

Application Note

无中间伪影的无缝 PWM 占空比更新



Johnny Kim

摘要

脉宽调制 (PWM) 是用于许多嵌入式应用 (包括 LED 调光控制、电机控制和功率调节) 的核心技术。在没有适当同步的情况下进行 PWM 占空比更新时, PWM 可能会引入非预期的 PWM 占空比, 从而导致相应器件出现非预期行为, 例如非预期的 LED 闪烁或电机扭矩控制。在视觉和功能应用中, 这些影响均不可取, 尤其是在需要精度和平稳运行的应用中。本应用手册通过展示 LED 调光控制示例, 介绍了如何产生不良占空比, 以及如何使用德州仪器 (TI) TDA4x 平台上的增强型脉宽调制 (EPWM) 模块克服这一问题, 以实现无缝的 PWM 占空比转换。

内容

1 简介.....	1
2 了解 TDA4x 上的 PWM 工作机制.....	2
2.1 PWM 架构概述.....	2
2.2 计数器比较寄存器和占空比控制.....	2
2.3 动作限定器与输出行为.....	2
2.4 同步与更新时序.....	2
3 立即 CMPA 寄存器更新导致的 PWM 占空比异常.....	2
4 向上/向下计数模式下的非预期 PWM 占空比.....	5
5 适用于 LED 调光控制的无缝 PWM 更新最佳实践.....	6
5.1 使用影子寄存器进行占空比更新.....	6
5.2 选择相应的计数器模式.....	6
5.3 影子寄存器下向上计数模式的寄存器配置.....	6
6 总结.....	8
7 参考资料.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

在德州仪器 (TI) 的 TDA4x 处理器系列中, PWM 生成通常使用 EPWM 模块来实现, 该模块支持一系列灵活的功能, 例如可配置的计数器模式、比较寄存器、影子加载和事件触发。这些功能对于实时、高性能的控制系统至关重要。

尽管 PWM 模块功能多样, 但如果配置不当, 尤其是在运行时更新占空比时, 可能会产生不良的输出行为。一个常见问题是在比较寄存器 (CMPA/CMPB) 立即更新而没有与 PWM 周期正确同步时, 出现中间占空比或错误的占空比。这些情况可能导致在敏感应用中出现视觉闪烁 (例如 LED)、电机扭矩突变或 EMI 尖峰等问题。

在实际设计中, 这对于确保占空比更新平稳进行, 而不会出现非预期的瞬态至关重要。这可以通过使用影子寄存器来实现, 影子寄存器将寄存器更新推迟到 PWM 周期中的安全点 (通常在周期边界处)。

本应用手册重点介绍了两种特定的 PWM 伪影来源, 并介绍了针对 TDA4x 平台优化的可靠设计:

- 立即更新与 PWM 占空比相关的寄存器。建议的设计是启用并使用影子寄存器机制, 确保更新与 PWM 周期同步生效。
- 在需要边沿对齐时序的应用中, 使用中心对齐 (向上/向下计数模式) PWM 模式。这种不匹配会导致不一致的行为, 尤其在依赖于上升沿或下降沿对齐的 LED 调光等应用中。建议在边沿对齐的应用中使用向上计数或向下计数模式。

本应用手册详细解释了这些问题，并以 EPWM 模块进行 LED 调光控制为例，提供了最佳实践。

2 了解 TDA4x 上的 PWM 工作机制

德州仪器 (TI) 的 TDA4x 平台通过 EPWM (增强型脉宽调制) 模块集成了高级 PWM 生成功能。这些模块可提供高分辨率且灵活的 PWM 信号控制，因此非常适合各种实时控制应用。

2.1 PWM 架构概述

TDA4x 中的每个 EPWM 模块都包含时基 (TB) 模块、计数器比较 (CC) 模块、动作限定器 (AQ) 模块和事件触发机制。时基计数器定义 PWM 波形的频率和周期，而计数器比较模块确定 PWM 信号在每个周期内何时发生转换。

EPWM 模块支持多种基于时基计数器 (TBCNT) 和时基周期 (TBPRD) 的计数器模式：

- 向上计数模式：TBCNT 从零计数到 TBPRD，然后复位。
- 向下计数模式：TBCNT 从 TBPRD 向下计数到零。
- 向上/向下计数模式：TBCNT 向上计数到 TBPRD，然后再向下计数到零，从而生成中心对齐的波形。

每种模式都会影响 PWM 的时序，以及计数比较值与输出转换的映射方式。

2.2 计数器比较寄存器和占空比控制

CMPA 寄存器存储着用于定义 PWM 输出占空比的比较值。例如，在向上计数模式下，当 TBCNT 与 CMPA 匹配时，高电平有效 PWM 波形可能在零时变为高电平，在低电平时变为低电平。相同的逻辑也适用于 CMPB，用于对第二个输出进行独立或互补控制。

重要的是，CMPA 支持两种更新方式：

- 立即模式：CMPA 的更改会在写入后立即生效。如果在错误的时间写入，这可能会导致周期中间出现干扰。
- 影子模式：写入 CMPA 的值会先保存在影子寄存器中，然后在预定义的事件（例如计数器等于零或周期匹配）时传输到活动寄存器，从而确保无干扰更新。

影子加载通过 CMPCTL 寄存器启用，对于将更新与 PWM 周期同步至关重要。

2.3 动作限定器与输出行为

动作限定器 (AQ) 模块控制 PWM 输出对 TBCNT = CMPA 等事件的响应方式。开发人员通过配置 AQCTLA 寄存器，根据比较匹配或计数器归零事件来定义置位、清零或翻转等动作。这种灵活的机制能够实现精确的波形整形。

2.4 同步与更新时序

TDA4x 允许使用同步输入和输出对 PWM 模块进行同步，从而实现跨多个通道的时间协调行为。此外，死区插入、跳变区逻辑和事件触发器等功能可在关键应用中提供安全且响应迅速的控制能力。

为避免动态运行过程中出现伪影，必须做到以下几点：

- 启用并正确配置影子寄存器。
- 选择与应用的时序预期相匹配的适当计数器模式。
- 除非保持精确的时序，否则在立即模式处于活动状态时，避免直接写入 CMPA 和 CMPB。

了解这些元件是在 TDA4x 平台上实现可靠且无伪影 PWM 行为的基础。

3 立即 CMPA 寄存器更新导致的 PWM 占空比异常

要改变 PWM 占空比，必须向 CMPA 寄存器写入新值。软件很难做到高度确定性的更新，因此 CMPA 寄存器可能在不合适的时刻更新，这会导致非预期的 PWM 占空比，进而在短时间内造成 LED 控制亮度异常或电机转速与扭矩控制失常。为了避免不可预测的更新，应使用影子寄存器更新来代替立即寄存器更新。让我们通过将 PWM 占空比从 20% 更改为 80%，尝试理解立即寄存器更新如何在向上计数模式下导致该问题。

考虑向上计数模式下的 PWM 配置为：当 TBCNT = 0 时输出高电平，当 TBCNT = CMPA 时输出低电平。如果 CMPA 寄存器在一个周期中途更新，根据新的 CMPA 值，PWM 输出可能会在当前周期中早于或晚于预期切换至低电平。这会导致持续一个或多个 PWM 周期的占空比失真。

以下寄存器配置可用于在向上计数模式下生成 20% 的 PWM 占空比。

```
EPWM_TBPRD = 62500 EPWM_TBCTL.CTRMODE = 0 → Up
count mode EPWM_CMPA = 12500 (= 62500 × 20%) EPWM_CMPCTL.SHDWAMODE = 1 → Immediate
mode
```

如下图所示，通过更新 CMPA 寄存器使 PWM 占空比达到 80%。

```
EPWM_CMPA = 50000 (= 62500 × 80%)
```

图 3-1 是通过逻辑分析仪探测到的 PWM 信号。

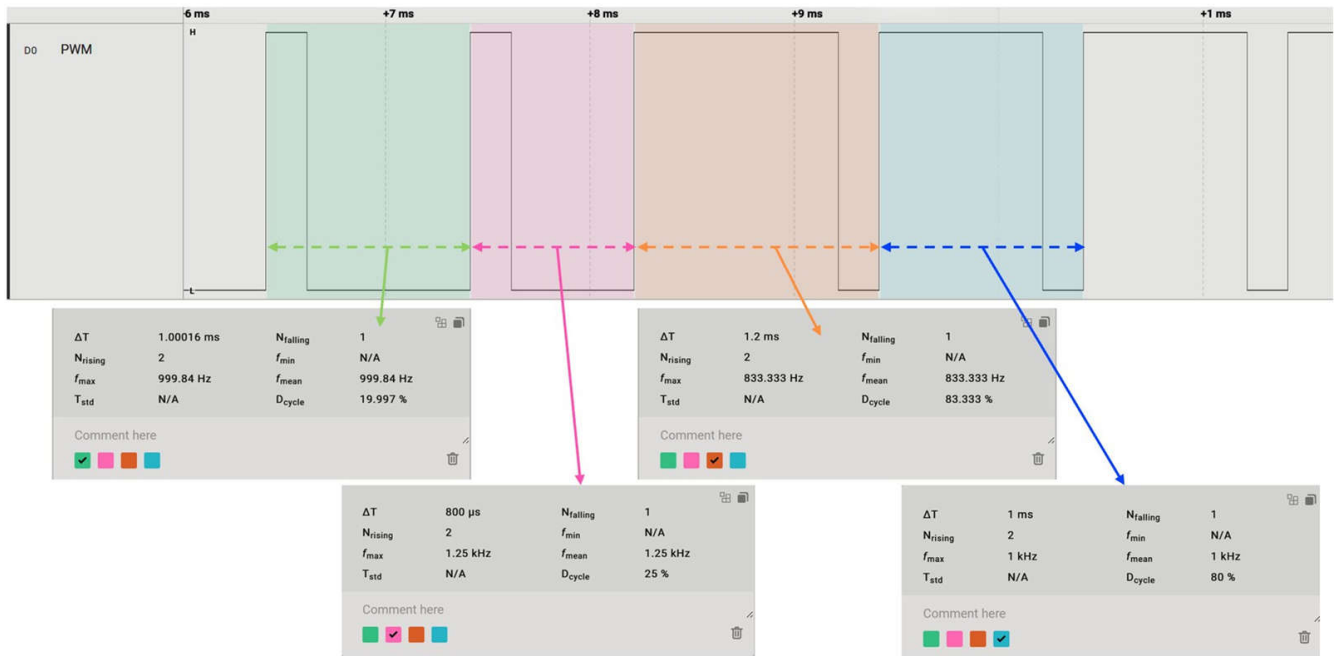


图 3-1. 探测向上计数模式下更新 CMPA 寄存器期间的 PWM 变化

预期占空比直接从 20% 变为 80%，但实际出现了 25% 和 83% 的非预期占空比。

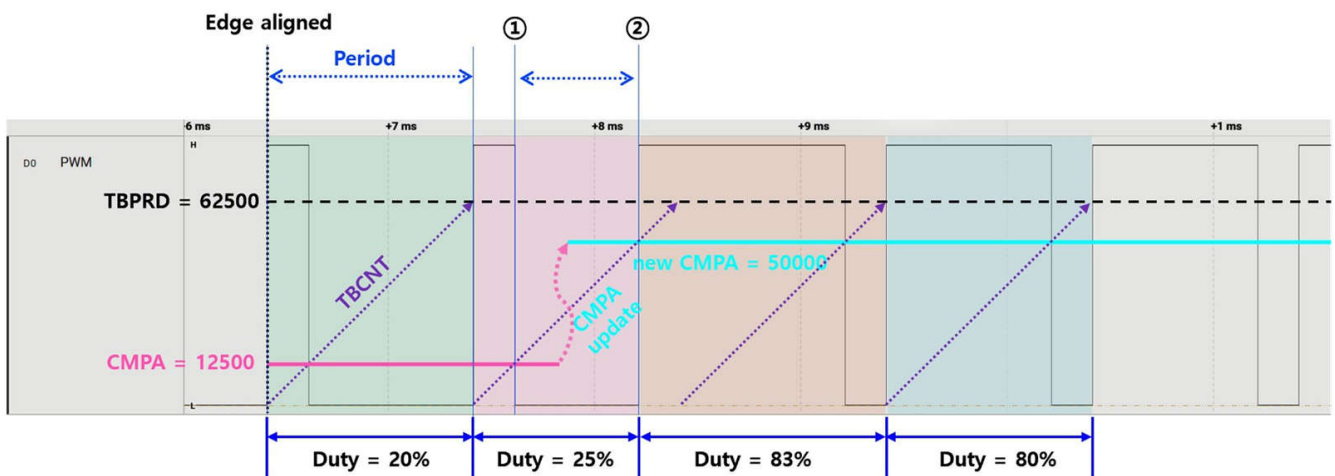


图 3-2. 分析向上计数模式下 PWM 占空比从 20% 变为 80%

具体分析如下。

- 当前占空比 = 20%。

$$Duty = 100 \times \frac{12500}{12500 + 50000} = 20\% \quad (1)$$

- 软件会在 ① 至 ② 之间将 50000 写入 CMPA 寄存器。
- CMPA 寄存器值会立即更新。
- PWM 在 ② 时翻转，导致占空比变为 25%。

$$Duty = 100 \times \frac{12500}{12500 + 37500} = 25\% \quad (2)$$

- 在随后的 PWM 周期中，PWM 占空比变为 83%。

$$Duty = 100 \times \frac{62500}{62500 + 12500} = 83\% \quad (3)$$

- 经过两个连续的 PWM 周期后，PWM 占空比稳定在 80%。

$$Duty = 100 \times \frac{50000}{50000 + 62500} = 80\% \quad (4)$$

备注

占空比计算公式如下。

$$Duty = 100 \times \frac{High \ Period}{High \ Period + Low \ Period} \quad (5)$$

这种行为的根本原因在于 CMPA 寄存器的立即更新模式。在此模式下，写入 CMPA 的任何新值都会立即生效——即便在周期中间写入亦是如此。由于 PWM 逻辑使用当前 CMPA 值进行比较事件判断，周期中间的变化会导致输出时序错误。这并非硬件缺陷，而是配置上的疏忽。立即更新在某些情况下是有效的，但对于运行过程中的动态占空比调整，这种更新方式并不安全。

4 向上/向下计数模式下的非预期 PWM 占空比

在使用 PWM 的 LED 调光应用中，保持预期的亮度转换至关重要。但是，当使用向上/向下计数模式生成 PWM 时，PWM 中心对齐，这会导致非预期的占空比，因此在占空比变化期间可能会出现非预期的亮度闪烁或干扰。让我们通过将占空比从 20% 改为 80% 的实例（同时应用影子寄存器更新），来理解和分析上下计数模式下为何会出现这一问题。

向上/向下计数模式会使用动作限定器 (AQ) 模块的两个事件。当 $TBCNT = CMPA$ 时，PWM 信号会发生翻转，但此事件在一个 PWM 周期内会出现两次，一次在向上计数阶段，一次在向下计数阶段。

以下寄存器配置可用于在向上/向下计数模式下生成 20% 的 PWM 占空比。

```
EPWM_TBPRD = 62500
EPWM_TBCTL.CTRMODE = 0x2 → Up-down count mode
EPWM_CMPA = 12500 (= 62500 × 20%)
EPWM_CMPCTL.SHDWAMODE = 0 → Shadow mode
```

如下图所示，通过更新 CMPA 寄存器使 PWM 占空比达到 80%。

```
EPWM_CMPA = 50000 (= 62500 × 80%)
```

图 4-1 是由逻辑分析仪探测到的 PWM 波形。

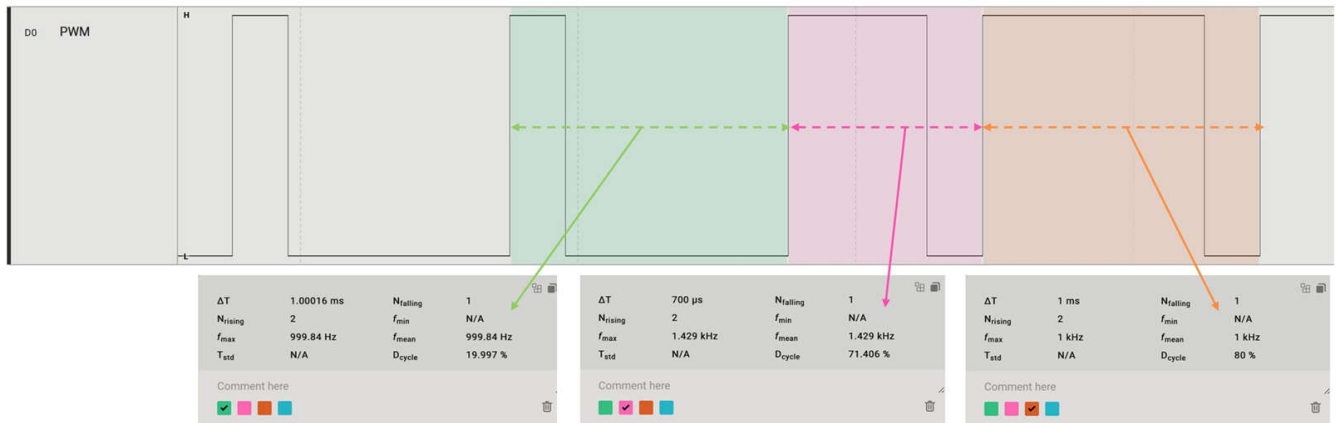


图 4-1. 探测向上/向下计数模式下更新 CMPA 寄存器期间的 PWM 变化

预期占空比会从 20% 直接变为 80%，但实际出现了 71% 这一非预期的占空比。

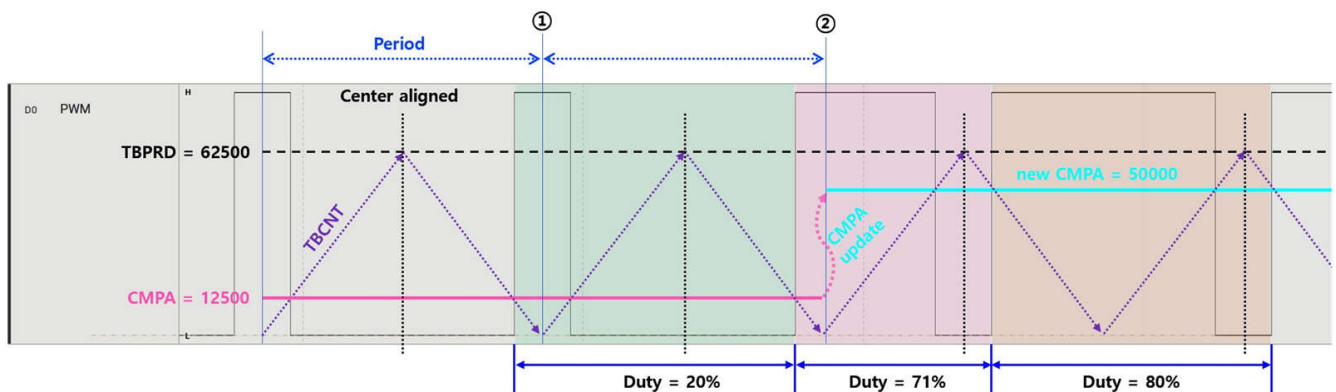


图 4-2. 分析向上/向下计数模式下 PWM 占空比从 20% 变为 80%

具体分析如下。

- 当前占空比 = 20%。

$$Duty = 100 \times \frac{25000}{25000 + 100000} = 20\% \quad (6)$$

- 软件会在 ① 至 ② 之间将 50000 写入 CMPA 寄存器。
- CMPA 寄存器处于影子模式，会在 TBCNT = 0 时更新。
- 当 TBCNT = 0 (即 ② 时刻) 时，PWM 发生翻转，占空比变为 71%。

$$Duty = 100 \times \frac{62500}{62500 + 25000} = 71\% \quad (7)$$

- 从后续 PWM 周期开始，PWM 占空比变为 80%。

$$Duty = 100 \times \frac{100000}{100000 + 25000} = 80\% \quad (8)$$

在图 4-2 中，通过更新 CMPA 寄存器值来更改 PWM 占空比，并使用影子技术相应地更新 CMPA 寄存器值。这意味着 CMPA 寄存器值的更新是确定性的，会在 TBCNT 为零的事件发生时进行。

即便使用了影子模式，PWM 占空比仍是从 20% 转换到 25%，再到 80%。这是中心对齐 PWM 生成方式的固有特性，无法避免，可能会在 LED 调光控制应用中导致 LED 闪烁等非预期结果。

5 适用于 LED 调光控制的无缝 PWM 更新最佳实践

要实现无伪影的 PWM 占空比变化，需要仔细进行配置并使用 EPWM 上提供的同步方法。以下最佳实践可帮助开发人员更好地理解 PWM 生成机制，以及如何正确配置 EPWM 模块。

5.1 使用影子寄存器进行占空比更新

始终启用 CMPA 比较寄存器的影子加载功能，通过配置 EPWM_CMPCTL.LOADAMODE = 0，将更新延迟到 PWM 周期的开始或结束，这样可以确保 CMPA 寄存器在特定事件 (如 TBCNT = 0 或 TBCNT = TBPRD) 时以确定性的方式更新。

5.2 选择相应的计数器模式

如前所述，影子寄存器更新模式也可能引发问题。因此，必须根据具体应用选择恰当的计数模式。在 LED 调光应用中，向上计数模式或向下计数模式是更合适的选择，而非向上向下计数模式 (中心对齐 PWM)。

5.3 影子寄存器下向上计数模式的寄存器配置

以下寄存器配置可用于在向上计数模式下生成 20% 的 PWM 占空比。

```
EPWM_TBPRD = 62500
EPWM_TBCTL.CTRMODE = 0 → Up count mode
EPWM_TBCTL.CLKDIV = 1
EPWM_CMPA = 12500 (= 62500 x 20%)
EPWM_CMPCTL.SHDWAMODE = 0 → Shadow mode
EPWM_CMPCTL.LOADAMODE = 0 → Load on TBCNT = 0 when shadow mode is enabled.
EPWM_AQCTLA.CAU = 0x3 → Toggle EPWM output
EPWM_AQCTLA.ZRO = 0x2 → Force EPWM output HIGH
```

采用这种配置后，无论何时向 CMPA 寄存器写入数值，都不会产生非预期的 PWM 占空比变化。图 5-1 是在将 PWM 占空比从 20% 更改为 80% 时探测到的 PWM 信号。

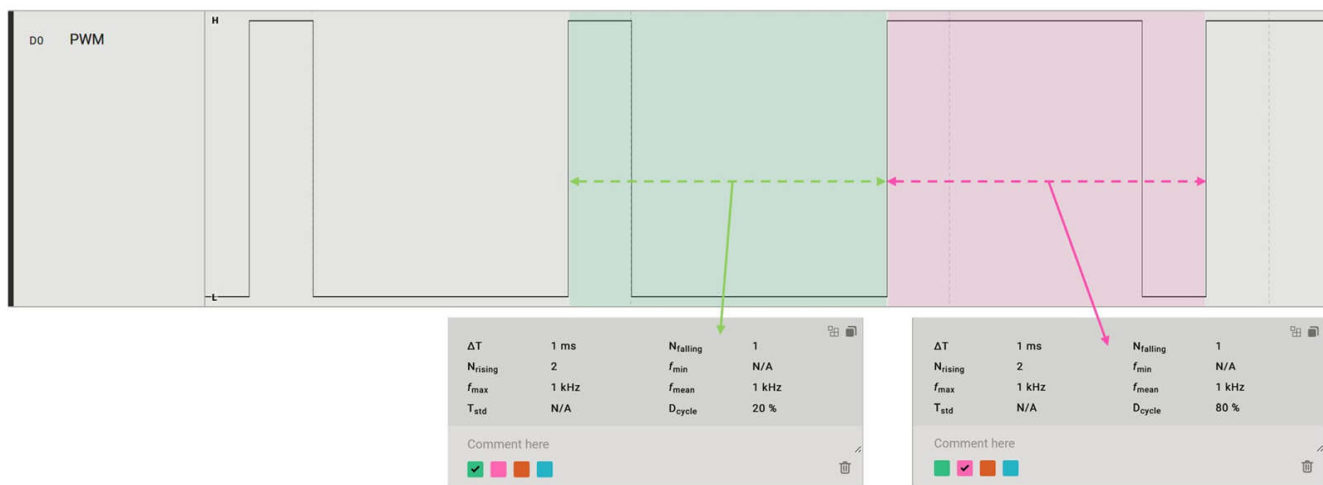


图 5-1. 在向上计数模式下探测 PWM 随影子模式的变化

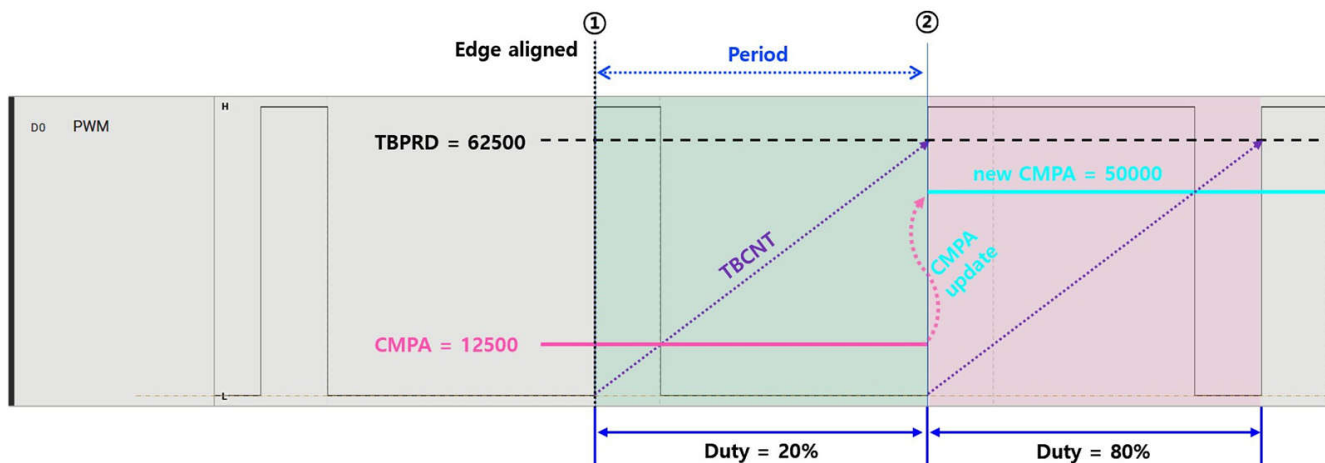


图 5-2. 在向上计数模式下使用影子模式分析 PWM 占空比变化

具体分析如下。

- 当前占空比 = 20%。

$$Duty = 100 \times \frac{12500}{12500 + 50000} = 20\% \quad (9)$$

- 软件会在 ① 至 ② 之间将 50000 写入 CMPA 寄存器
- CMPA 寄存器处于影子模式，会在 TBCNT = 0 时更新。
- 当 TBCNT = 0 (即 ② 时刻) 时，PWM 发生翻转，占空比变为 80%。

$$Duty = 100 \times \frac{50000}{50000 + 12500} = 80\% \quad (10)$$

- 在后续的 PWM 周期中，PWM 占空比保持在 80%。

这只是一个示例，用于说明如何控制 PWM 占空比，尤其针对 LED 调光，以避免非预期的亮度变化。

6 总结

本应用手册阐述了实现 PWM 占空比无缝转换的两个重要注意事项。具体而言，本应用手册详细说明了在运行时改变 PWM 占空比时，CMPA 等寄存器的立即更新以及向上/向下计数模式（中心对齐 PWM）的使用，如何根据应用场景导致非预期的 PWM 占空比变化。为了解决这些问题，本手册通过提供 LED 调光控制作为实用示例，推荐采用影子寄存器更新和向上计数模式。

通过理解和分析这些行为，开发人员能够更深入地了解如何根据应用的具体需求适当配置 EPWM 模块。基于此基础，可以在实时嵌入式系统中实现更稳健、无干扰 PWM 控制。

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI) , [TDA4VM 产品页面](#)
2. 德州仪器 (TI) , [《J721E DRA829/TDA4VM 处理器硅片版本 2.0 , 1.1 技术参考手册》](#)
3. 德州仪器 (TI) , [PROCESSOR-SDK-RTOS-J721E : 适用于 DRA829 和 TDA4VM Jacinto™ 处理器的软件开发套件](#)
4. 德州仪器 (TI) [MCAL 文档](#)

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司