

Application Note

中間的なアーティファクトのないシームレスな PWM デューティ サイクル更新



Johnny Kim

概要

パルス幅変調 (PWM) は、LED 調光制御、モーター制御、電力レギュレーションなど、多くの組み込みアプリケーションで用いられる中核技術です。PWM のデューティ サイクルを適切に同期させずに更新した場合、意図しない PWM デューティ サイクルが発生し、結果として LED のちらつきやモーターのトルク制御の乱れといった、対応デバイスの意図しない動作を引き起こす可能性があります。これらの影響は、視覚的および機能的なアプリケーションの両方において望ましくなく、特に高精度かつ滑らかな動作が求められる場面では問題となります。本アプリケーション ノートでは、意図しないデューティ サイクルがどのように発生するかを解説し、それを回避してシームレスな PWM デューティ サイクル遷移を実現する方法について、テキサス・インスツルメンツの TDA4x プラットフォーム上のエンハンストパルス幅変調 (EPWM) モジュールを用いた LED 調光制御の例を通じてご紹介します。

目次

1 はじめに.....	1
2 TDA4x における PWM 動作の理解.....	2
2.1 PWM アーキテクチャの概要.....	2
2.2 カウンタコンペア レジスタとデューティ サイクルの制御.....	2
2.3 アクション クオリファイアと出力動作.....	2
2.4 同期と更新タイミング.....	3
3 意図しない PWM デューティ サイクルの原因となる CMPA レジスタの即時更新.....	3
4 アップダウン カウント モードにおける意図しない PWM デューティ サイクル.....	6
5 LED 調光制御におけるシームレスな PWM 更新のためのベスト プラクティス.....	7
5.1 デューティ サイクルの更新にはシャドウ レジスタを使用する.....	7
5.2 適切なカウント モードの選択.....	7
5.3 シャドウ化されたアップカウント モードにおけるレジスタ設定.....	8
6 まとめ.....	10
7 参考資料.....	11

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

テキサス・インスツルメンツの TDA4x プロセッサ ファミリでは、PWM 生成は通常 EPWM モジュールを使用して実装されており、構成可能なカウント モード、コンペア レジスタ、シャドウ ロード、イベントトリガなどの柔軟な機能をサポートしています。これらの機能は、リアルタイムかつ高性能な制御システムに不可欠です。

柔軟性が高い一方で、PWM は適切に構成されていない場合、特にデューティ サイクルのランタイム更新時に望ましくない出力動作を引き起こす可能性があります。一般的な問題としては、コンペア レジスタ (CMPA/CMPB) を PWM 周期と適切に同期させずに即時更新した場合に、中間的または不正確なデューティ サイクルが出力されることが挙げられます。このような現象は、LED における視認可能なちらつき、モーターにおける突発的なトルク変動、あるいは高感度アプリケーションにおける EMI スパイクなどを引き起こす可能性があります。

実際の設計においては、デューティサイクルの更新がスムーズに行われ、意図しない過渡現象を伴わないことを確実にすることが不可欠です。これは、シャドウレジスタを使用することで実現可能であり、通常は PWM 周期の境界といった安全なタイミングまでレジスタの更新を遅延させます。

本アプリケーションノートでは、PWM における 2 つの特定のアーティファクトの原因に焦点を当て、TDA4x プラットフォーム向けに最適化された信頼性の高い設計手法を提示します：

- PWM デューティサイクルに関連するレジスタの即時更新。推奨される設計は、シャドウレジスタ機構を有効にして使用することであり、これにより更新が PWM 周期と同期して反映されることが保証されます。
- エッジアラインのタイミングが求められるアプリケーションにおいて、センターアライン (アップダウン カウント モード) の PWM モードを使用すること。この不整合は、立ち上がりエッジまたは立ち下がりエッジのアラインメントに依存する LED 調光のようなアプリケーションにおいて、動作の不安定さを引き起こす可能性があります。そのため、エッジアラインを必要とするアプリケーションには、アップカウント モードまたはダウンカウント モードの使用が推奨されます。

本アプリケーションノートでは、これらの問題について詳細に解説し、EPWM モジュールを用いた LED 調光制御を例として、ベストプラクティスを提示します。

2 TDA4x における PWM 動作の理解

テキサス・インスツルメンツの TDA4x プラットフォームは、EPWM (エンハンストパルス幅変調) モジュールを通じて高度な PWM 生成機能を統合しています。これらのモジュールは高分解能かつ柔軟な PWM 信号制御を提供し、幅広いリアルタイム制御アプリケーションに最適です。

2.1 PWM アーキテクチャの概要

TDA4x の各 EPWM モジュールは、タイムベース (TB) モジュール、カウンタコンペア (CC) モジュール、アクションクオリファイア (AQ) モジュール、およびイベントトリガ機構で構成されています。タイムベース カウンタは PWM 波形の周波数および周期を定義し、カウンタコンペア モジュールは各周期内で PWM 信号の遷移が発生するタイミングを決定します。

EPWM モジュールは、タイムベース カウンタ (TBCNT) およびタイムベース 周期 (TBPRD) に基づいた複数のカウントモードをサポートしています：

- アップカウント モード: TBCNT がゼロから TBPRD までカウントアップし、その後リセットされるモード。
- ダウンカウント モード: TBCNT が TBPRD からゼロまでカウントダウンするモード。
- アップダウンカウント モード: TBCNT は TBPRD までカウントアップした後、ゼロまでカウントダウンすることで、センターアラインの波形を生成します。

各モードは PWM のタイミングおよびコンペア値が出力遷移に対応する方法に影響を与えます。

2.2 カウンタコンペア レジスタとデューティサイクルの制御

CMPA レジスタは、PWM 出力のデューティサイクルを定義するコンペア値を保持します。例えば、アップカウント モードでは、アクティブ High の PWM 波形は TBCNT がゼロのときに High になり、TBCNT が CMPA に一致したときに Low になります。同様のロジックは、2 系統目の出力を独立または相補的に制御する場合の CMPB にも適用されます。

重要なのは、CMPA は次の 2 つの方法で更新可能であるという点です：

- 即時モード: CMPA の変更は書き込まれた直後に即座に反映されます。このため、タイミングが不適切な場合には周期の途中でグリッチが発生する可能性があります。
- シャドウ モード: CMPA への書き込みはシャドウレジスタに保持され、あらかじめ定義されたイベント (例えばカウンタがゼロまたは周期に一致したとき) でアクティブレジスタに転送されることで、グリッチのない更新が保証されます。

CMPCTL レジスタを介してシャドウロードを有効にすることで、PWM 周期と同期した更新が可能となり、これは安定動作のために不可欠です。

2.3 アクション クオリファイアと出力動作

アクション クオリファイア (AQ) モジュールは、TBCNT = CMPA などのイベントに対して PWM 出力がどのように応答するかを制御します。開発者は、AQCTLA を設定することで、コンペアー一致やカウンタがゼロになるイベントに基づいて、セット、クリア、トグルなどの動作を定義します。この柔軟な機構により、波形を高精度に成形することが可能となります。

2.4 同期と更新タイミング

TDA4x は、同期入力および出力を用いて PWM モジュールの同期を可能にし、複数チャネル間で時間的に整合の取れた動作を実現します。さらに、デッドバンド挿入、トリップゾーン ロジック、イベントトリガなどの機能により、重要なアプリケーションにおいて安全かつ応答性の高い制御が可能となります。

動的動作中のアーティファクトを回避するためには、以下が不可欠です：

- シャドウレジスタを有効化し、正しく設定すること。
- アプリケーションのタイミング要件に合致する適切なカウンタ モードを選択すること。
- 即時モードが有効な状態で CMPA や CMPB に直接書き込むことは、厳密なタイミング管理が行われている場合を除き避けること。

これらの構成要素を正しく理解することは、TDA4x プラットフォーム上で信頼性が高くアーティファクトのない PWM 動作を実現するための基礎です。

3 意図しない PWM デューティ サイクルの原因となる CMPA レジスタの即時更新

PWM のデューティ比を変更するには、CMPA レジスタに新しい値を書き込む必要があります。ソフトウェアによって非常に確定的なタイミングで更新することは困難であり、CMPA レジスタが不適切なタイミングで更新される可能性があります。これにより、意図しない PWM デューティ サイクルが発生し、LED 制御における輝度の誤差や、短時間内でのモータの速度およびトルク制御の誤作動につながる可能性があります。予測不能な更新を防ぐために、即時レジスタ更新ではなくシャドウレジスタ更新を使用します。ここでは、PWM のデューティ比を 20% から 80% に変更する際、アップカウント モードにおいて即時レジスタ更新がどのように問題を引き起こすかを見てみます。

TBCNT = 0 のときに HIGH、TBCNT = CMPA のときに LOW となるように構成されたアップカウント モードの PWM を想定します。PWM 周期の途中で CMPA レジスタが更新されると、新しい CMPA 値に応じて、現在の周期内で PWM 出力が意図より早くまたは遅く LOW に切り替わる可能性があります。これにより、1 周期以上にわたってデューティ サイクルの歪みが発生します。

以下のレジスタ設定は、アップカウント モードにおいて PWM のデューティ サイクルを 20% にするためのものです。

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

次に示すように CMPA レジスタを更新することで、PWM のデューティ サイクルを 80% に変更できます。

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

図 3-1 は、ロジック アナライザを用いて観測された PWM 信号です。

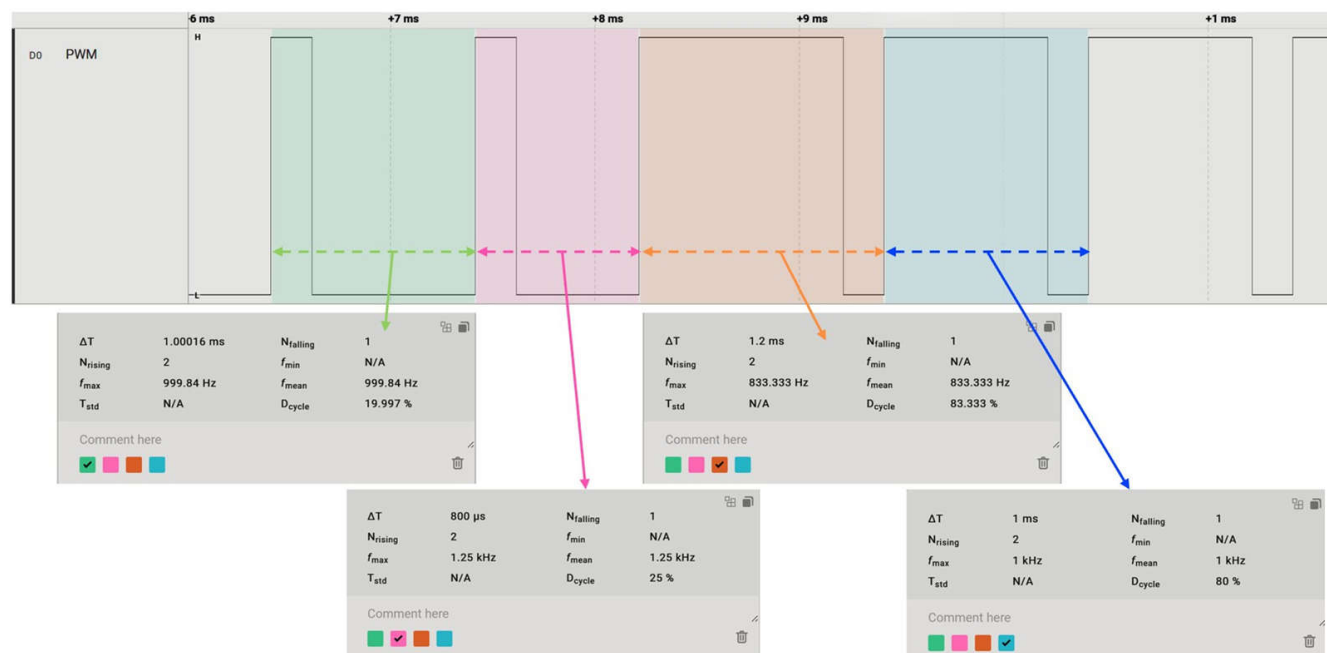


図 3-1. アップカウント モードにおける CMPA レジスタ更新時の PWM 変化のプロープ

期待される動作は、デューティ サイクルが 20% から直接 80% に変化することですが、実際には意図しない 25% や 83% のデューティ サイクルが発生しています。

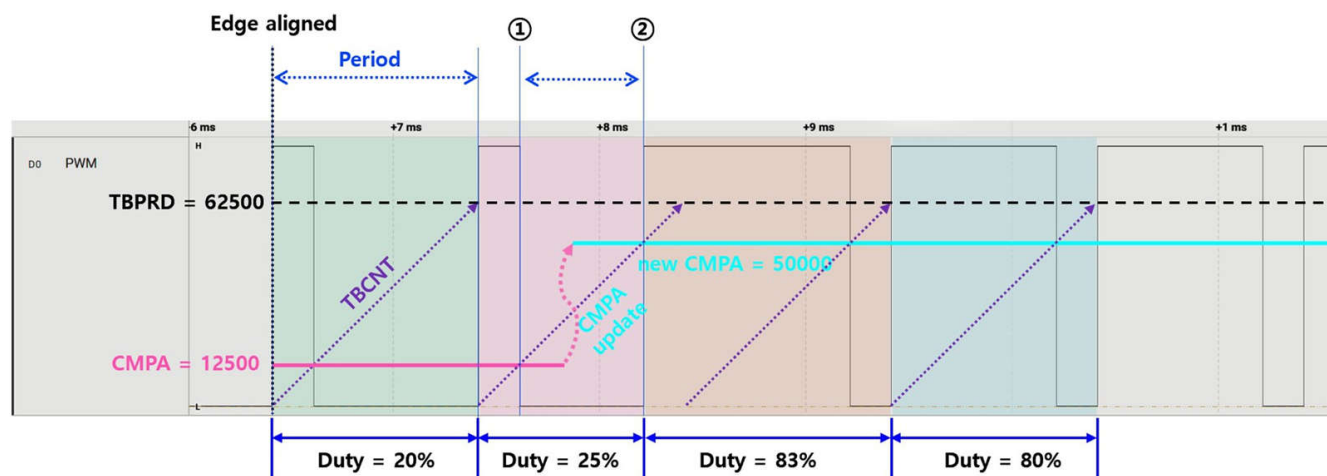


図 3-2. アップカウント モードにおける PWM デューティ サイクルの 20% から 80% への変化の分析

これについては、次で分析します。

- 現在のデューティ サイクルは 20% になります。

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

- ソフトウェアは、①と②の間に CMPA レジスタへ 50000 を書き込みます。
- CMPA レジスタの値は即時に更新されます。
- PWM は②のタイミングでトグルし、これによりデューティ サイクルは 25% となります。

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

- 次の PWM 周期では、PWM のデューティ サイクルは 83% となります。

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

- 2 周期連続で不安定な状態を経た後、PWM のデューティ サイクルは 80% に安定します。

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

注

デューティは、以下の式で算出されます。

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

この挙動の根本原因は、CMPA レジスタが即時更新モードであることに起因しています。このモードでは、CMPA に書き込まれた新しい値は、周期の途中であっても即座に反映されます。PWM ロジックは現在の CMPA 値を基にコンペア イベントを処理するため、周期の途中で値が変更されると、出力タイミングが不正確になります。これはハードウェアの不具合ではなく、設定ミスによるものです。即時更新が有効なケースもあるが、動作中にデューティ サイクルを動的に変更する用途においては、安全ではありません。

4 アップダウン カウント モードにおける意図しない PWM デューティ サイクル

PWM を用いた LED 調光アプリケーションでは、意図した輝度の遷移を維持することが重要です。しかし、PWM を生成するためにアップダウン カウント モードを使用すると、PWM はセンター アラインとなり、デューティ サイクル変更時に意図しないデューティ サイクルが発生する可能性があります。その結果、輝度のちらつきやグリッチなどの不具合が生じる場合があります。この問題がどのようにしてアップダウン カウント モードで発生するかを理解・分析するために、デューティ サイクルを 20% から 80% に変更し、同時にシャドウ レジスタ更新も適用してみます。

アップダウン カウント モードでは、アクション クオリファイア (AQ) モジュールからの 2 つのイベントが使用されます。PWM 信号は TBCNT = CMPA のときにトグルしますが、このイベントは 1 つの PWM 周期内でアップカウント時とダウンカウント時の 2 回発生します。

以下のレジスタ設定は、アップダウンカウント モードにおいて PWM のデューティ サイクルを 20% にするためのものです。

```
EPWM_TBPRD = 62500
EPWM_TBCTL.CTRMODE = 0x2 → Up-down count mode
EPWM_CMPA = 12500 (= 62500 x 20%)
EPWM_CMPCTL.SHADOWMODE = 0 → shadow mode
```

次に示すように CMPA レジスタを更新することで、PWM のデューティ サイクルを 80% に変更できます。

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

図 4-1 は、ロジック アナライザで観測された PWM 波形です。

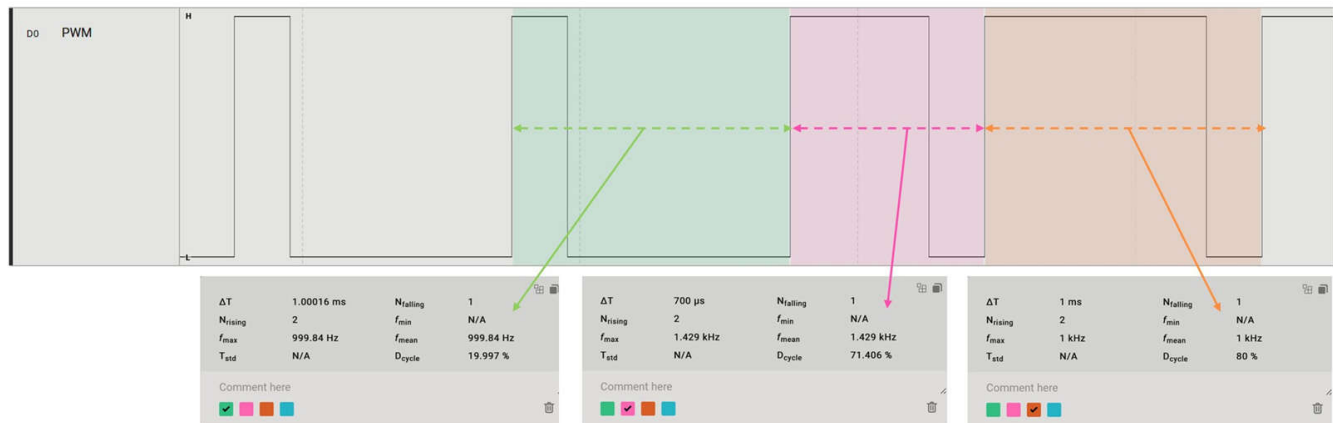


図 4-1. アップダウンカウント モードにおける CMPA レジスタ更新時の PWM 変化のプロープ

デューティ サイクルが 20% から 80% に直接変化することが期待されていましたが、意図しない 71% のデューティ サイクルが発生しています。

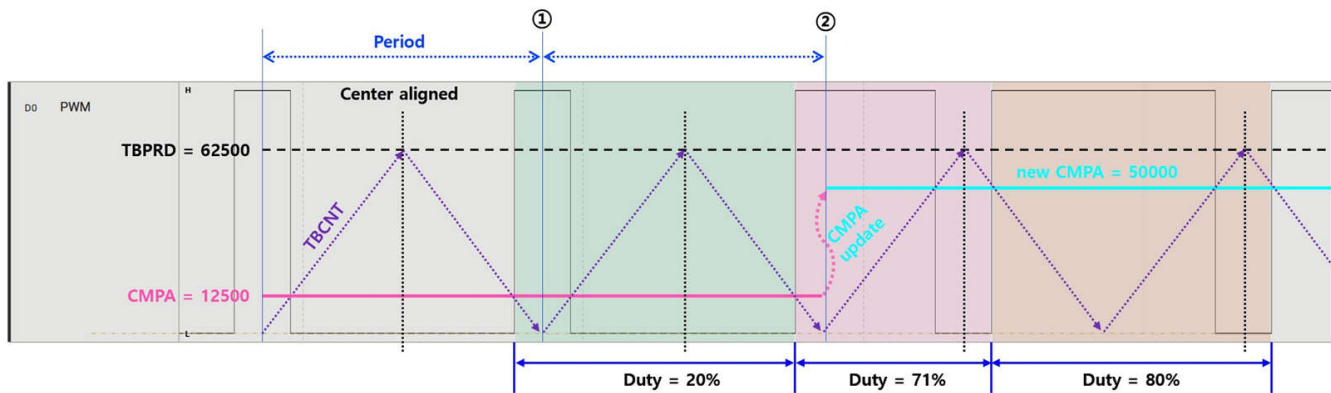


図 4-2. アップダウンカウント モードにおける PWM デューティ サイクルの 20% から 80% への変化の分析

この構成では、次のような結果が得られます。

- 現在のデューティ サイクルは 20% になります。

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

- ソフトウェアは、①と②の間に CMPA レジスタへ 50000 を書き込みます。
- CMPA レジスタはシャドウ化されており、TBCNT = 0 のときに更新されます。
- PWM は TBCNT = 0 のタイミングである②の瞬間にトグルし、これによりデューティ サイクルは 71% となります。

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

- その後の PWM 周期では、PWM のデューティ サイクルは 80% となります。

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

図 4-2 では、CMPA レジスタの値を更新することで PWM のデューティ サイクルが変更されており、CMPA レジスタの値はシャドウ方式を用いて更新されています。これは、CMPA レジスタの値が確定的に更新されており、その更新が TBCNT がゼロのイベントで行われることを意味します。

シャドウ モードを使用していても、PWM のデューティ サイクルは 20%、25%、そして 80% へと遷移します。これは避けられないものであり、センタアライン方式の PWM 生成の特性によるものです。そのため、LED 調光制御アプリケーションにおいては、LED のちらつきなどの意図しない結果を引き起こす可能性があります。

5 LED 調光制御におけるシームレスな PWM 更新のためのベスト プラクティス

アーティファクトのない PWM デューティ サイクルの変更を実現するには、EPWM に備わる適切な設定と同期手法の活用が不可欠です。以下のベスト プラクティスは、開発者が PWM 生成の仕組みをより深く理解し、EPWM モジュールを正しく構成するための助けとなります。

5.1 デューティ サイクルの更新にはシャドウ レジスタを使用する

CMPA コンペア レジスタのシャドウ ロードを常に有効にし、EPWM_CMPCTL_LOADAMODE = 0 に設定することで、PWM 周期の開始時または終了時 (TBCNT = 0 または TBCNT = TBPRD などの特定イベント) に更新が確定的に行われるようにします。

5.2 適切なカウント モードの選択

本アプリケーション ノートで前述したように、シャドウ レジスタ更新モードであっても問題が発生する可能性があります。そのため、アプリケーションに応じて適切なカウント モードを選択することが必要です。LED 調光アプリケーションにおいては、アップカウントまたはダウンカウント モードの方が、アップダウン カウント モード (センタアライン PWM) よりも適切な選択肢です。

5.3 シャドウ化されたアップカウント モードにおけるレジスタ設定

以下のレジスタ設定は、アップカウント モードにおいて PWM のデューティ サイクルを 20% にするためのものです。

```
EPWM_TBPRD = 62500
EPWM_TBCTL.CTRMODE = 0 → Up count mode
EPWM_TBCTL.CLKDIV = 1
EPWM_CMPA = 12500 (= 62500 × 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
```

その場合、CMPA に値を書き込むタイミングに関係なく、意図しない PWM デューティ サイクルは発生しません。図 5-1 は、PWM のデューティ サイクルを 20% から 80% に変更した際にプローブされた PWM 信号です。

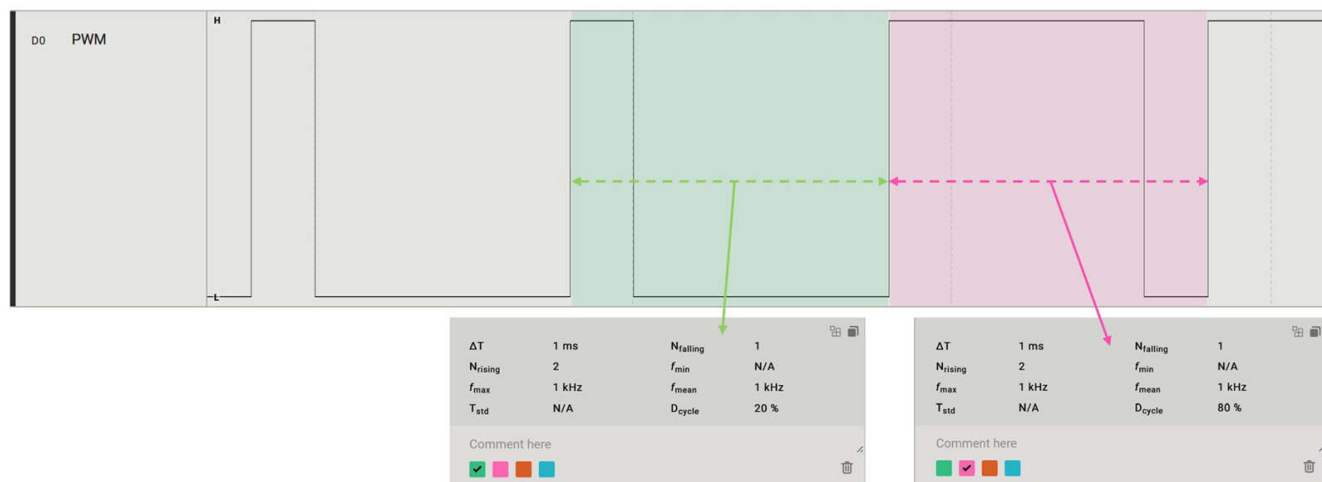


図 5-1. シャドウ モードを用いたアップカウント モードにおける PWM 変化のプローブ

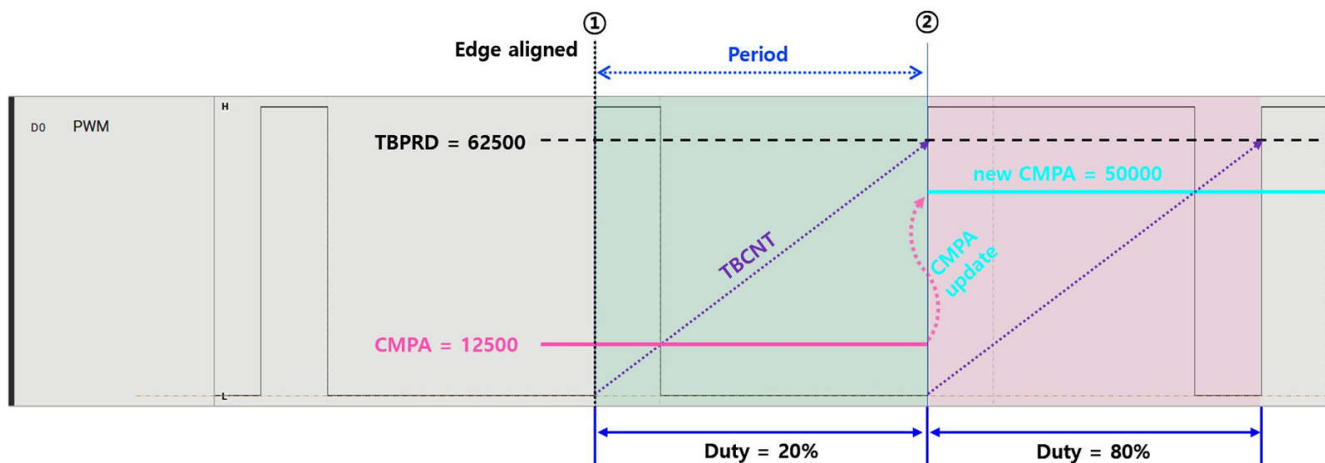


図 5-2. シャドウ モードを用いたアップカウント モードにおける PWM デューティ サイクルの変化の分析

これは、以下のように分析できます。

- 現在のデューティ サイクルは 20% になります。

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

- ソフトウェアは、①と②の間に CMPA レジスタへ 50000 を書き込みます
- CMPA レジスタはシャドウ化されており、TBCNT = 0 のときに更新されます。

- PWM は TBCNT = 0 のタイミングである②の瞬間にトグルし、これによりデューティ サイクルは 80% となります。

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

- その後の PWM 周期では、PWM のデューティ サイクルは 80% に維持されます。

これは、特に LED 調光において意図しない輝度を避けながら PWM デューティ サイクルを制御する方法を示す一例です。

6 まとめ

本アプリケーション ノートでは、PWM デューティ サイクルをシームレスに遷移させるための 2 つの重要な考慮事項について説明しました。具体的には、CMPA などの即時レジスタ更新や、アップダウン カウント モード (センター アライン PWM) の使用が、アプリケーションによってはランタイムで PWM デューティ サイクルを変更する際に意図しない PWM デューティ サイクルを引き起こす可能性があることを詳述しました。これらの課題に対応するために、シャドウ レジスタ更新およびアップカウント モードの使用が推奨され、実用的な例として LED 調光制御が示されました。

これらの動作を理解・分析することで、開発者はアプリケーションの具体的な要件に基づいて EPWM モジュールを適切に構成するための深い知見を得ることができます。この基盤により、リアルタイム組込みシステムにおいて、より堅牢でグリッチのない PWM 制御が可能となります。

7 参考資料

1. テキサス・インスツルメンツ、『[TDA4VM 製品ページ](#)』
2. テキサス・インスツルメンツ、『[J721E DRA829/TDA4VM プロセッサ シリコン リビジョン 2.0、1.1 テクニカル リファレンス マニュアル](#)』
3. テキサス・インスツルメンツ、『[PROCESSOR-SDK-RTOS-J721E: DRA829 と TDA4VM の各 Jacinto™ プロセッサ向けソフトウェア開発キット \(SDK\)](#)』
4. テキサス・インスツルメンツ、『[MCAL ドキュメント](#)』

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用される テキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated