获得准确的 DCO 时钟频率，必须根据已知的准确时钟频率对 DCO 进行调谐或校准。可通过三种方法来实现该目的。

1. 出厂调整：加载 DCOFTRIM、DCO 和 MOD 的出厂 DCO 调整数据。
 - 在 MSP430 器件生产中，有使用外部精确频率源微调 DCO 频率的测试程序。在运送给客户之前，调整后的就绪数据保存在非易失性存储器 TLV 表中。有关 TLV 简介，请参阅 [MSP430FR4xx](#) 和 [MSP430FR2xx 系列用户指南](#) 和器件特定的数据表。
 - 在用户代码中对器件进行初始化时，在选择时钟源并设置目标频率后，将调整数据从 TLV 表加载到 DCO 抽头寄存器中。可以快速实现准确的 DCO 时钟频率（有关详细信息，请参阅节 3.1）。

NOTE

请注意，在没有 FLL 的 MSP430FR5xx/6xx 器件中，所有定义的频率都在 TLV 表中包含调整后的数据。将 DCOFSEL 寄存器设置为目标频率范围会自动加载相应的出厂调整数据

2. 软件 FLL：具有精确基准时钟的 DCO 频率软件校准
 - 如应用报告 [使用 DCO 库](#) 中所述，MSP430™ 内置计时器模块可用于测量 DCO 频率，以 SMCLK 时钟作为计时器时钟源，以一个或多个 32kHz 晶体周期计数。
 - 根据测量结果，调整 DCO 寄存器值以微调 DCO 频率。因为晶体 32kHz 频率是准确的，所以校准后的 DCO 时钟频率也将是准确的。
3. FLL 模块：通过 FLL 和精确基准调谐 DCO 频率并使其保持稳定
 - FLL 模块会根据工艺、温度和电压变化自动校准 DCO 频率并使频率保持稳定。FLL 需要与 DCO 和基准时钟一起工作。FLL 模块存在于 MSP430F4xx、MSP430F5xx、MSP430F6xx、MSP430FG4xx、MSP430FG6xx、MSP430FR2xx 和 MSP430FR4xx 器件中。

2 如何通过 DCO+FLL 实现精确频率

默认情况下，在上电后，FLL 处于启用状态。在这种情况下，DCO 频率通过 FLL 操作保持稳定。可以通过设置 SCG0 来禁用 FLL 操作。当 FLL 禁用时，DCO 以在寄存器 CSCTL0 和 CSCTL1 中定义的当前设置继续运行。如有需要，也可以手动调整 DCO 频率。

根据 MSP430FR2xx/4xx 规范，DCO 可在 10us 内开始。这提供了在上电后快速启动和从低功耗模式快速唤醒的功能。典型 FLL 锁定时间为 200ms。在 FLL 锁定之前，MCLK 和 SMCLK 默认时钟源 DCOCLKDIV 是不准确的。这不会影响用户代码执行，但它会影响上电后尽快需要准确时钟源的应用执行，例如高速 UART 通信。节 4 讨论了如何通过 DCO+FLL 快速锁定目标频率。

为了实现精确频率，需要以下配置。

- 禁用 FLL
- 为 FLL 选择基准时钟源
- 设置 DCO 范围
- 通过配置 FLL 寄存器 FLLN、FLLD 设置目标频率
- 启用 FLL 并检查 FLL 锁定状态

节 3 讨论了针对不同频率配置的详细处理序列

FLL 用于使 DCO 时钟保持稳定。FLL 锁定后，DCOCLK 和 DCOCLKDIV 的频率将具有接近 $f_{FLLREFCLK}$ (REFOCLK 或 XT1CLK) 的精度。分频器 (FLLN + 1) 和分频器 FLLD 定义了 DCOCLK 和 DCOCLKDIV 的频率。

$$f_{DCOCLKDIV} = (FLLN + 1) \times (f_{FLLREFCLK} \div n) \quad (1)$$

其中：

- $f_{FLLREFCLK}$ - FLL 基准时钟
- n - 分频器 FLLREFDIV 的分频比率 (如果 $f_{FLLREFCLK}$ 为 32kHz, n 固定为 1)

DCO 模块中的 MOD 函数可通过设置寄存器 CSCTL0.MOD 来启用。调制器混合了两种 DCO 频率 f_{DCO} 和 f_{DCO+1} ，以便在 f_{DCO} 和 f_{DCO+1} 之间产生有效中频。借助此功能，可以生成更多频率。

FLL 锁定状态可通过 CSCTL7 寄存器中的 FLLUNLOCK 位来检查。

MSP430FR4xx 和 MSP430FR2xx 系列用户指南中的第 3.2.5、3.2.6、3.2.7、3.2.8 和 3.2.9 章详细介绍了如何设置 DCO 频率，如何使用 DCO 调制器函数，以及如何通过 DCO+FLL 检测 FLL 锁定/解锁状态。

若要使用 DCO+FLL 实现精确的 DCO 时钟，参考时钟至关重要。如果参考时钟精度可更好地适应温度和电压，DCO 时钟频率精度将会更高。

参考时钟 $f_{FLLREFCLK}$ 可以来自 REFOCLK 或 XT1CLK，由寄存器 CSCTL3 中的 SELREF 位选择。若要了解 DCO+FLL 稳定型 DCO 时钟精度规格，请参阅 MSP430FR2xx/FR4xx 器件特定数据表表中的第 5.13.3 节“时钟规格”。图 2-1 所示为从 MSP430FR231x 混合信号微控制器中捕获的示例规格。

over recommended operating free-air temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	V _{CC}	MIN	TYP	MAX	UNIT
f _{DCO, FLL}	FLL lock frequency, 16 MHz, 25°C	Measured at MCLK, internal trimmed REFO as reference	3.0 V	-1.0%		1.0%	
	FLL lock frequency, 16 MHz, -40°C to 85°C			-2.0%		2.0%	
	FLL lock frequency, 16 MHz, -40°C to 85°C	Measured at MCLK, XT1 crystal as reference		-0.5%		0.5%	
f _{DUTY}	Duty cycle	Measured at MCLK, XT1 crystal as reference	3.0 V	40%	50%	60%	
Jitter _{cc}	Cycle-to-cycle jitter, 16 MHz	Measured at MCLK, XT1 crystal as reference	3.0 V		0.25%		
Jitter _{long}	Long-term jitter, 16 MHz	Measured at MCLK, XT1 crystal as reference	3.0 V		0.022%		
t _{FLL, lock}	FLL lock time, 16 MHz	Measured at MCLK, XT1 crystal as reference	3.0 V		200		ms

图 2-1. MSP430FR2311 的 DCO+FLL 规格

3 如何通过 DCO+FLL 锁定工厂定义的频率和中间频率

MSP430FR2xx/4xx 寄存器 CSCTL1.DCORSEL 定义了多个频率范围：1MHz、2MHz、4MHz、8MHz、12MHz、16MHz、20MHz 和 24MHz。但只有高频 16MHz 和 24MHz 才会在 TLV 存储器中保存出厂调整数据。对于除 16MHz 和 24MHz 以外的目标频率，没有任何出厂调整数据。并且由于频率范围较大，也需要调节软件调整 DCOFTRIM。然后还需要用到软件调整算法。因此，这些频率的 FLL 锁定软件驱动器并不相同。

3.1 FLL 锁定出厂调整频率

对于最大频率为 24MHz 的 MSP430FR2xx/4xx 器件，TLV 表中存储了两个工厂调整的 DCO 抽头数据，对应于目标频率 16MHz 和 24MHz。图 3-1 所示为从 MSP430FR235x、MSP430FR215x 混合信号微控制器的表 6-70 中捕获的两项调整数据（16MHz 和 24MHz）的地址。

Reference and DCO calibration	Calibration tag	1A26h	12h
	Calibration length	1A27h	0Ah
	Internal shared 1.5-V reference factor	1A28h	Per unit
		1A29h	Per unit
	Internal shared 2.0-V reference factor	1A2Ah	Per unit
		1A2Bh	Per unit
	Internal shared 2.5-V reference factor	1A2Ch	Per unit
		1A2Dh	Per unit
	DCO tap settings for 16 MHz, temperature 30°C	1A2Eh	Per unit
		1A2Fh	Per unit
DCO tap settings for 24 MHz, temperature 30°C (4)	1A30h	Per unit	
	1A31h	Per unit	

(3) The calibration value is device dependent at 105°C.

(4) This value can be directly loaded into the DCO bits in the CSCTL0 register to get an accurate 24-MHz frequency at room temperature, especially when MCU exits from LPM3 and below. TI also suggests to use a predivider to decrease the frequency if the temperature drift might result an overshoot faster than 24 MHz.

图 3-1. MSP430FR2355 的 DCO 抽头调整数据

对于最高频率 16MHz MSP430FR2xx/4xx 器件，仅提供了 16MHz DCO 抽头调整数据。有关详细信息，请参阅特定数据表。请注意，TLV 中的 DCO 抽头调整数据仅适用于 30°C 的室温。

FLL 有两种软件例程来锁定 24MHz 或 16MHz 频率。

1. 用户指南中的建议过程 - 正常 FLL 锁定。
 - a. 禁用 FLL。
 - b. 选择基准时钟。
 - c. 清除 CSCTL0 寄存器。
 - d. 设置 DCO 范围并为目标频率设置 FLLN 和 FLLD。
 - e. 执行 NOP 三次以允许应用相关设置的时间。
 - f. 启用 FLL。
 - g. 对 FLLUNLOCK 位进行轮询，直到 FLL 锁定。

请参阅 MSP430FR231x 代码示例中的代码示例 msp430fr231x_CS_03.c，或其他 MSP430FR2xx/4xx 器件代码示例。

此过程是为了在启用 FLL 之前清除 DCO 抽头。FLL 将从零调整 DCO 抽头。最后，DCO 抽头将稳定保持在 0~511 之间的任意值。所以锁定时间会长至几十毫秒或两百毫秒。但此过程非常可靠，没有频率过冲风险。

2. 将 DCO 抽头 TLV 调整数据加载到寄存器 CSCTL0.DCO 中 - 更快的 FLL 锁定。
 - a. 禁用 FLL。
 - b. 选择基准时钟。
 - c. 清除 CSCTL0 寄存器。
 - d. 设置 DCO 范围并为目标频率设置 FLLN 和 FLLD。
 - e. 设置 CSCTL0.DCO = 调整后的 DCO 抽头值 TLV。

- f. 执行 NOP 三次以允许应用相关设置的时间。
- g. 启用 FLL。
- h. 将 MCLK 源设置为 REFOCLK 或 XT1CLK 并延迟至少 10 个周期。
- i. 对 FLLUNLOCK 位进行轮询，直到 FLL 锁定。
- j. 将 MCLK 源设回 DCOCLKDIV

此过程是为了直接加载包含 DCO 抽头 TLV 调整数据的 DCO 寄存器。它可以加快 FLL 锁定以达到目标频率。MCLK 源切换可以简化等待周期的计算。为了避免 MCLK 过冲风险并为 FLL 逻辑建立预留时间，引入了步骤 h。MSP430FR2x5x_FLL_FastLock_24MHz-16MHz.c 中提供了针对 MSP430FR2355 的此软件例程示例，前者位于本应用报告的参考软件包 (MSP430FR2xx/FR4xx DCO+FLL 代码示例) 中。

根据在室温下进行的测试，对于针对 MSP430FR2355 LaunchPad™ 开发套件的此代码示例，MCLK 为 16MHz 时的 FLL 锁定时间 (从时钟系统寄存器配置到封装引脚上的 MCLK 输出) 约为 750~800us。图 3-2 显示了在电路板上捕捉的锁定时间。示例代码还可用于其他仅需检查 GPIO 引脚的 MSP430FR2xx/4xx 器件 (如果可用)。



图 3-2. 提供快速锁定代码示例的 MSP430FR2355 LaunchPad™ 开发套件的 FLL 锁定时间

3.2 FLL 使用软件调整功能锁定其他工厂定义的频率和中间频率

由于存在节 1.1 和节 1.2 中讨论的频差，如果目标频率位于频差区域并且不更改寄存器 DCOFTRIM，则不会锁定目标频率。我们需要涉及用于频率粗调的 DCOFTRIM 和用于微调的 DCO 抽头。FLL 无法自动调谐 DCOFTRIM 以达到目标频率。因此需要采用软件调整解决方案。除了出厂调整频率 16MHz 和 24MHz 外，其他工厂定义的频率 (如 1MHz、2MHz、4MHz、8MHz 和 12MHz) 也需要通过软件调整函数来锁定，因为默认的 DCOFTRIM 可能不是理想频率设置 (由于工艺、温度和电压的变化)。

3.2.1 软件调整的推荐程序序列

MSP430FR4xx and MSP430FR2xx 系列用户指南中的第 3.2.11 章介绍了有关软件调整的详细信息。以下推荐的程序步骤只是从中节选的一部分。

1. 禁用 FLL。
2. 选择基准时钟。
3. 设置 DCO 范围，启用 DCO 频率调整功能。
4. 为目标频率设置 FLLN 和 FLLD。
5. 执行 NOP 三次以允许应用相关设置的时间。
6. 启用 FLL。
7. 设置 DCO 抽头 = 256。
8. 清除 DCO 默认标志 (DCOFFG)。
9. 等待以使 FLL 锁定状态 (FLLUNLOCK) 保持稳定。建议的最短等待时间为 24 除以 FLL 基准时钟频率 (例如，如果分频基准时钟 = 32768Hz，那么等待时间 = 0.733ms)。注意：可以将 24 更改为 12，以缩短锁定时间。
10. 对 FLLUNLOCK 位和 DCOFFG 位进行轮询，直到 FLL 锁定且未出现 DCO 故障为止。
11. 读取 DCO 抽头值，计算 DCO 抽头与 256 之间的差值。
12. 当 DCO 抽头比上次记录的抽头更接近 256 时，记录 CSCTL0 和 CSCTL1 寄存器值。
13. 根据 DCO 抽头相对于中频的相对位置增加或减小 DCOFTRIM (如果 DCO 抽头 < 256，DCOFTRIM - 1；如果 DCO 抽头 ≥ 256，DCOFTRIM + 1)。
14. 重复从步骤 7 开始的循环过程，直到两个相邻 DCOFTRIM 设置的 DCO 抽头值超过 256。
15. 重新加载 DCOTAP 最接近 256 的已记录 CSCTL0 和 CSCTL1。

软件时间算法是从默认值调整 DCOFTRIM，直到 FLL 锁的 DCO 抽头值超过 256，其中 256 是 DCO 抽头范围 0 ~ 511 的中间值。DCO 抽头由 FLL 自动调谐，因此 FLL 锁定的 DCO 抽头将随温度和电压变化而变化。建议将 DCO 抽头锁定在靠近中间值的位置，以确保 FLL 始终锁定以应对温度和电压的较大变化。

代码示例 `mcp430frxx_cs07.c` 中提供了此软件例程的实现方案，前者位于本应用报告的参考软件包 (MSP430FR2xx/FR4xx DCO+FLL 代码示例) 中。或者，驱动程序库 API 也会实现此例程。为了更清楚地理解，图 3-3 显示了流程图

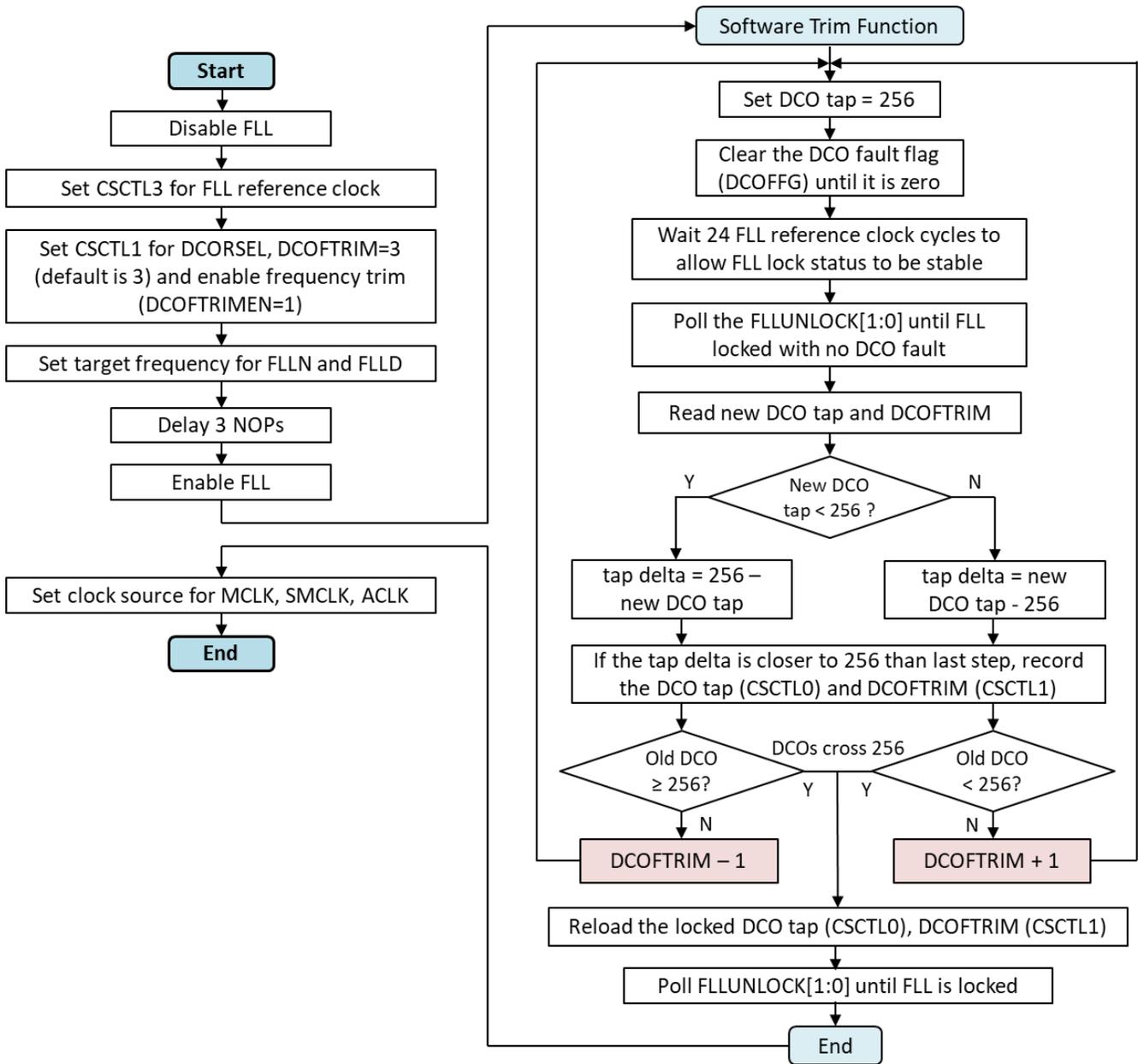


图 3-3. DCO+FLL 软件调整流程图

3.2.2 如何设置 DCORSEL

代码示例 `mcp430frxx_cs07.c` 未提及如何为中间频率设置 DCORSEL - DCO 范围选择。用户在进行选择时可能感到困惑。例如，如何为 MSP430FR2311 的目标频率 5.5MHz 设置 DCORSEL？在图 1-4 中，可以设置 DCORSEL = 2 和 DCORSEL = 3，因为将在软件调整函数中校正 DCOFTRIM 以进行频率调节。对于这种情况，必须明确 DCORSEL 的理想设置。否则，最终锁定的 DCO 抽头可能不在中间范围内，因此存在 DCO 抽头调谐接近 DCO 抽头边界 0 或 511 的风险。

对于节 3.2.1 中引入的软件调整推荐程序序列，要求是在 DCO 抽头超过中频 256 后退出 while 循环，因此存在以下风险：如果目标频率接近定义的 DCORSEL 频率范围的边界同时 DCORSEL 设置不正确，软件调整函数将不会结束。

f _{DCO} , 4MHz	DCO frequency 4 MHz	DCORSEL = 010b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 000b, DCO = 0	T	3.0 V	2	MHz
		DCORSEL = 010b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 000b, DCO = 511	T	3.0 V	3.4	
		DCORSEL = 010b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 111b, DCO = 0	T	3.0 V	5	
		DCORSEL = 010b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 111b, DCO = 511	T	3.0 V	8.2	
f _{DCO} , 2MHz	DCO frequency 2 MHz	DCORSEL = 001b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 000b, DCO = 0	T	3.0 V	1	MHz
		DCORSEL = 001b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 000b, DCO = 511	T	3.0 V	1.7	
		DCORSEL = 001b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 111b, DCO = 0	T	3.0 V	2.5	
		DCORSEL = 001b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 111b, DCO = 511	T	3.0 V	4.2	
f _{DCO} , 1MHz	DCO frequency 1 MHz	DCORSEL = 000b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 000b, DCO = 0	T	3.0 V	0.5	MHz
		DCORSEL = 000b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 000b, DCO = 511	T	3.0 V	0.85	
		DCORSEL = 000b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 111b, DCO = 0	T	3.0 V	1.2	
		DCORSEL = 000b, DISMOD = 1b, DCOFTRIM = 111b, DCO = 511	T	3.0 V	2.1	

图 3-4. MSP430FR2355 的 DCO 频率范围

例如，图 3-4 显示了 MSP430FR2355 的若干 DCO 频率范围。对于目标频率 3.2MHz，可选择 DCORSEL=1（频率范围为 1MHz 至 4.2MHz）或 DCORSEL=2（频率范围为 2MHz 至 8.2MHz）。如果设置 DCORSEL=1，推荐的软件调整函数将不会退出主函数，这是因为 FLL 锁定的 DCO 抽头总是大于 256，DOC 抽头不可能超过 256。如果设置 DCORSEL=2，则软件调整函数将按预期正常运行。

DCORSEL 配置的推荐规则为：如果目标 DCO 频率介于 DCORSEL 定义的频率之间，则推荐的 DCORSEL 设置是定义频率更接近目标频率的值。

- 当 $F_{\text{Target_frequency}} - F_{\text{Defined_frequency}[n]} < F_{\text{Defined_frequency}[n+1]} - F_{\text{Target_frequency}}$ 时，将 DCORSEL 设为 n
- 当 $F_{\text{Target_frequency}} - F_{\text{Defined_frequency}[n]} > F_{\text{Defined_frequency}[n+1]} - F_{\text{Target_frequency}}$ 时，将 DCORSEL 设为 n+1
 - 其中 n 是 0~7 之间的 DCORSEL 设置。

对于上述目标频率为 5.5MHz 的情况，DCORSEL = 2 用于定义的频率 4MHz，而 DCORSEL=3 用于定义的频率 8MHz。结果表明，4MHz 更接近 5.5MHz，而非 8MHz。因此应选择 DCORSEL=2。

4 如何通过 DCO+FLL 快速锁定目标频率

DCO+FLL 的典型 FLL 锁定时间约为 200ms。某些应用要求在上电或复位后的 1~2ms 内提供准确的时钟。这给 DCO+FLL 带来了挑战，因为 FLL 锁定需要时间。但是，可以通过将自定义校准 DCO 抽头值直接加载到寄存器中来实现此功能。

4.1 快速锁定出厂调整频率

对于高出厂调整频率，节 3.1 中已讨论了快速锁定解决方案。但还有一些需要注意的事项。

1. 在 FLL 锁定之前避免过冲问题。这在节 3.1 的以下步骤中提到过：将 MCLK 源切换到 REFOCLK 或 XT1CLK 并延迟至少 10 个周期。
2. 封装偏移影响：封装应力效应导致特定数据表中的 TLV 数据可能与目标定义频率存在一些偏差。请参阅 [MSP430FR2111 器件勘误表](#) 中的勘误编号 CS14。此问题仅见于 MSP430FR2xx/4xx 系列器件中的 MSP430FR2111。

4.2 快速锁定其他工厂定义的频率和中间频率

还可以通过直接加载校准的 DCO 寄存器值来锁定其他工厂定义的频率和中间频率。

目标频率没有任何出厂 DCO 抽头调整值，因此建议在 DCO+FLL 的第一次软件调整后，将 FLL 锁定 DCO 抽头、DCOFTRIM 和 DCORSEL 值存储到非易失性 FRAM 存储器中。可以在工厂测试环节或在现场完成此 DCO 校准。应有一个校准标志集，它也存储在 FRAM 存储器中。当产品上电或硬件再次复位时，如果设置了校准标志，可以直接从 FRAM 存储器加载存储的 DCO 寄存器值以加速 FLL 锁定。

由于出厂测试环境可能与实际应用环境不同，因此建议在固件中开发现场校准功能。用户可以现场触发软件调整函数，将校准后的 DCO 抽头、DCOFTRIM 和 DCORSEL 值存储到非易失性 FRAM 存储器中，然后设置校准标志。

MSP430FR2x5x_FastLock_InBetweenFreq.c 中提供了针对 MSP430FR2355 的此软件例程示例，前者位于本应用报告的参考软件包 ([MSP430FR2xx/FR4xx DCO+FLL 代码示例](#)) 中。

在示例代码中，将调用软件调整函数以校准 DCO。软件调整 FLL 锁定后，将 DCO 寄存器 CSCTL0、CSCTL1 和校准标志存储到信息 FRAM 存储器中。将在下一次 MSP430™ 复位时检查校准标志。如果设置了该标志，代码将直接从 FRAM 加载校准 DCO 寄存器 CSCTL0 和 CSCTL1，并在推荐的延迟时间过后检查 FLL 锁定状态。

为了缩短软件调整执行时间，在可变结束循环设置条件中增加了条件 (`newDcoDelta < FLL_Softtrim_DCOTapDelta0`)。FLL_Softtrim_DCOTapDelta0 是 DCO 抽头差值到中端 256 的阈值设置。如果新的 DCO 抽头在 ($256 \pm \text{FLL_Softtrim_DCOTapDelta0}$) 范围内，则可以认为将 DCOFTRIM 调到了理想值。FLL_Softtrim_DCOTapDelta0 在示例代码中设置为 50，这是基于相邻 DCOFTRIM 设置的测试结果。

可以在示例代码中选择 3 个目标频率：3.2MHz、1MHz 和 8MHz。为每个频率定义了微 TARGET_FREQ_3_2MHz、TARGET_FREQ_1MHz 和 TARGET_FREQ_8MHz。XT1CLK 和 REFOCLK 也可通过微定义 CRYSTALXT1_FOR_FLLREF 选作 FLL 基准时钟源。示例代码的默认设置是 3.2MHz 目标频率，并将 REFOCLK 作为 FLL 基准时钟源。

将代码下载到 MSP430FR2355 后，首次 FLL 锁定时间将长达 91.5ms，用于 DCO+FLL 校准并将校准数据存储到 FRAM 中。电路板再次复位时，由于从 FRAM 加载 DCO 校准数据，FLL 锁定时间将小于 757us。请查找 [MSP430FR2355 LaunchPad™ 开发套件](#) 的锁定时间测试结果 (在图 4-1 和图 4-2 中)。



图 4-1. 具有快速锁定代码示例的 MSP430FR2355 的首次加电 FLL 锁定时间



图 4-2. 具有快速锁定代码示例的 MSP430FR2355 的后续加电或复位 FLL 锁定时间

图 5-1 (在节 5.2 中) 所示为快速锁定示例代码的流程图。

5 针对温度和电压漂移的 FLL 锁定目标频率

5.1 DCO+FLL 时钟精度随温度和电压漂移

FLL 锁定后，DCO 时钟频率将通过 FLL 自动跟踪基准时钟频率。如果基准时钟频率随温度和电压漂移，DCO 时钟频率也会漂移。对于存在温漂和电压漂移的应用，需要考虑 FLL 基准时钟漂移性能，以保证时钟精度。

如果将 REFOCLK 作为 FLL 基准，需要检查特定数据表中的 REFO 漂移规格 df_{REFO}/dT (REFO 频率温漂) 和 $df_{\text{REFO}}/dV_{\text{CC}}$ (REFO 频率电源电压漂移)。

晶体时钟频率在温度和电压范围内非常稳定，因此如果产品应用环境中温度或电压变化较大且时钟精度要求较高，建议使用晶体频率 (XT1CLK) 作为 FLL 基准时钟。

5.2 针对温度和电压漂移的 FLL 锁定的增强型软件调整

如节 3.2.1 中所述，DCO 抽头由 FLL 自动调谐。如果温度和电压发生漂移，FLL 锁定 DCO 抽头也会漂移。从有限的测试来看，MSP430FR2xx/4xx 器件之间的 DCO 漂移差异很大。对于 -40°C 到 85°C 的温度漂移，它可被视为 40 到 160 个 DCO 抽头。

应考虑以下场景：

- 带有 MSP430FR2xx/4xx 的产品在室温下上电并锁定 DCO+FLL。
- 工作环境温度在数小时后变为 -40°C。
- DCO 抽头可能会偏离中间值 256 - 增加并接近 511。
- 当 DCO 抽头漂移超出范围 (0~511) 时，FLL 将被解锁。

这与 MSP430FR4133 器件勘误表中的勘误编号 CS11 属于同类问题。

对于没有太大电压漂移和温漂的工作环境 (即没有 DCO 抽头漂移超出范围的风险)，节 3.2 中介绍的原始软件调整方法可能非常有效。但对于温度和电压漂移很大的工作环境，如果 DCO+FLL 精度对系统很重要，就需要考虑 FLL 锁定失败的可能性。

使 FLL 始终锁定的解决方案是监视 DCO 抽头并在 DCO 抽头漂移到范围边界时再次执行软件调整。

- 如果 DCO 抽头接近最低边界 (DCO = 0) 或最高边界 (DCO = 511)，并且与边界的差异小于定义的阈值抽头 (建议最少设置 50 个抽头以保留裕度来覆盖进一步的温度和电压漂移)，建议更改 DCOFTRIM 并重新执行软件调整。

节 3.2 中介绍的原始软件调整方法不会考虑 DCOFTRIM 处于边界 0 或 7 的情形。如果 DCO 抽头漂移较大或 DCORSEL 设置错误，则存在软件调整子例程无法返回主函数的风险。因此有必要增强软件调整函数以覆盖温度和电压的较大变化。

- 如果 DCOFTRIM 已处于边界 0 或 7 而 FLL 锁定的 DCO 抽头接近边界并小于定义的阈值抽头，建议在执行软件调整之前更改 DCORSEL 并将 DCOFTRIM 设置为默认值 3。

这是针对 DCO 监视器和增强型软件调整的解决方案。

1. 监视 DCO 抽头。
 - 如果 DCO 抽头数 < 50 或 (511 - DCO 抽头数) < 50，则调用增强型软件调整函数。
2. 增强型软件调整函数。
 - 配置与图 3-3 中的软件调整函数相同。
 - 添加 DCOFTRIM 边界检查和 DCORSEL 调整以覆盖较大的变化。
 - 如果 DCO 抽头数 < 256 且 DCOFTRIM > 0，则将 DCOFTRIM 减小 1。
 - 如果 DCO 抽头数 < 256 且 DCOFTRIM = 0，则将 DCORSEL 减小 1 并将 DCOFTRIM 设为 3。
 - 如果 DCO 抽头数 > 256 且 DCOFTRIM > 7，则将 DCOFTRIM 增大 1。
 - 如果 DCO 抽头数 > 256 且 DCOFTRIM = 7，则将 DCORSEL 增大 1 并将 DCOFTRIM 设为 3。
 - 针对不同锁定条件返回不同值。

MSP430FR2x5x_FastLock_InBetweenFreq+PVTVariation(EnhancedSoftTrim+DCOMonitor).c 中提供了针对 MSP430FR2355 的此软件例程示例，前者位于本应用报告的参考软件包 (MSP430FR2xx/FR4xx DCO+FLL 代码

示例) 中。它基于节 4.2 的示例代码，并添加增强型软件调整和 DCO 监视器功能。图 5-1 显示了此示例代码的流程图。

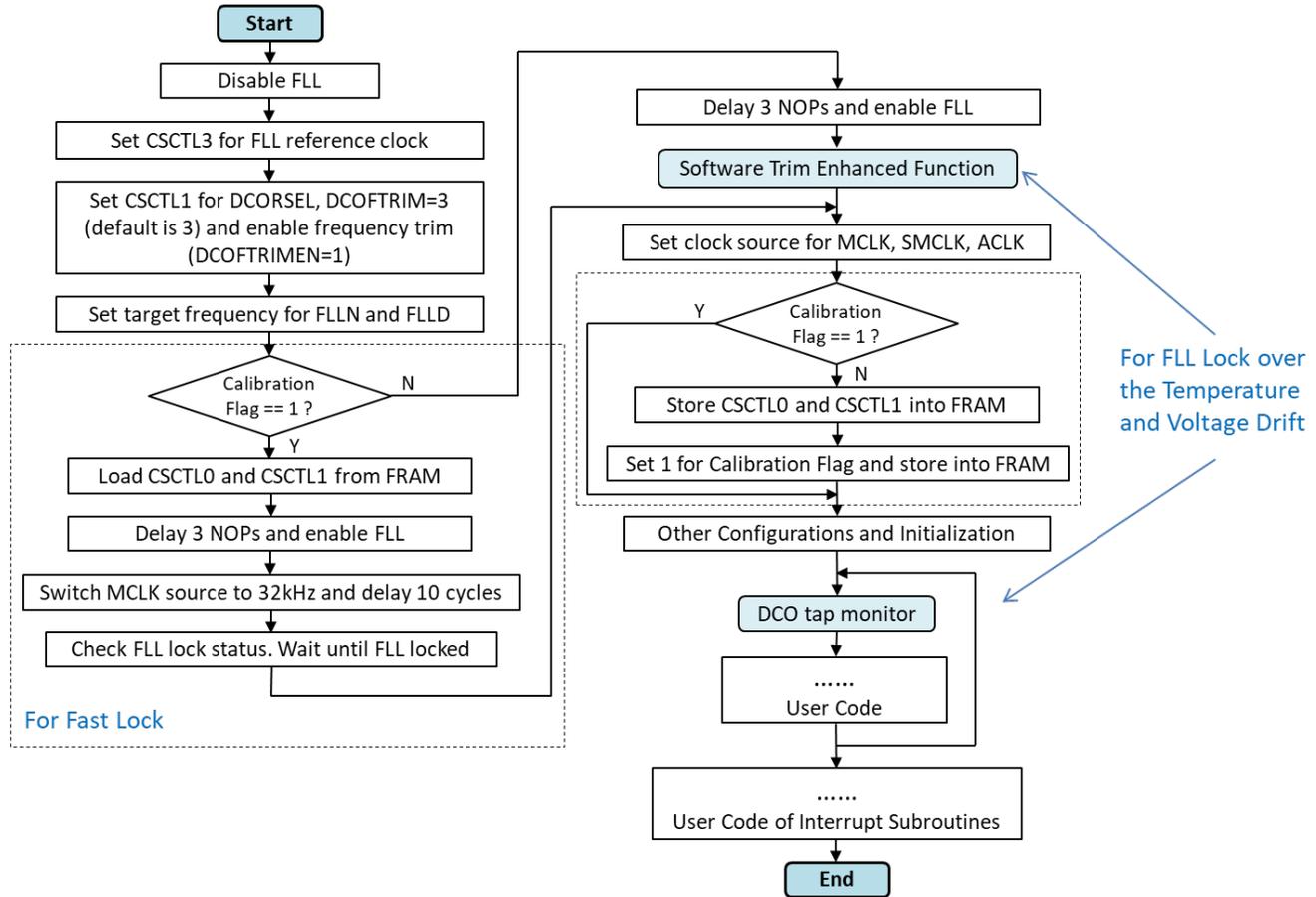


图 5-1. DCO+FLL 快速锁定的流程图，增强型软件和 DCO 监视器

通常，对于节 3.2 中的软件调整函数，如果 DCORSEL 设置正确且 FLL 已锁定，则无需更改 DCOFTRIM，因为 DCO 抽头超过中间值 256，这为 DCO 抽头漂移到边界提供了足够的裕度以覆盖温度变化。但是，如果 FLL 锁定的 DCO 抽头在上电时接近边界 0 或 511，并且温度和电压变化很大，DCO 抽头有漂移超出范围的风险，则需要考虑 DCO 监视器和增强型软件调整。

增强型软件调整和 DCO 监视器子例程可用于覆盖 MSP430FR2xx/4xx 器件的工艺、温度和电压变化。它还可用作针对 MSP430FR4133 器件勘误表中问题 CS11 的权变措施。

此外，此增强型软件调整还可以解决子例程无法退出的问题，如节 3.2.2 中所述 - 目标频率为 3.2MHz，DCORSEL=1。在示例代码中，目标频率为 3.2MHz，并且设置了 DCORSEL=1。根据测试结果，将 DCORSEL 调整为 2，并且 DCO 抽头数接近于中间值 256。

6 总结

MSP430FR2xx/4xx 中的 DCO+FLL 与其他 MSP430™ 系列略有不同。由于 DCO 抽头步长较小，DCOCLK 抖动也较小。但这也为 FLL 引入了 DCO 频率调谐覆盖范围缺口。此外，默认的 DCOFTRIM 值可能不是目标频率的理想值，因此请求 DCOFTRIM 调谐，而 FLL 不会在硬件中自动实现它。因此引入了软件调整解决方案。对于温度和电压变化很大的特定应用，DCO 抽头有漂移超出范围的风险，因此必须考虑 DCO 监视器和增强型软件调整解决方案。

通过增强型软件调整解决方案，可以为 DCO+FLL 锁定任何低于器件最大频率的频率。这为需要生成特定目标频率的应用提供了灵活性。对于需要快速锁定的应用，通过将自定义校准 DCO 设置直接加载到寄存器中的方式提供代码示例，这些寄存器在 DCO+FLL 首次软件调整后存储在内置非易失性 FRAM 存储器中。

参考文献

1. [MSP430FR235x、MSP430FR215x 混合信号微控制器](#)
2. [MSP430FR231x 混合信号微控制器](#)
3. [MSP430FR413x 混合信号微控制器](#)
4. [MSP430F552x、MSP430F551x 混合信号微控制器](#)
5. [MSP430FR4133 器件勘误表](#)
6. [MSP430FR2111 器件勘误表](#)
7. [MSP430FR4xx 和 MSP430FR2xx 系列用户指南](#)
8. [使用 DCO 库](#)
9. [使用 VLO 库](#)
10. [控制 MSP430F11x 的 DCO 频率](#)
11. [使用 MSP430™ MCU 的可编程锁频环](#)
12. [MSP430FR235x、MSP430FR215x 代码示例](#)
13. [MSP430FR231x 代码示例](#)
14. [MSP430FR243x、MSP430FR253x、MSP430FR263x 代码示例](#)
15. [MSP430FR2355 LaunchPad™ 开发套件](#)

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