助你在新的 8 位嵌入式设计中减少高频开关转换器的成本和电路板空间

作者：Silicon Labs 公司 Brian Lampkin

通用 8 位 MCU

基于微控制器（MCU）的嵌入式设计减少物料清单（BOM）成本和尺寸是首要的设计考虑之一。在带有开关转换器的 8 位 MCU 设计中实现这些设计目标的途径之一是采用高频时钟输出驱动这些开关转换器，而不是采用传统的低频脉宽调制（PWM）输出。这种技术可以减少开关转换器中电感器容量大小，从而降低 BOM 成本和电路板空间需求。

背景

开关转换器通常在嵌入式系统中被用于有效提升或者降低电压。这些转换器使用电感器来存储和传递能量到系统中的负载。电感器周期性接通以便把电能换边成电感器的能量。当电源被关断时，电感器的能量被释放到负载。这些转换器通常由 PWM 信号来控制接通和断开，并且这一信号特性能够影响转换器的输出特性。

例如，下面让我们来考虑一个升压型转换器，它是输出电压高于输入电压的开关转换器。

连续模式

通常，升压转换器运行在“连续”模式。这意味着，转换器中电感器存储的能量在开关周期之间并未完全释放（比如：电感器放电流未达到零）。用于确定连续模式升压变换器输出电压的公式是相当简单的：

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D}$$

其中，V_o 等于输出电压，V_i 等于输入电压，D 等于占空比。在这种情况下，输出电压可以通过简单的改变开关元件的 PWM 占空比来调整。然而，该模式有一点需要注意：电感器必须足够大，以存储在其充电和放电循环中系统所需的能量。这意味着开关频率越慢，电感器充电和放电的时间越长，因此需要更大容量的电感器。当然，电感器容量越大也就越昂贵，所以一般开关转换器设计倾向于更高的开关频率而不是更低的开关频率。

然而，更高开关频率所带来的好处也有上限。当开关频率增加时，电路中开关元器件（通常是 MOSFET）和电感器内的损耗也会增加，因此一旦这些损耗达到限制，那么开关频率也就达到了上限。

一些 8 位 MCU，例如 Silicon Labs 的 C8051 和 EFM8 器件，有能力使用片内可编程计数器阵列（PCA）模块产生可变占空比的 PWM 输出，这意味着它们能够很好的驱动运行于连续模式下的升压转换器。然而，最大的 PWM 频率通常低至 95.7kHz（最快内部振荡器通常为 24.5MHz，然后被 256 分频后用于 8 位 PWM），按照开关转换器标准来看这是相当慢的。这也意味着，通常用于控制连续模式下开关转换器的 8 位 MCU 需要相对容量加大、且昂贵的电感器。

可用的在线计算器能够帮助开发人员确定在连续模式下升压转换器所需的组件大小，例如 https://learn.adafruit.com/diy-boost-calc/the-calculator。

例如，我们假设下面的设计需求：

Vin = 3V
Vout = 12V
Iout = 20mA
开关频率 = 95.7kHz

为了在 75%占空比下运行开关转换器，我们需要 147μH 的电感器。

非连续模式

连续模式的替代模式是“非连续”模式，其中电感器电流在开关循环的放电周期中被允许完全释放。这种方法会使输出公式复杂化：

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{V_i D^2 T}{2 L I_o}$$

其中，L 是电感值，I_o 是输出电流，T 是开关周期（开关频率的倒数）。正如你所看到的，该公式更复杂，同时它仍然包含占空比作为依赖项，而且它引入了额外的依赖项，甚至采用固定占空比时，我们也能够使用它生成预期的输出。例如，所有的其它条件不变，如果我们成比例的降低 T 和电感器容量 L，那么输出特性将保持不变。这意味着我们可以使用任意的占空比，然后增加开关频率以减小电感器容量大小和成本。

此外，在这种模式下 PCA 有一有用特性：频率输出生成。在这种模式下，能够产生 50%占空比的频率输出，在正常条件最大能够达到 SYSCLK 的一半或者 12.25MHz。由于之前提及的开关损耗的因素，开关转换器通常不会运行于如此高的频率，典型的运行频率范围在 100kHz 至 4MHz。在更合理的 3.062MHz 开关频率下（24.5MHz SYSCLK 被 8 分频），我们能够重做之前的示例，这一次使用非连续模式，并且采用 50%的固定占空比：

Vin = 3V
Vout = 12V
Iout = 20mA
开关频率 = 3.062MHz
占空比 = 50%

这一次，所需要的电感器大小减小到 2.04uH！在相同输出特性条件下，这仅是连续模式下 PWM 示例中所需电感容量大小的 1/72。

除了电感容量~2.2 μH 对比~150μH 之外，其它方面也具可比性：

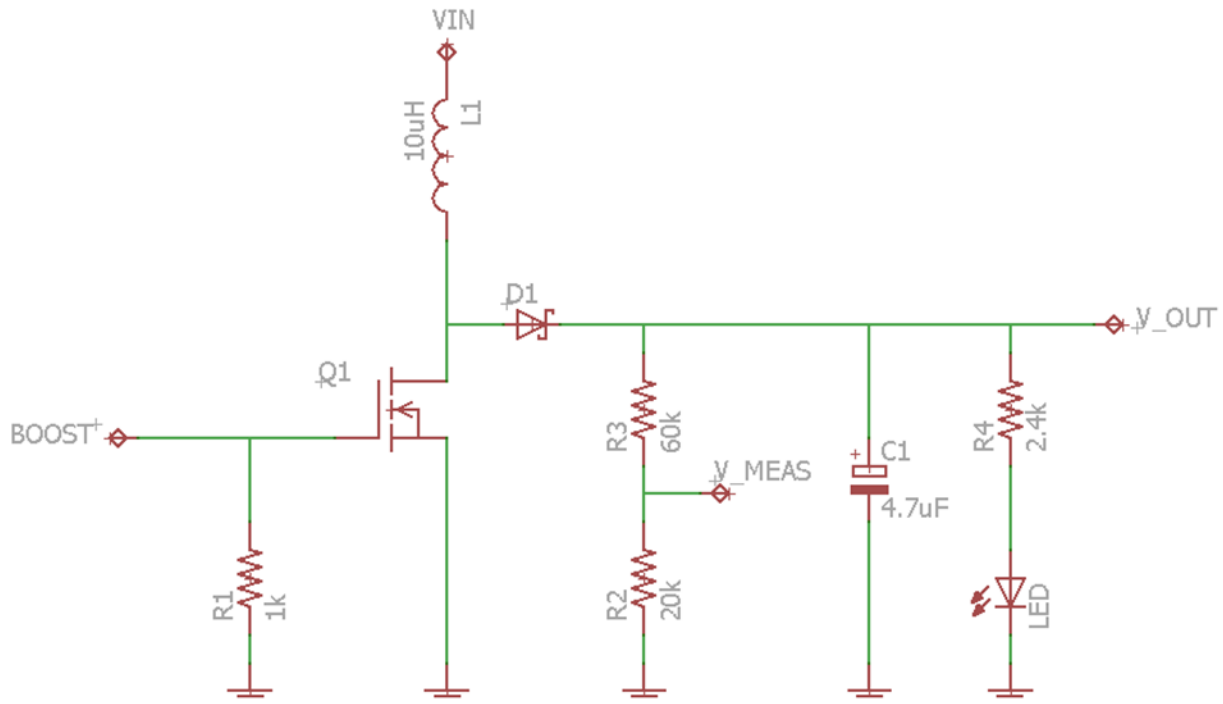
SRN4026-151M : 150 µH, 220mA: $0.18 @1000 : 4mm x 4mm
MLZ2012A2R2M: 2.2 µH, 210mA: $0.058 @1000 : 2mm x 1.25mm

正如你所看到的，这一更小容量的电感导致 BOM 成本减小了 12.2 美分，或减少 68%。封装面积也减小了 11.5mm^2 或 72%。

示例电路和固件

作为概念证明，我们已经开发了相关的电路和固件。在前面的例子中，电路的特征是静态。只要输入电压为 3V，负载在 12V 下持续消耗 20mA 电流，那么 MCU 仅需要输出一个 3.062MHz 方波给开关电路，保持稳定的输出。如果负载在 12V 下消耗电流小于 20mA，那么输出电压将连续增加直至达到平衡。由于没有任何形式的反馈机制，如果负载变化，我们不能确定输出电压。

在下面的电路中，电压分压器允许 MCU 去测量输出电压，因此形成反馈回路，这使得我们能够在运行时调整输出的行为。调整输出电压能够通过这样的方式：在输出电压太高时禁止频率输出，当输出电压太低时重新使能它。此外，一个仿真负载由 R4 和 LED 构建，并被连接到电压输出上：



固件针对 EFM8BB1 MCU 而写，但是只要具有 PCA 模块和带窗口比较特性的模数控制器（ADC），它就可以移植到任意 8 位 MCU 上。PCA 配置输出通道 0 到 P0.1 引脚，输出频率 3.062MHz。ADC 配置在 P0.3 引脚，采样率 300kHz，使用定时器 3 溢出来触发转换。

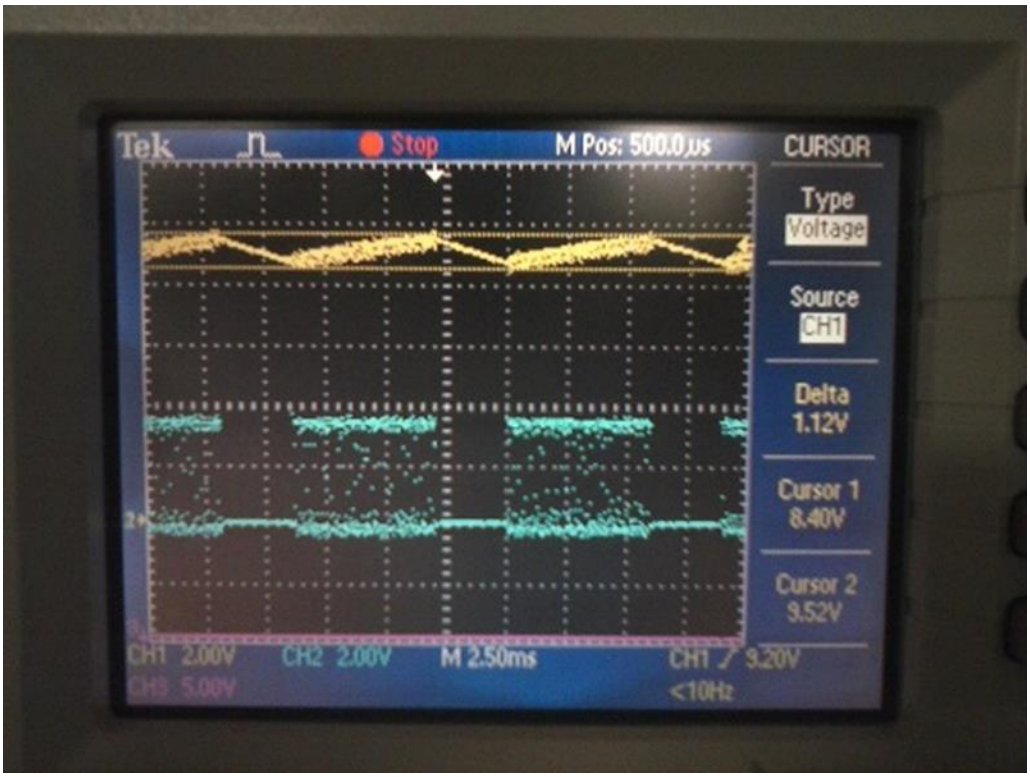
ADC 也被配置为使用窗口比较特性，仅仅当 ADC 采样值落入预期的电压范围之外时才触发中断。所有配置完成后，整个反馈环路被包含在 ADC 中断处理函数（ISR）中：

```
SI_INTERRUPT (ADC0WC_ISR, ADC0WC_IRQn)
{
        uint16_t sample;

        //清除窗口比较中断标志位
        ADC0CN0_ADWINT = 0;

        //存储 ADC 采样值
        sample = ADC0;

        if (sample > MAX_COUNTS)
        {
                //禁止 PWM
                P0MDOUT &= ~P0MDOUT_B1__BMASK;

                //设置 LT 值，清除 GT 值
                ADC0LT = MIN_COUNTS;
                ADC0GT = 0xFFFF;
        }
        else if (sample < MIN_COUNTS)
        {
                //使能 PWM
                P0MDOUT |= P0MDOUT_B1__PUSH_PULL;

                //设置 GT 值，清除 LT 值
                ADC0LT = 0;
                ADC0GT = MAX_COUNTS;
        }
}
```

如果 ADC 测量值大于 ADC0GT 值或者小于 ADC0LT 值，那么中断被触发。如果测量值在这个范围内，那么不会发生任何事情。一旦进入 ISR，如果测量值超过了预期的最大值，那么频率输出被禁止。如果它小于预期值，那么频率输出被重新使能。通过把端口配置为开漏模式输出而被有效禁止，因此引脚被电阻器 R1 拉低，进而关闭 MOSFET Q1。

ADC 代码中定义的 MAX_COUNTS 代表 9.5V，MIN_COUNTS 代表 8.5V。这有效的限制输出电压在 8.5-9.5V。

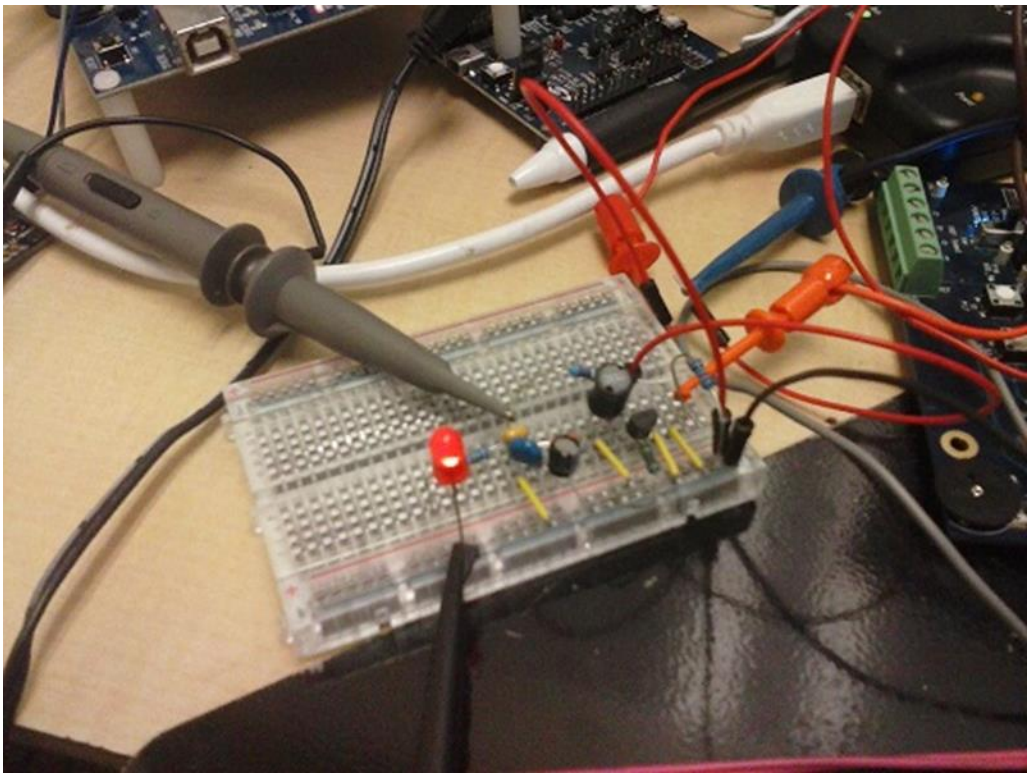
下面示波器图像显示了采用该代码的电路输出信号。



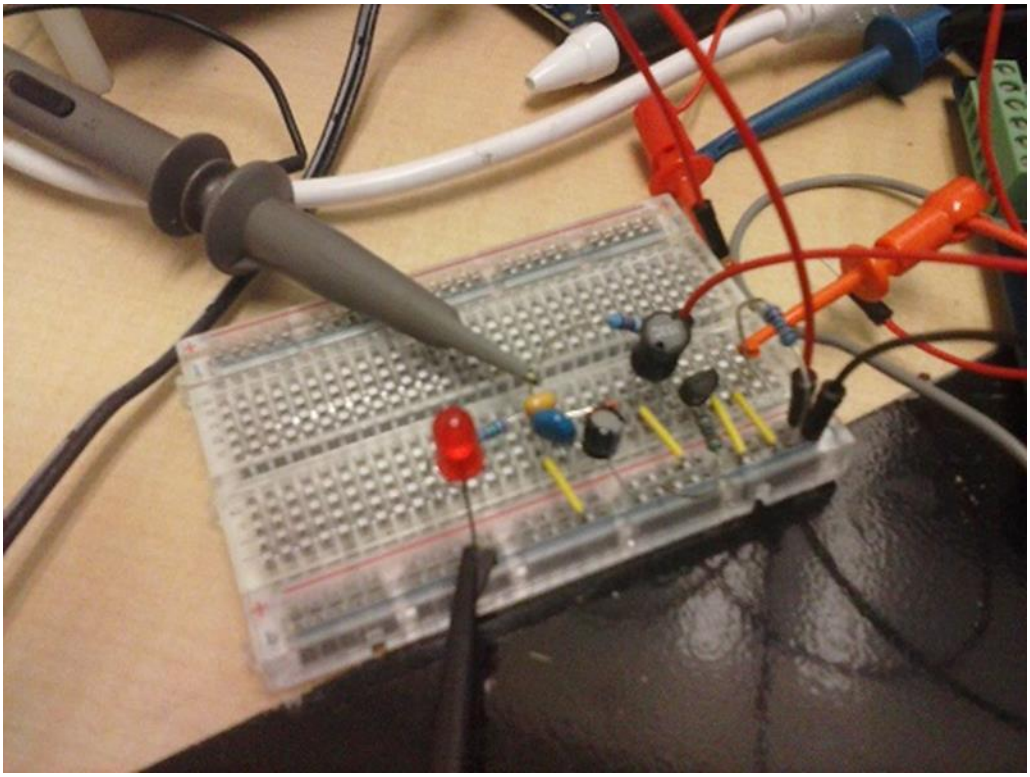
通道 1 是输出电压。通道 2 是施加到电路 BOOST 引脚的频率输出。正如你所看到的，当电压低于 8.5V 时，固件激活频率输出；当电压大于 9.5V 时，频率输出被禁止。

在实践中，使用窗口比较模式的 ADC 需要极少的 CPU 开销。在我们的测量电路中，CPU 在 ISR 中大约仅有 12 µs 的活跃时间，每 8.9ms 两次。总的 CPU 开销大约是 0.14%。减小输出电容导致需要更高频率更新，即输出电压需要更少时间充电到最大限值，最少时间放电到最小限值。

下面是 BOOST 引脚连接到 MCU 的电路：



下面是 BOOST 引脚断开时的电路：



在这种情况下，输出电压会下降至 Vin，这时不能达到点亮 LED 所需的要求。

总结

开关转换器通常被用于嵌入式应用中，去有效转换电压到其它值。这些开关转换器经常通过带有可变占空比的 PWM 信号去控制转换器的输出特性。然而，对于大多数 MCU 来说，生成可变占空比 PWM 信号的能力被限制在相对的低频率，因此需要使用更大的电感器。作为替代，高频、固定占空比的时钟频率输出能够显著降低电感器容量大小，减少 BOM 成本和电路板空间需求。

# # #