

结合CLC和NCO实现高分辨率PWM

作者: Cobus Van Eeden
Microchip Technology Inc.

简介

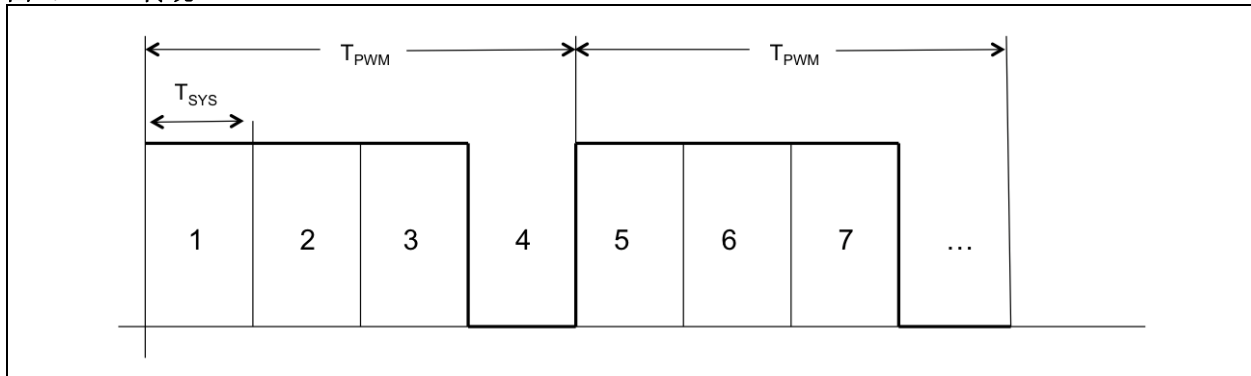
虽然许多应用可以使用分辨率低于8位的PWM，但是有一些应用（例如灯具调光）由于人眼灵敏度的原因需要较高分辨率。

背景

传统的 PWM 使用定时器来生成规则的开关频率 (T_{PWM})，然后使用纹波计数器来确定在脉冲结束之前，输出需要保持多少个时钟的高电平。

按图1所示调整输出脉宽，可生成具有5种可能占空比设置（0%、25%、50%、75%或100%）的PWM信号。

图1: 传统PWM



通过对可能的脉宽设置数 (N) 求以 2 为底的对数，可计算 PWM 的有效分辨率（以位为单位）。

公式1:

$$\text{分辨率} = \log_2(N)$$

对于在 16 MHz 频率下运行的器件，最小占空比调整增量为 62.5 ns（一个系统时钟）。如果 PWM 配置为在 200 kHz 的开关频率下（开关周期为 5 μ s）运行，则当占空比寄存器设置为 80 个时钟（80 x 62.5 ns = 5 μ s）时，占空比可达到 100%。这将生成略高于 6 位的有效 PWM 分辨率，因为有 80 个步阶可选。这是由于一个开关周期包含 80 个系统时钟。

了解到有 80 个可选的占空比步阶后，可通过如下公式（公式2）计算精确的 PWM 分辨率：

公式2:

$$\log_2 80 = 6.32 \text{ 位}$$

对于具有 10 位占空比寄存器而在 16 MHz 时钟下运行的 PWM，将由于 15.6 kHz 开关频率的限制而开始损失分辨率。如果采用更高的 PWM 开关频率，则在 10 位占空比寄存器中的所有步阶使用完之前，占空比将达到 100%，对于所有剩余的值，输出将只会保持在 100% 占空比。

此时达到的频率可通过如下公式（公式3）计算：

公式3:

$$\frac{F_{osc}}{\text{步阶数}} = \frac{16 \text{ MHz}}{2^{10}} = \frac{16,000,000}{1024} = 15.6 \text{ kHz}$$

在大多数PWM应用中，PWM的开关频率远高于输出的变化频率。通过使用低通滤波器来对此PWM信号进行滤波，可获得所需输出。滤波器本质上是计算PWM信号的平均值来去除PWM的高频开关分量，然后将此平均值作为输出。例如，如果构建一个开关电源，输出电压将与占空比成正比关系。由于存在这种关系，因此对PWM占空比的调整越小，输出的变化就越小，对输出的控制也就越精确。

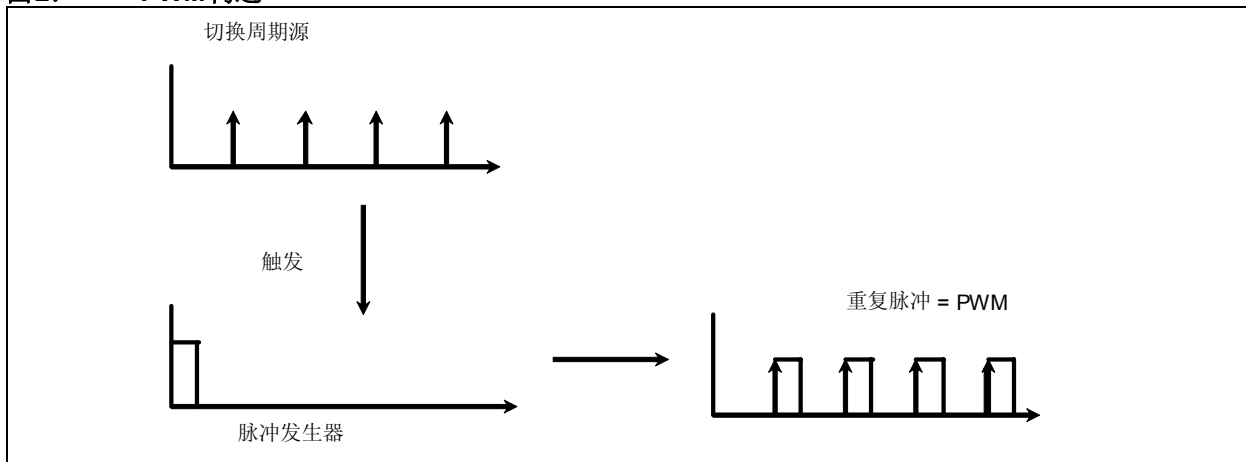
从控制系统的角度看，如果能够对输出进行少量调整，可有效降低PWM引入的量化增益。在控制系统中，降低此增益对于确保系统的稳定性至关重要。

设计

PWM构造

原则上，PWM通过组合两个参数来创建。一个是重复触发，用于确定脉冲的频率（开关周期或开关频率），另一个为单脉冲发生器，用于确定脉冲的宽度（占空比），如图2所示。

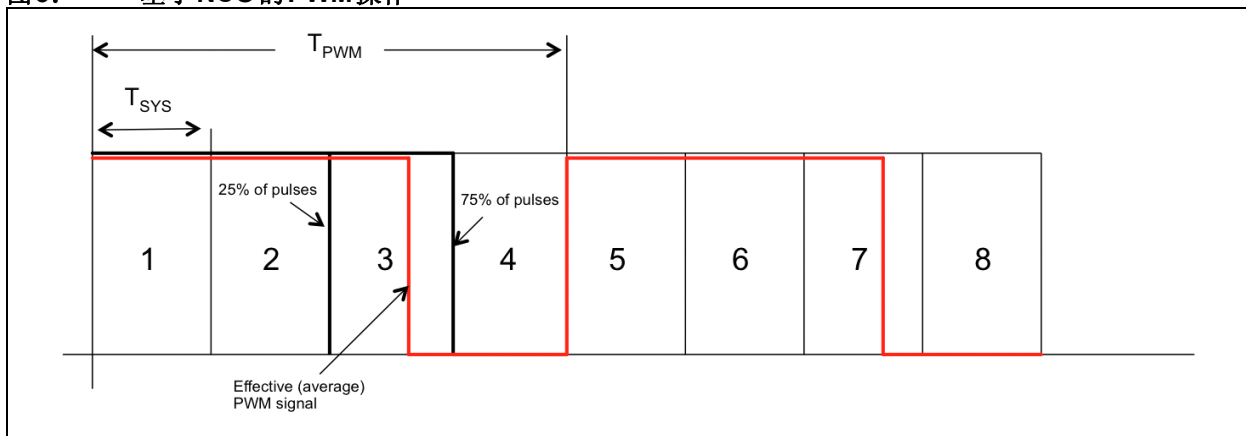
图2: PWM构造



为提高有效PWM分辨率，我们将使用PIC®器件上的NCO外设来构建单稳态电路（触发后可提供固定持续时间的单脉冲的电路）。

我们将使用NCO的功能来生成一个在两个规定比例的值之间变化的信号，从而在两个系统时钟之间产生一个平均脉宽，如图3所示。PWM信号脉宽将变化（抖动）一个时钟周期，变化的比例由NCO配置精确决定。

图3: 基于NCO的PWM操作

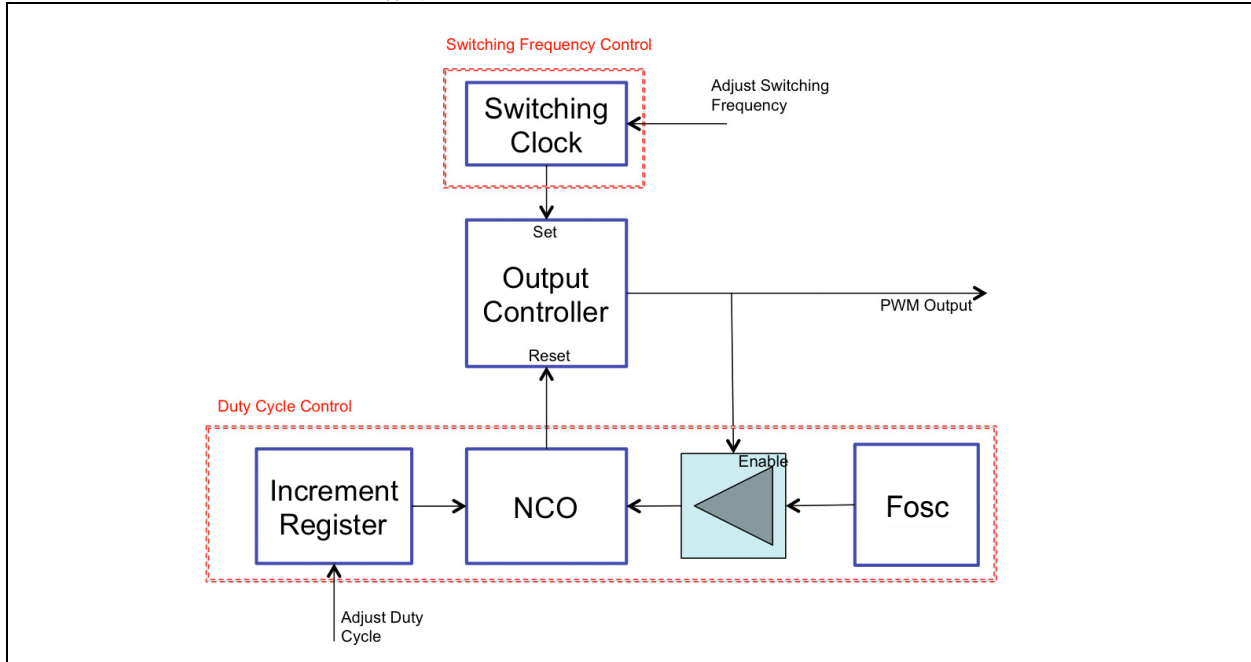


在输出产生平均值的任何应用（例如，平均功率转移至 SMPS 或照明应用中的负载）中，脉宽的变化是完全可接受的，因为平均脉宽可精确控制。

NCO 外设本身不能生成 PWM 信号，但我们将通过 CLC 添加一些逻辑来更改其行为，以生成 PWM 输出。

我们将使用传统 PWM 作为时钟源触发 PWM 周期来实现此操作，并使用 NCO 来确定脉宽。可以使用任意数量的时钟源（例如，定时器甚至外部信号），在一些应用中，甚至可能需要使用外部触发信号来启动脉冲，例如构建电源时所需的零电流检测电路。图 4 给出了该工作原理的简化框图。

图4： 基于NCO的PWM工作原理



当开关时钟指示应产生下一个脉冲时，使用 CLC 中的控制逻辑设置输出，当 NCO 溢出后，清除此输出以完成脉冲。

表1: 不同增量寄存器值下计算出的PWM脉宽

增量值	NCO F_{OUT} (Hz)	平均脉宽 (ns)
65000	991,821	1,008.246
65001	991,837	1,008.231
20000	305,176	3,276.800
20001	305,191	3,276.636
100	1,526	655,360.000
101	1,541	648,871.287

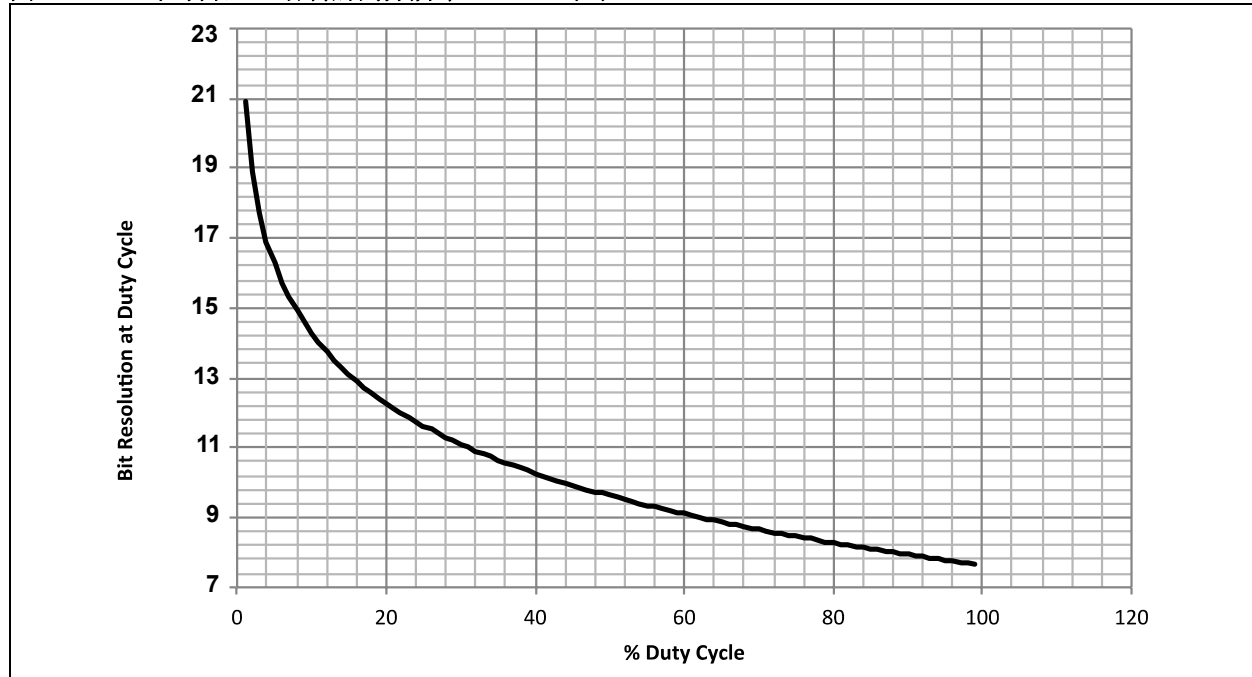
特性

需要注意的是，NCO 设计为提供对频率的线性控制。而随后对脉宽的控制不是线性的。正如从上文用于计算 T_{PULSE} 的公式（公式5）中所见，脉宽将随着频率倒数 ($1/x$) 的变化而变化。

因此，在从0%到100%的整个占空比范围内，PWM的有效分辨率并不是常数。

对于每种占空比设置，我们都可以计算特定点的有效分辨率，并将其绘制在图形上。该曲线会随着开关频率的变化而有所不同，因为脉宽的调整与开关频率无关。当 $F_{SW} = 3 \text{ kHz}$ 且时钟为 16 MHz 时，图形如图6所示。

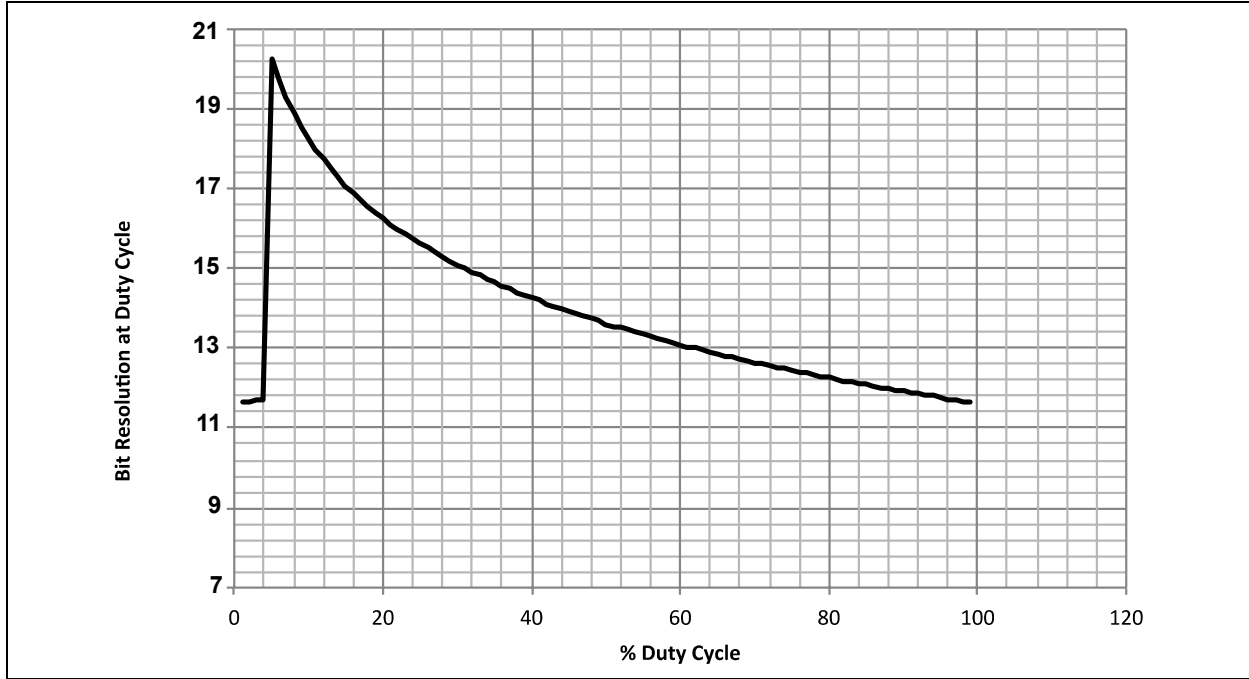
图6: 针对占空比绘制的高分辨率PWM（时钟 = 16 MHz，FSW = 3 kHz）



虽然在接近0%占空比时可获得相当于21位的分辨率，但是在100%占空比时分辨率会降至仅7.5位，在这一点上，传统PWM可以实现更高的分辨率。

有趣的是，可能与直觉相反，我们可通过降低 NCO 输入时钟频率来提高分辨率。将此时钟降至 1 MHz 即可得到下面的结果（图7）。

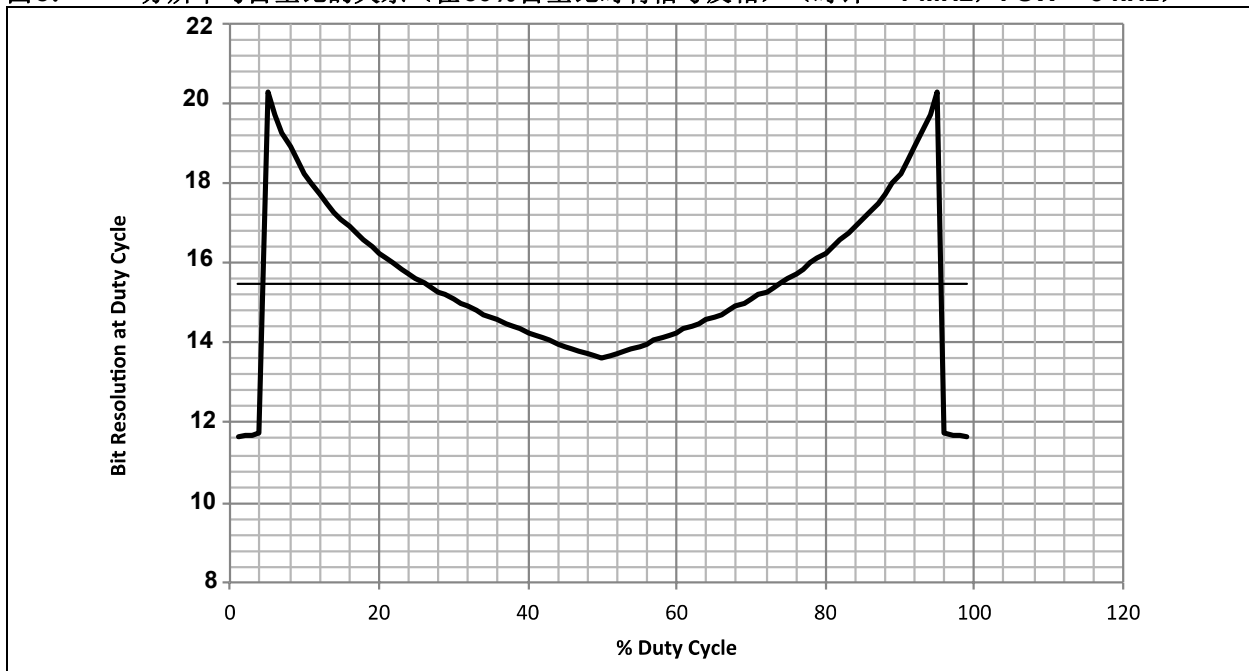
图7: 针对占空比绘制的高分辨率PWM (时钟 = 1 MHz, FSW = 3 kHz)



当然，如我们所见，接近 0% 占空比时还存在限制，即达到增量寄存器最大值并且无法再生成较窄脉冲，但此时分辨率不会再降至 11 位以下。

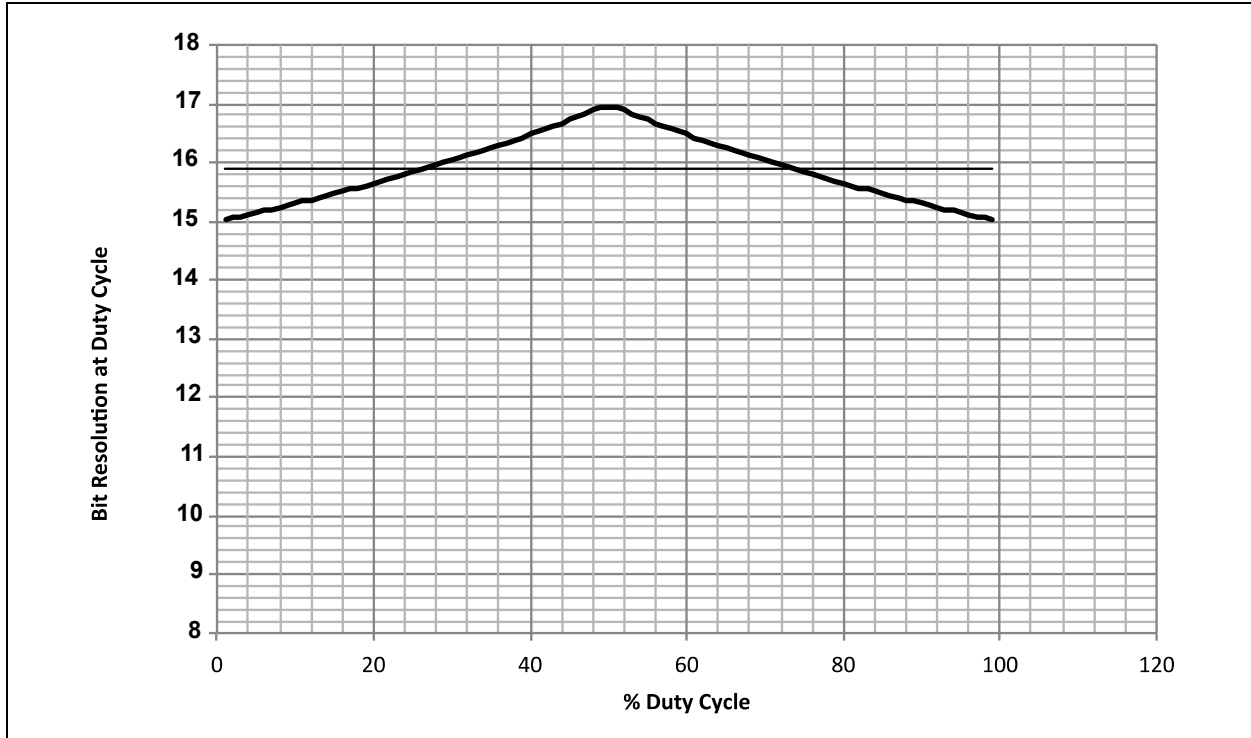
一种改善性能的方法是在超过 50% 占空比时将 PWM 信号反相。这样可以有效地将 50% 占空比以下的性能映射到 50% 占空比以上的区域，同时保持较高分辨率。我们仍可以使用达到增量限制的原始曲线。这将产生下面的图形 (图8)，其条件与上面的图形相同。

图8: 分辨率与占空比的关系 (在 50% 占空比时将信号反相) (时钟 = 1 MHz, FSW = 3 kHz)



当需要使用此技术实现可能的最高开关频率和最高分辨率时，将采用如图9所示的配置。此图显示了在500 kHz 开关频率下使用 16 MHz 时钟可达到的分辨率。

图9： 针对占空比绘制的高分辨率PWM（在50%占空比时将信号反相）（时钟 = 16 MHz，FSW = 500 kHz）



总结

传统的 PWM 在相对较低的开关频率下会开始损失有效分辨率。在某些应用中，开关频率必须相当高，并且在这些频率下需要尽可能高的 PWM 分辨率，此时可以将 NCO 与 CLC 结合使用来产生高分辨率 PWM。

系统时钟速度为 16 MHz 的传统 PWM 可实现的最小脉宽增量变化为 62.5 ns。如果可用的最快 PWM 时钟为 $F_{osc}/4$ ，则最小脉宽增量变化可延长至 250 ns。

在同一器件上，使用本应用笔记所介绍的技术可以构建脉宽增量变化低至 15 ps 的 PWM。

即使高分辨率不是主要需求，此解决方案对于许多应用来说仍具吸引力，因为它为器件的功能增加了额外的 PWM，或者具有开启 / 关断时间恒定、而频率可变的 PWM，这样在高效功率转换器中执行零电流开关时，可根据需要从外部触发脉冲。

注:

请注意以下有关 Microchip 器件代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术指标。
- Microchip 确信：在正常使用的情况下，Microchip 系列产品是当今市场上同类产品中最安全的产品之一。
- 目前，仍存在着恶意、甚至是非法破坏代码保护功能的行为。就我们所知，所有这些行为都不是以 Microchip 数据手册中规定的操作规范来使用 Microchip 产品的。这样做的人极可能侵犯了知识产权。
- Microchip 愿与那些注重代码完整性的客户合作。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。

代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字千年版权法案 (Digital Millennium Copyright Act)》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下，能访问您的软件或其他受版权保护的成果，您有权依据该法案提起诉讼，从而制止这种行为。

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为您提供便利，它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范，是您自身应负的责任。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对其使用情况、质量、性能、适销性或特定用途的适用性的声明或担保。Microchip 对因这些信息及使用这些信息而引起的后果不承担任何责任。如果将 Microchip 器件用于生命维持和 / 或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切伤害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任，并加以赔偿。在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中以其他方式转让任何许可证。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、dsPIC、FlashFlex、KEELOQ、KEELOQ 徽标、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、PIC³² 徽标、rfPIC、SST、SST 徽标、SuperFlash 和 UNI/O 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

FilterLab、Hampshire、HI-TECH C、Linear Active Thermistor、MTP、SEEVAL 和 The Embedded Control Solutions Company 均为 Microchip Technology Inc. 在美国的注册商标。

Silicon Storage Technology 为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、BodyCom、chipKIT、chipKIT 徽标、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、HI-TIDE、In-Circuit Serial Programming、ICSP、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、mTouch、Omniscient Code Generation、PICC、PICC-18、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、REAL ICE、rfLAB、Select Mode、SQI、Serial Quad I/O、Total Endurance、TSHARC、UniWinDriver、WiperLock、ZENA 和 Z-Scale 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 是 Microchip Technology Inc. 在美国的服务标记。

GestIC 和 ULPP 为 Microchip Technology Inc. 的子公司 Microchip Technology Germany II GmbH & Co. & KG 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2013, Microchip Technology Inc. 版权所有。

ISBN: 978-1-62077-391-8

**QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
= ISO/TS 16949 =**

Microchip 位于美国亚利桑那州 Chandler 和 Tempe 与位于俄勒冈州 Gresham 的全球总部、设计和晶圆生产厂及位于美国加利福尼亚州和印度的设计中心均通过了 ISO/TS-16949:2009 认证。Microchip 的 PIC[®] MCU 与 dsPIC[®] DSC、KEELOQ[®] 跳码器件、串行 EEPROM、单片机外设、非易失性存储器 and 模拟产品严格遵守公司的质量体系流程。此外，Microchip 在开发系统的设计和生产方面的质量体系也已通过了 ISO 9001:2000 认证。



MICROCHIP

全球销售及服务中心

美洲

公司总部 **Corporate Office**
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 1-480-792-7200
Fax: 1-480-792-7277

技术支持:

<http://www.microchip.com/support>

网址: www.microchip.com

亚特兰大 **Atlanta**

Duluth, GA
Tel: 1-678-957-9614
Fax: 1-678-957-1455

波士顿 **Boston**

Westborough, MA
Tel: 1-774-760-0087
Fax: 1-774-760-0088

芝加哥 **Chicago**

Itasca, IL
Tel: 1-630-285-0071
Fax: 1-630-285-0075

克里夫兰 **Cleveland**

Independence, OH
Tel: 1-216-447-0464
Fax: 1-216-447-0643

达拉斯 **Dallas**

Addison, TX
Tel: 1-972-818-7423
Fax: 1-972-818-2924

底特律 **Detroit**

Farmington Hills, MI
Tel: 1-248-538-2250
Fax: 1-248-538-2260

印第安纳波利斯 **Indianapolis**

Noblesville, IN
Tel: 1-317-773-8323
Fax: 1-317-773-5453

洛杉矶 **Los Angeles**

Mission Viejo, CA
Tel: 1-949-462-9523
Fax: 1-949-462-9608

圣克拉拉 **Santa Clara**

Santa Clara, CA
Tel: 1-408-961-6444
Fax: 1-408-961-6445

加拿大多伦多 **Toronto**

Mississauga, Ontario,
Canada
Tel: 1-905-673-0699
Fax: 1-905-673-6509

亚太地区

亚太总部 **Asia Pacific Office**

Suites 3707-14, 37th Floor
Tower 6, The Gateway
Harbour City, Kowloon
Hong Kong
Tel: 852-2401-1200

Fax: 852-2401-3431

中国 - 北京

Tel: 86-10-8569-7000
Fax: 86-10-8528-2104

中国 - 成都

Tel: 86-28-8665-5511
Fax: 86-28-8665-7889

中国 - 重庆

Tel: 86-23-8980-9588
Fax: 86-23-8980-9500

中国 - 杭州

Tel: 86-571-2819-3187
Fax: 86-571-2819-3189

中国 - 香港特别行政区

Tel: 852-2943-5100
Fax: 852-2401-3431

中国 - 南京

Tel: 86-25-8473-2460
Fax: 86-25-8473-2470

中国 - 青岛

Tel: 86-532-8502-7355
Fax: 86-532-8502-7205

中国 - 上海

Tel: 86-21-5407-5533
Fax: 86-21-5407-5066

中国 - 沈阳

Tel: 86-24-2334-2829
Fax: 86-24-2334-2393

中国 - 深圳

Tel: 86-755-8864-2200
Fax: 86-755-8203-1760

中国 - 武汉

Tel: 86-27-5980-5300
Fax: 86-27-5980-5118

中国 - 西安

Tel: 86-29-8833-7252
Fax: 86-29-8833-7256

中国 - 厦门

Tel: 86-592-238-8138
Fax: 86-592-238-8130

中国 - 珠海

Tel: 86-756-321-0040
Fax: 86-756-321-0049

亚太地区

台湾地区 - 高雄

Tel: 886-7-213-7828
Fax: 886-7-330-9305

台湾地区 - 台北

Tel: 886-2-2508-8600
Fax: 886-2-2508-0102

台湾地区 - 新竹

Tel: 886-3-5778-366
Fax: 886-3-5770-955

澳大利亚 **Australia - Sydney**

Tel: 61-2-9868-6733
Fax: 61-2-9868-6755

印度 **India - Bangalore**

Tel: 91-80-3090-4444
Fax: 91-80-3090-4123

印度 **India - New Delhi**

Tel: 91-11-4160-8631
Fax: 91-11-4160-8632

印度 **India - Pune**

Tel: 91-20-2566-1512
Fax: 91-20-2566-1513

日本 **Japan - Osaka**

Tel: 81-6-6152-7160
Fax: 81-6-6152-9310

日本 **Japan - Tokyo**

Tel: 81-3-6880-3770
Fax: 81-3-6880-3771

韩国 **Korea - Daegu**

Tel: 82-53-744-4301
Fax: 82-53-744-4302

韩国 **Korea - Seoul**

Tel: 82-2-554-7200
Fax: 82-2-558-5932 或
82-2-558-5934

马来西亚 **Malaysia - Kuala Lumpur**

Tel: 60-3-6201-9857
Fax: 60-3-6201-9859

马来西亚 **Malaysia - Penang**

Tel: 60-4-227-8870
Fax: 60-4-227-4068

菲律宾 **Philippines - Manila**

Tel: 63-2-634-9065
Fax: 63-2-634-9069

新加坡 **Singapore**

Tel: 65-6334-8870
Fax: 65-6334-8850

泰国 **Thailand - Bangkok**

Tel: 66-2-694-1351
Fax: 66-2-694-1350

欧洲

奥地利 **Austria - Wels**

Tel: 43-7242-2244-39
Fax: 43-7242-2244-393

丹麦 **Denmark - Copenhagen**

Tel: 45-4450-2828
Fax: 45-4485-2829

法国 **France - Paris**

Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

德国 **Germany - Munich**

Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

意大利 **Italy - Milan**

Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

荷兰 **Netherlands - Drunen**

Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

西班牙 **Spain - Madrid**

Tel: 34-91-708-08-90
Fax: 34-91-708-08-91

英国 **UK - Wokingham**

Tel: 44-118-921-5869
Fax: 44-118-921-5820

11/29/12