

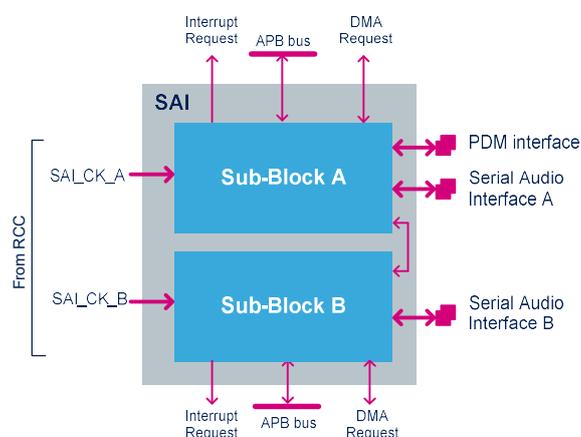
# STM32MP1 - SAI

シリアルオーディオインターフェース

1.0 版



こんにちは、STM32 シリアルオーディオインターフェースのプレゼンテーションへようこそ。  
このプレゼンテーションでは、外部オーディオデバイスとの接続に使用するインターフェースの機能について説明します。



### 外部オーディオデバイスとの通信インタフェースを提供

- 完全に設定可能
- さまざまな規格をサポート: I2S、TDM、SPDIF、その他
- デジタルマイクロフォンインタフェース
- 2つの独立したサブブロック

### アプリケーション側の利点

- 広範囲のオーディオデバイスをサポート
- デジタルマイクロフォン向けのシンプルなインタフェース
- 有益な信号のみを出力
- 実装が容易

STM32 製品に搭載されたSAIは、マイクロコントローラが外部のオーディオデバイスと通信するためのインタフェースを提供します。外部オーディオデバイスには、アンプ、A/D コンバータ、D/A コンバータ、またはオーディオプロセッサなどが含まれます。このインタフェースは完全に設定可能でほとんどのオーディオ規格をサポートしているため、既存のオーディオデバイスと簡単に接続できます。

内部の同期機能により、I/O ピンの数は最小限に抑えられています。

- 複数のハードウェアプロトコルをサポート
  - フリープロトコルモードを使用:
    - I2S Philips 規格 (Inter-IC Sound)
    - I2S MSB 詰めまたは LSB 詰め (Inter-IC Sound の一種)
    - TDM (時分割マルチプレクス)
    - PCM (パルス符号変調)
    - その他
  - SPDIF出力 (Sony/Philips デジタルインタフェース)
  - PDM インタフェース (パルス密度変調インタフェース)
  - AC'97 (Intel オーディオコーデック97)



SAI は、4 つの異なるモードにプログラムできます。

- フリープロトコルモードいくつかのパラメータの調整が可能になり、それにより SAI が I2S、PCM、TDM などの規格をサポートできるようになります。その柔軟性により、シリアルインタフェースを必要に応じてカスタマイズできます。
- SPDIF プロトコルモード これにより、SAI は IEC 60958 規格でオーディオサンプルを送信できます。
- PDM インタフェースモード。これにより SAI は、ビームフォーミングまたは単純な音声キャプチャアプリケーション用に最大 6 つのデジタルマイクロフォンを接続できます。
- AC97プロトコル

- SAI は以下をサポートします。
  - すべての通常のオーディオサンプリングレート: 44.1、16、48、96、および 192kHz (クリスタル周波数による)
  - 各サブブロック用のマスタまたはスレーブモード
  - 各サブブロック用のデータ入力または出力
  - 2 サブブロック使用による全二重
  - 各サブブロック用のクロックジェネレータ
  - サブブロック間またはサブブロックと他の SAI 間の同期
  - コンパANDINGモード ( $\mu$ -Law、A-Law)
  - 8 ワードFIFOサイズ
  - 2 つの DMA インタフェース
  - 2 本の割込みライン



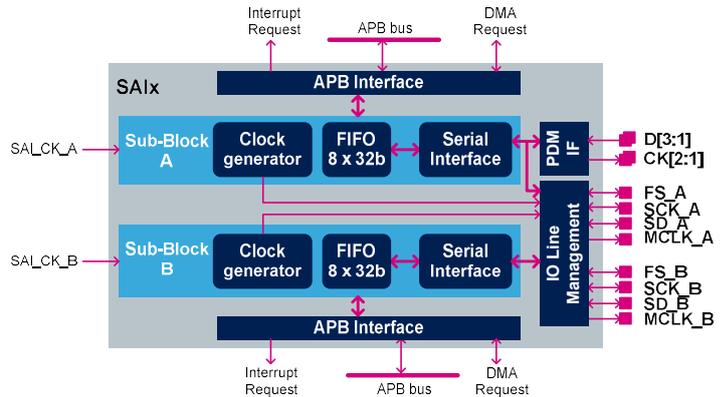
SAI は、アプリケーションで使用されるクリスタル周波数に従って、すべての通常のオーディオサンプリングレートをサポートします。さらに SAI は、半二重または全二重通信でのマスタモードとスレーブモードをサポートします。

複数の SAI スを同期させることもできます。

SAI は、8 個のサンプルの FIFO バッファ、および最大 2 つの割込みと DMA インタフェースも提供します。

• SAI には以下を組み込んでいます。

- 次の機能を持つ 2 つの独立サブブロック
  - クロックジェネレータ
  - 柔軟性の高いリアルインタフェース
  - FIFO バッファ
  - APB インタフェース
  - DMA および割り込みサービス
- IO ライン管理
- 1 つの PDM インタフェース



| ピン名      | 方向    | 説明                      |
|----------|-------|-------------------------|
| FS_A/B   | 入力/出力 | フレーム同期                  |
| SCK_A/B  | 入力/出力 | ビットクロック                 |
| SD_A/B   | 入力/出力 | シリアルデータ                 |
| MCLK_A/B | 出力    | マスタクロック                 |
| D[3:1]   | 入力    | デジタルマイクロフォンのビットストリームデータ |
| CK[2:1]  | 出力    | デジタルマイクロフォン用クロック        |



SAI は、2 つの独立したサブブロック(サブブロックAおよびB)で構成されています。

各サブブロックはそれぞれ、APB インタフェース、クロックジェネレータ、FIFO バッファ、DMA インタフェース、および割り込みインタフェースを持っています。

各サブブロックは、それぞれのプロトコルにより、レシーバまたはトランスミッタモード、およびマスタまたはスレーブモードに設定できます。

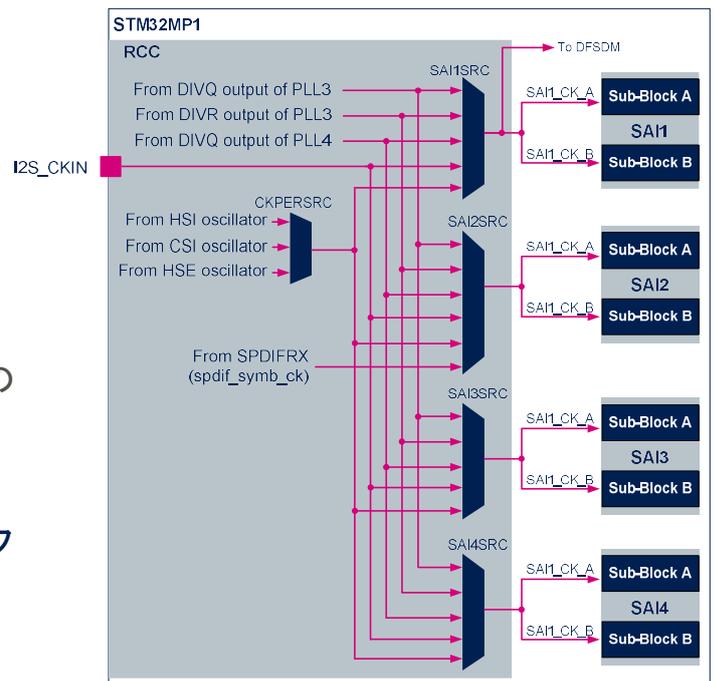
内部および外部同期により、2 つのサブブロック間の同期や複数の SAI インタフェース間の同期ができます。

各サブブロックは最大 4 つの IO を処理できます。各サブブロックにおいて、FS はフレーム同期、SCK はビットクロック、SD はシリアルデータ、MCLK はマスタクロックを意味します。

さらに、PDM インタフェースにより、最大 6 つのデジタルマイクロフォンを接続できます。

## 幅広いカーネルクロックの選択肢

- 各 SAI でのクロック選択肢
  - PLL3 の DIVIQ
  - PLL3 の DIVIR
  - PLL4 の DIVIQ
  - オシレータ(HSI、CSI、または HSE)の内の 1 つ
  - I2S\_CKIN 入力ピン
- SAI2 はまた、SPDIFRX のシンボルクロックからも受信



STM32MP1 は 4 の SAI インスタンスを組み込んでいます。これにより、カーネルクロックの選択範囲が広がります。

SAI は以下からカーネルクロックを受信できます。

- PLL3 または PLL4 の DIVQ 出力
- PLL3 または PLL4 の DIVR 出力
- HSI、CSI、または HSE オシレータ
- 入力パッド: I2S\_CKIN

さらに SAI2 は、SPDIFRX ブロックのシンボルクロックを受信できるため、SPDIFRX が受信したストリームを SAI2 と同期させることができます。

シンボルクロック周波数はサンプルレートの 64 倍であることに注意してください。

また、SAI はカーネルクロックを使用して、マスターモードのリアルオーディオインタフェースのタイミングを生成していることにも注意してください。

すべての PLL は分数モードでプログラムでき、非常に正確なオーディオサンプリングレートが可能になります。

## SAI の割当て 7

SAI の各リソースは、Cortex®-A7 または Cortex-M4 に割り当てることができます。

| インスタンス | Cortex-A7 S<br>(OP-TEE) | Cortex-A7 NS<br>(Linux) | Cortex-M4<br>(STM32Cube) | コメント    |
|--------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------|
| SAI1   | -                       | X                       | X                        | 単一選択割当て |
| SAI2   | -                       | X                       | X                        | 単一選択割当て |
| SAI3   | -                       | X                       | X                        | 単一選択割当て |
| SAI4   | -                       | X                       | X                        | 単一選択割当て |

詳しくは、STM32MP1 の Wiki ページ を参照してください。



各 SAI IP は、Cortex-A7 非セキュアまたは Cortex-M4 のいずれかに割り当てることができます。

詳しくは、STM32MP1 の Wiki ページ を参照してください

# フリープロトコルモード(1/13)

8

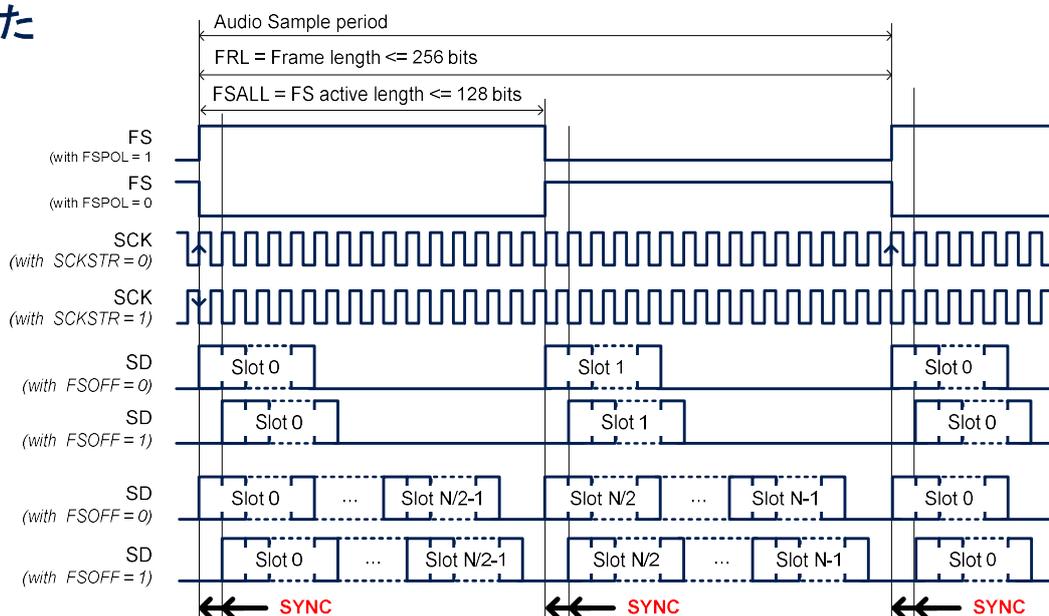
- 以下に対して SAI を設定するには、フリープロトコルモードを選択する必要があります。
  - I2S Philips 規格
  - I2S MSB 詰めまたは LSB 詰め
  - TDM または PCM
- フリープロトコルモードで次のパラメータを調整します。
  - データジャスティフィケーション (LSB または MSB ファースト)
  - データサイズ、スロット (チャンネル) サイズ
  - フレーム内スロット数
  - スロット内のデータ位置
  - シリアルクロックのサンプリングエッジ
  - フレームサイズ、フレーム極性、フレーム周期
  - フレームアクティブレベルサイズ
  - フレーム同期モード
  - マスタ/スレーブモード
  - シングル、マルチ、または全二重データレーン



フリープロトコルモードでは、次に示すようないくつかのパラメータの動作を柔軟に変更できるため、一般的なオーディオ規格インタフェースのほとんどをエミュレートできます。

- データジャスティフィケーション
- データサイズと位置
- フレームサイズ
- フレーム周期
- フレーム極性
- クロックのサンプリングエッジ
- スロット数

## • I2S に類似した タイミング

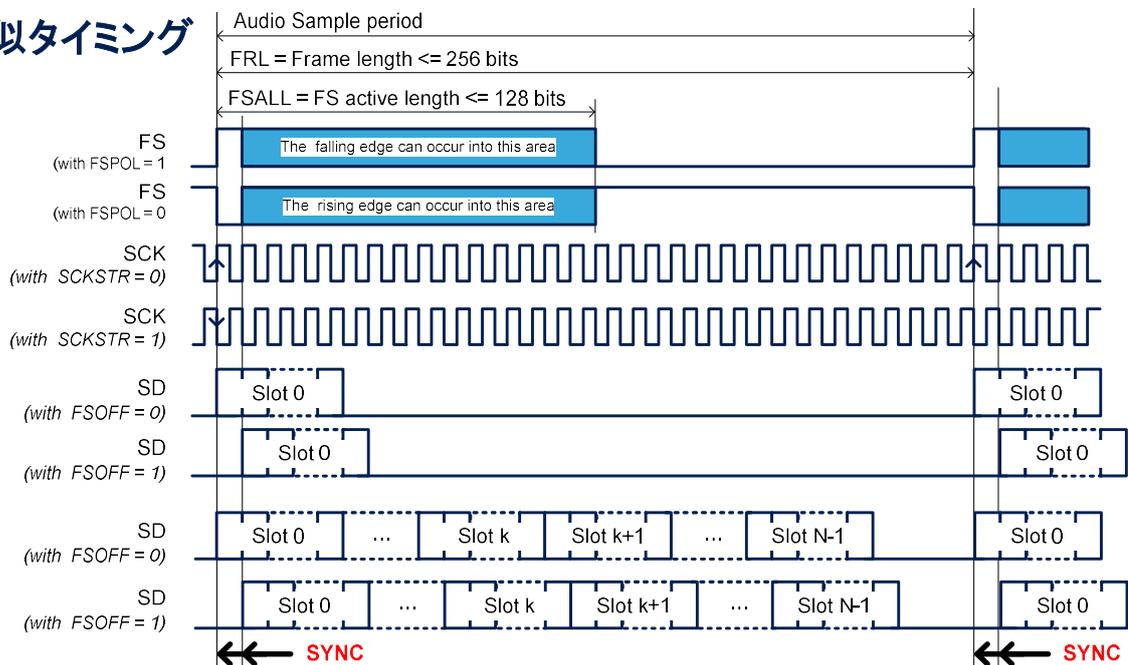


次の例は、I2S 類似プロトコルに対する本インタフェースの可能性の一部を示したものです。

I2S 類似プロトコルでは、フレーム同期 (FS) の各エッジを使用してスロット位置を調整します。

- フレーム長、デューティサイクル、および極性を調整できます。
- クロックデータストローブエッジも選択可能です。
- フレームエッジに対するスロットの位置を選択できます。
- スロットのサイズもまた、調整できます。
- I2S 類似プロトコルでは、フレームごとに偶数のスロットが必要です。

## • TDM 類似タイミング

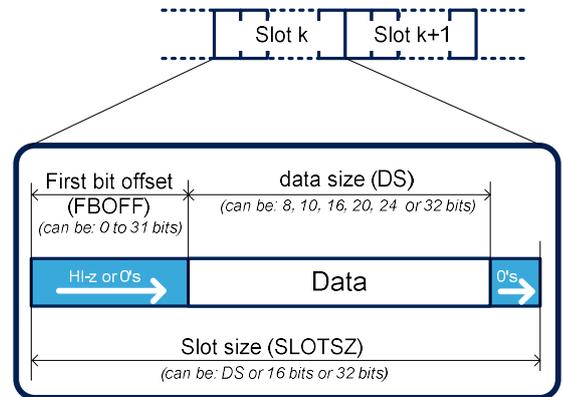


次の例は TDM に類似したプロトコルに対する本インタフェースの可能性の一部を示したものです。TDM 類似プロトコルの場合は以下の通りです。

- スロット位置の調整に使用されるのは、フレーム同期の 1 つのエッジ(立ち上がりまたは立ち下がり)のみ
- フレーム長、デューティサイクル、および極性を調整可能
- クロックデータストロブエッジを選択可能
- フレームのアクティブエッジに対するスロットの位置を選択可能
- スロットのサイズもまた調整可能
- フレームあたりのスロット数は最大 16 個

## • スロットの設定:

- オーディオフレームあたり最大 16スロット
- 各フレームをアクティブ、または非アクティブに定義可能
- 先頭ビットオフセット(FBOFF)を定義することで、スロット内のデータの位置を調整可能
- データラインをハイインピーダンスに設定可能
  - 非アクティブなスロットが対象
  - 各スロット内のデータ位置の制御に使用されるFBOFF (First Bit Offset) エリアが対象



SAIは最大 16スロットを処理でき、各スロットはアクティブにするかどうか個別に指定できます。非アクティブなスロットはハイインピーダンスに設定できます。

スロットサイズは常にデータサイズ以上です。

SAIにより、各スロット内のデータ位置を制御し、必要に応じてスロットの未使用部分をハイインピーダンスに設定できます。

この機能は、データラインが複数のデバイス間で共有されている場合に役立ちます。

- マスタおよびスレーブモード:
- マスタモードの場合:
  - SAIはタイミング信号を発信します:
    - ビットクロック(SCK)、フレーム同期(FS)、必要に応じてマスタクロック(MCLK)
  - シリアルデータライン(SD)は入力または出力に設定可能
- スレーブモード:
  - SAIは外部デバイスからタイミング信号を受信します:
    - ビットクロック(SCK)、フレーム同期(FS)
    - シリアルデータライン(SD)は入力または出力に設定可能



マスタモードでは、SAIはオーディオシステムの設定に応じてマスタクロック(MCLK)を生成します。

このマスタクロックは、外部のオーディオコーデックにリファレンスクロックを提供します。

マスタモードでは、SAIはフレーム同期信号(FS)とビットクロック(SCK)を生成します。データラインSDは、入力または出力のいずれかとなります。

MCLK信号は、スレーブモードでは使用されません。

スレーブモードでは、SAIは別のデバイス(外部または内部)からフレーム同期信号(FS)とビットクロック(SCK)を受信します。データラインSDは、入力または出力のいずれかとなります。

- サンプルングレート調整

- サンプルングレートはマスタモードで調整する必要があります。
- サンプルングレートの調整は、マスタクロック(MCLK)の生成に依存します。

- マスタクロック(MCLK)は、外部オーディオコーデックからリファレンスクロックとして要求されることがよくあります。

- ほとんどの外部オーディオコーデックはジッタに敏感です。  
→オーディオパフォーマンスの低下を防ぐため、MCLK はできるだけクリーンでなければなりません。
- SAI が生成した MCLK は、優れたクロック品質を保証します。
- SAI は有効化されていなくても、マスタクロック(MCLK)を生成できます。  
設定フェーズ中に外部コーデックのクロッキングができます。



マスタモードでは、適切なタイミングを生成して正しいサンプルングレートを提供するのは SAI です。

このスレーブモードでは、サンプルングレートは外部のオーディオデバイスから供給されます。

SAI が有効化されていなくても、外部デバイスに向けたマスタクロックを生成できることを覚えておいてください。

この機能により、たとえば、設定フェーズでの外部コーデックへのクロック供給が可能になります。

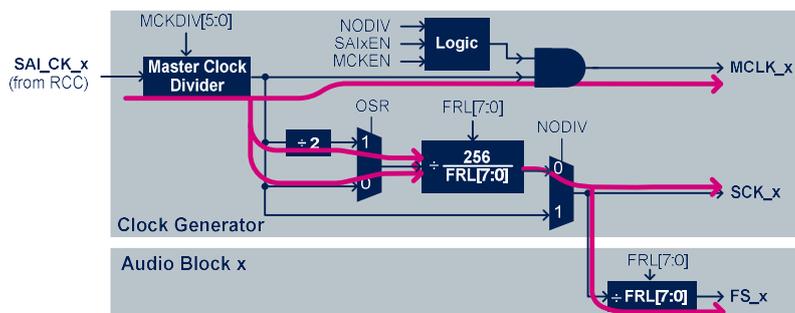
## • MCLK が生成される場合のサンプリングレート調整

$$f_{MCLK} = \frac{f_{SAI\_CK}}{MCKDIV} \quad (1)$$

$$f_{FS} = \frac{f_{MCLK}}{256 \times (OSR + 1)}$$

$$f_{SCK} = f_{FS} \times (FRL + 1)$$

$FRL+1 = 8, 16, 32, 64, 128, \text{または } 256$



$f_{MCLK}$  はマスタクロック周波数  
 $f_{FS}$  はサンプリングレート周波数(～フレーム周期)  
 $f_{SCK}$  はビットクロック周波数

(1)  $MCKDIV = 0$   
 $f_{MCLK} = f_{SAI\_CK}$



クロックジェネレータはマスタモード通信に必須です。シリアルオーディオインタフェースのサンプリングレート調整に使用されます。

クロックジェネレータは、MCLK、SCK、および FS のルート周波数を供給します。

マスタクロック(MCLK)が生成される場合の、フレーム長は 2 の累乗でなければなりません。

FS 周波数と MCLK 周波数の比は、OSR bit に応じて 256 または 512 に設定されます。

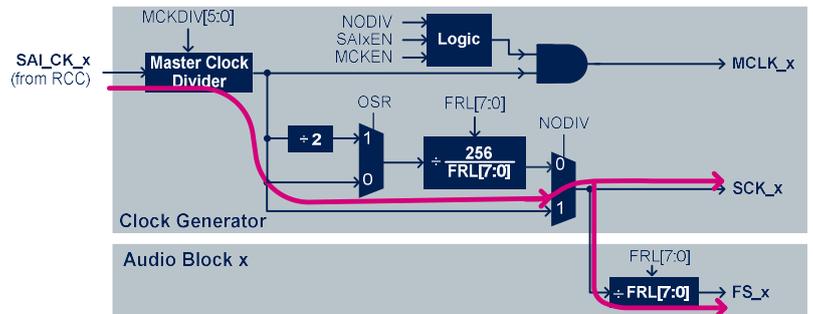
クロック SAI\_CLK は、STM32MP1 RCC ブロックから供給されます。

• MCLK が生成されない場合のサンプリングレートの調整

$$f_{FS} = \frac{f_{SCK}}{(FRL + 1)}$$

$$f_{SCK} = \frac{f_{SAI\_CK}}{MCKDIV}$$

$FRL + 1 = 8 \sim 256$  の任意の値



$f_{FS}$  はサンプリングレート周波数(～フレーム周期)  
 $f_{SCK}$  はビットクロック周波数



MCLK が生成されない場合、フレーム長は 8～256 間の任意の値を取ることができます。  
 この場合、SCK bit クロックの周波数は、SAI\_CK 入力を受信したクロックを MCKDIV 値で割った値によって直接計算されます。

## • SAI の同期

- SAI は、2 つのサブブロックを一緒に同期できます(内部同期)。
- 内部同期を使用する場合：
  - 2 つのサブブロックは、同じフレーム同期と同じビットクロックを共有します。
  - 2 つのサブブロックは、同じフレーム設定で同じプロトコルを使用する必要があります。
  - 2 つのサブブロックを両方ともスレーブモードで設定するか、またはスレーブ 1 つとマスタ 1 つで設定することができます。
- 同期を使用しない場合、各サブブロック間に依存関係はありません。  
例：
  - I2S Philips マスタの SAI\_A、SPDIF の SAI\_B
  - TDM スレーブの SAI\_A、AC'97 の SAI\_B



内部同期は、全二重 I2S など、2 つのデータレーンを必要とする通信に使用できます。

一緒に同期されるサブブロックは、同じプロトコル特性を使用する必要があります。

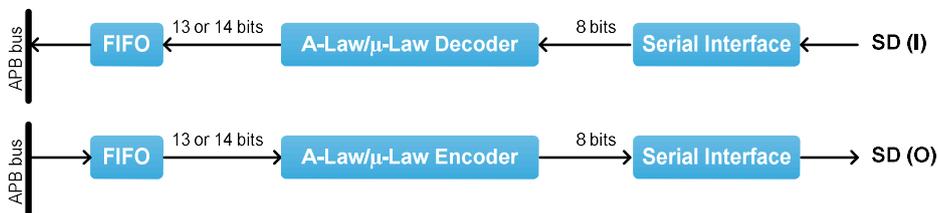
サブブロックの片方はマスタモードで、もう一方はスレーブモードで設定できます。または、マスタデバイスが外部にある場合、サブブロックを両方ともスレーブに設定できます。

# フリープロトコルモード(10/13)

17

## • コンパANDING:

- コンパANDINGを使用すると、シリアルインタフェースのデータサイズを 8bit に減らすことができます。
- $\mu$ -Law フォーマットと A-Law フォーマットでは、データを MSB 詰めの 8bit コードエレメントに符号化します。
- 2つのコンパANDINGモードをサポート: CCITT G.711 勧告に含まれた $\mu$ -Law と A-Law
- 米国と日本で採用されているコンパANDING規格は $\mu$ -Law であり、14bit のダイナミックレンジが可能です。
- ヨーロッパのコンパANDING規格は A-Law であり、13bit のダイナミックレンジが確保できます。



データサイズを削減するため、データパスに A-law または  $\mu$ -law コンパANDAを挿入することができます。

A-law と  $\mu$ -law はロスレスコンプレッサではないことに注意してください。

コンパANDINGモードは、通常、テレフォニーで使用されます。

- 小さな値は増幅され、大きな値は減衰されます。
- SNR は、強い信号と弱い信号で同じになる傾向があります。

## • ミュートモード

### • 送信モードの場合:

- 送信したサンプルを強制的にゼロにするか、前の送信サンプルを繰り返す場合に使用できます。
- ミュートモードは、進行中のフレームでいつでも選択でき、次のフレームの開始時に有効になります。
- ミュートモードの間、TX-FIFO ポインタは引き続きインクリメントされます。

### • 受信モードの場合:

- アクティブスロットのデータを 0 に設定して、連続フレームの量が受信されたかどうかを検出するのに使用できます。
- 連続フレームの量はプログラムで設定できます。
- 割込みを生成できます (有効になっている場合)。



SAI はミュート機能も提供します。

送信モードでは、ユーザはミュートされたスロットにゼロを送信するか、以前送信した値を送信するか選択できます。以前に送信した値は、フレームごとに 1 つまたは 2 つのスロットを持つ設定に制限されます。

送信モードでは、TxFIFO ポインタは引き続きインクリメントされます。つまり、FIFO のデータでかつミュートモードが要求されているデータは破棄されます。

受信ミュートモードは、すべてのデータがゼロにリセットされている連続スロットの量を検出するのに役立ちます。

## • 予測／レイトフレームエラー

- この機能は、ノイズの多い環境に起因する SCK クロックおよび FS のグリッチを検出する用途に使用できます。
- スレーブモードでは、SAI はフレーム同期が予想した通りに発生したか、つまり遅くも早くもないタイミングで発生したかどうかを検出します。
- ステータスフラグが使用可能、割込みも生成できます。
- 予測またはレイトフレーム検出エラーの後、アプリケーションソフトウェアは SAI を再起動する必要があります。



予測またはレイトフレームエラー検出機能により、予期しないフレーム同期のミスアラインメントを検出することで、インタフェースの信頼性が向上します。ステータスフラグがセットされ、割込みも生成されます。その後、アプリケーションソフトウェアは SAI インタフェースを再起動する必要があります。

# フリープロトコルモード (13/13)

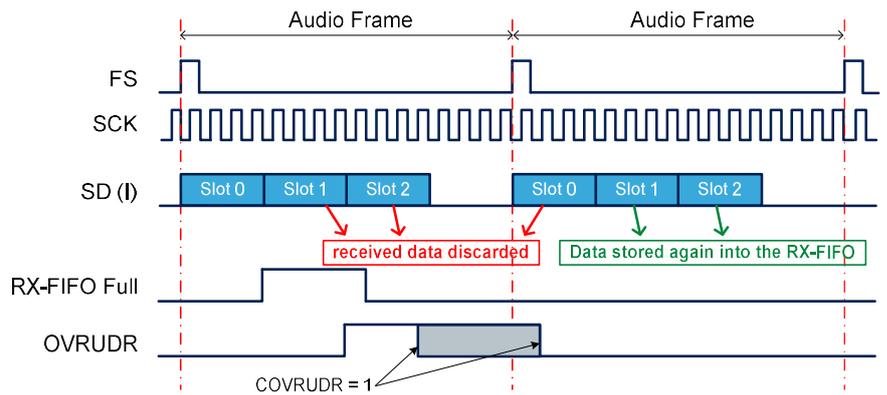
19

SAI は、アンダーラン／オーバーランが発生した場合でも適切なデータ配置を保証

## • オーバーラン／アンダーラン処理

- シリアルインタフェースからの新しいデータを保存したくても RX-FIFO がフルの場合、オーバーランが発生します。
- シリアルインタフェースから新しいデータが要求されても TX-FIFO がエンプティの場合、アンダーランが発生します。

• 例: スロット 1 における FIFO オーバーラン



- SAI は、SPDIF プロトコルを使用してオーディオサンプルを生成できます。
  - SPDIF モードでは SD\_x IO のみ使用し、他の IO は使用しません。
  - データサイズは強制的に 24bit に設定されます。
  - データはマンチェスタ符号化(またはバイフェーズマーク)によります。
  - SAI はプリアンプルを自動的に生成します。
  - SAI は自動的にパリティを生成します。
  - アプリケーションで、CS、U、V bit を処理する必要があります。



SAI は、SPDIF プロトコル用に設定された送信モードで、オーディオ IEC 60958 規格をサポートします。

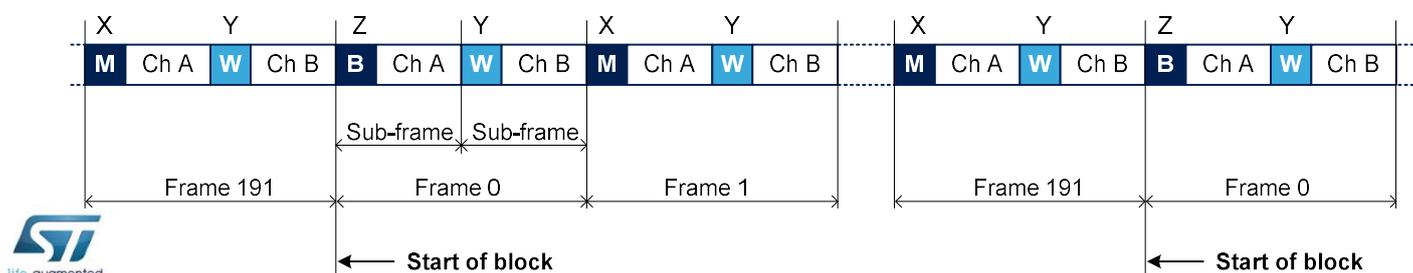
SAI は、送信されたデータに従ってプリアンプルとパリティビット (P) を生成します。

ソフトウェアで、CS、U、V bit を処理する必要があります。

## SPDIF プロトコル(2/4)

22

- ブロック構造は、チャンネルステータスとユーザ情報の整理に使用されます。
  - 各ブロックには 192フレームが含まれています。
  - 各フレームには 2 つのサブフレームが含まれています。
  - プリアンブルにより、ブロックとサブフレームの境界を検出できます。
    - プリアンブル **B** は、新しいブロックの開始とチャンネルAの開始を検出します。
    - プリアンブル **M** は、チャンネル A の開始を検出します(ブロック境界ではない場合)。
    - プリアンブル **W** はチャンネルBの開始を検出します。



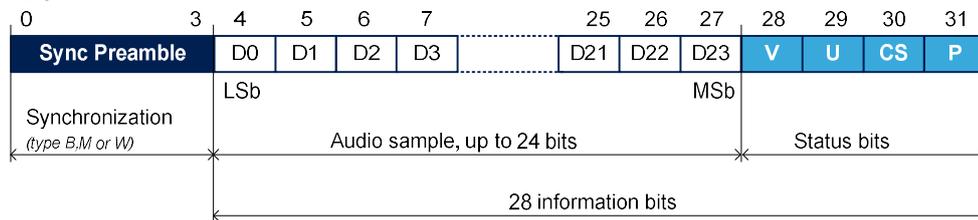
IEC60958 の仕様では、ブロック構造はチャンネルステータス (CS) とユーザ情報 (U) のデコードに使用されます。

- 各ブロックには 192フレームが含まれています。
- 各フレームには 2 つのサブフレームが含まれています。

SAI は、B、M、W の各プリアンブルを自動的に生成します。

- プリアンブル **B** は新しいブロックの開始とチャンネル A の開始を検出します。
- プリアンブル **M** は、チャンネル A の開始を検出します(ブロック境界ではない場合)。
- プリアンブル **W** はチャンネル B の開始を検出します。

- サブフレームの形式には、3つのフィールドに分割された 32bit が含まれています。
  - プリアンブル
  - 最大 24bit データ
  - 4つのステータスビット
    - V は有効性ビットで、現在のサンプルを直接アナログ信号に変換できることを意味します。
    - P は受信したサブフレームのパリティビットで、受信したサブフレームのチェックに使用します。
    - U はユーザデータチャンネルで、各メッセージは 192bit で構成されています。
    - CS はチャンネルステータスで、各メッセージは 192bit で構成されます(サンプリングレート、サンプル長など)。



各サブフレームには、3つのフィールドに分割された 32bit が含まれています。

- 同期プリアンブルによりブロックとサブフレームの境界を検出します。
- ペイロードは 24bit。
- ステータスビット: V、U、CS、P

## • シンボルレート:

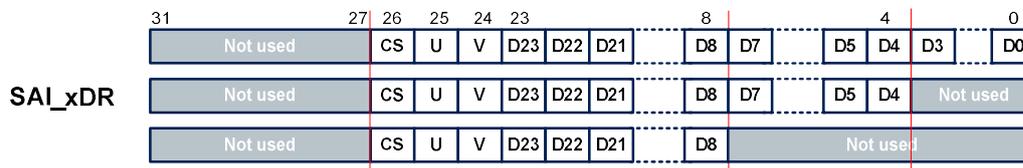
- オーディオサンプルレート( $f_s$ )は、次の式により調整できます:

$$F_S = \frac{F_{SAI\_CK}}{128 \times MCKDIV}$$

| $F_{SAI\_CK}$ | MCKDIV+1 | オーディオ<br>サンプルレート | シンボルレート   |
|---------------|----------|------------------|-----------|
| 5.6448MHz     | 1        | 44.1kHz          | 2.8224MHz |
| 6.144MHz      | 1        | 48kHz            | 3.072MHz  |
| 12.288MHz     | 1        | 96kHz            | 6.144MHz  |

## • データフォーマット:

- データレジスタは、CS、U、V bit に加え、データを含む必要があります。

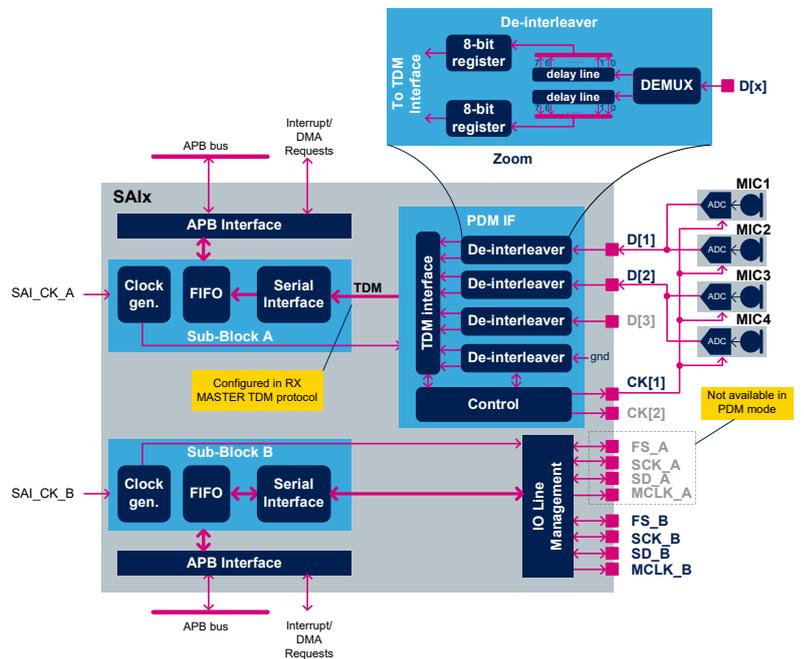


適切なオーディオサンプルレート(FS)を生成するには、Fsai\_ck 周波数を調整する必要があります。  
送信 FIFO 内のデータはこのスライドの通りに整列させ、データの MSB は常に 23 の位置にしなければなりません。

# PDM インタフェース (1/2)

25

- PDM インタフェースは、マイクロフォンから受信したビットストリームを TDM フレームに再配置します。
- 8bit デレイラインにより、ビームフォーミングアプリケーションが可能になります。
- 最大 6 つのマイクロフォンを接続できます (例では 4 つのマイクロフォンを使用)
- サブブロック A は TDM モードに設定する必要があります。
- サブブロック B は他のアプリケーション用に自由に使用できます。



PDM インタフェースは、デジタルマイクロフォンから受信したビットストリームを TDM フレームに再配置します。  
PDM インタフェースは新しい TDM フレームを送信する前に、各マイクロフォンからの 8bit の受信を待ちます。  
さらに、PDM インタフェースは、各マイクロフォンストリームに 8bit のデレイラインを提供します。  
これらのデレイラインは、マイクロフォンに提供されるビットストリームクロックの分解能で機能します。  
8bit のデレイラインはビームフォーミングアプリケーションを有効化し、マイクロフォンの配置に関する制約を取り除きます。

PDM インタフェースが有効の間は、サブブロック A のシリアルインタフェースを使用した外部デバイスの接続はできません。  
このシリアルインタフェースは PDM インタフェースに内部接続されており、サブブロック A は RX マスタとして TDM モードに設定する必要があります。  
図に 4 本のデジタルマイクロフォンの接続例を示します。D[1]、D[2]、または D[3]の各データラインは、1 つまたは 2 つのデジタルマイクロフォンに接続できることに注意してください。

サブブロック B は他のアプリケーションに使用でき、TDM、PCM、I2S、またはその他のサポートされたプロトコルで外部デバイスを接続できます。

## PDM インタフェース (2/2)

26

- マイクロフォンの適切なサンプリング周波数( $f_{CK[x]}$ )を取得するには、次の式によりビットクロックの周波数( $f_{SCK\_A}$ )を調整する必要があります。

$$f_{SCK\_A} = 2 \times f_{CK[x]} \times (MICNBR + 1)$$

- フレームの長さは、マイクロフォンの数に応じて調整する必要があります。

$$FRL = [16 \times (MICNBR + 1)] - 1$$

MICNBR = 0、1~2 本のマイクロフォンを D[1] に接続

MICNBR = 1、3~4 本のマイクロフォンを D[1]、D[2] に接続

MICNBR = 2、5~6 本のマイクロフォンを D[1]、D[2]、D[3] に接続



この PDM インタフェースでは、ビットクロック周波数をサンプリング周波数とマイクロフォンの数に応じて調整する必要があります。接続するマイクロフォンの数に応じてフレーム長も調整します。

- SAI は AC'97 リンクコントローラとしても機能することができます。
  - スロット数は 13 に設定されています。
    - タグスロット:スロット0(16bit)
    - データスロット:スロット1~12(20bit)
  - フレーム長は 256bit に固定されています。



SAI は AC'97 リンクコントローラとしても機能することができます。

このプロトコルでは、フレーム長、スロット番号、スロット長はハードウェアで設定します。

- **割込み:**

| 割込みイベント | 説明                        | 割込みのクリア法                        |
|---------|---------------------------|---------------------------------|
| FREQ    | FIFO リクエスト (FIFO 閾値到達)    | SAI_xDR 読出または書込み <sup>(2)</sup> |
| OVRUADR | オーバーラン/アンダーランエラー          | COVRUADR = 1                    |
| AFSDET  | 予測フレーム同期を検出               | CAFSDET = 1                     |
| LFSDET  | レイトフレーム同期検出               | CLFSDET = 1                     |
| CNRDY   | コーデックノットレディ (AC'97モードのみ)  | CCNRDY = 1                      |
| WCKCFG  | 不正なフレーム長設定 <sup>(1)</sup> | CWCKCFG = 1                     |
| MUTEDET | ミュート検出                    | CMUTEDET = 1                    |

(1) WCKCFG が 1 の場合、SAI は自動的に無効になります (SAIxEN = 0)。

(2) より正確には、FIFO のレベルが閾値を下回っている場合。

- **DMA:**

- FIFO が閾値に達したときに DMA リクエストを生成されます。



割込みを生成するため、複数のイベントを有効化します。  
WCKCFG イベントは、SAI のフレーム長が正しくプログラムされていないことをユーザに知らせます。この機能は、マスタモードでのみ意味があります。

| モード     | 説明   |
|---------|--|
| RUN     | アクティブ  |
| SLEEP   | アクティブペリフェラル割込みによって、デバイスは SLEEP モードを終了します。        |
| STOP    | 停止。ペリフェラルレジスタの内容は保持されます。                         |
| STANDBY | パワーダウン状態です。ペリフェラルは、STANDBY モード終了後に再初期化する必要があります。 |



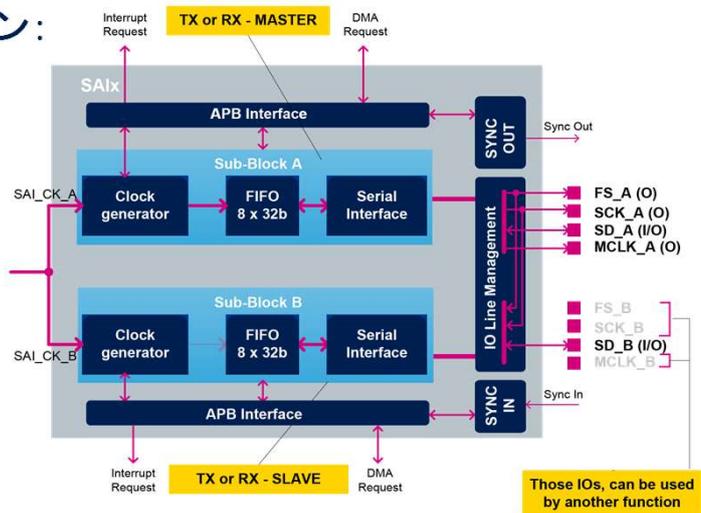
次の表は、考えられるさまざまな電力モードにおけるSAI アクティビティの概要を示しています。

SAI は、RUN モードと SLEEP モードでアクティブになり、STOP モードで停止し、STANDBY モードで電源がオフになります。

SAI が正しく動作するには、バスインタフェースクロック (APB クロック) とカーネルクロック (SAI\_CK\_x) が必要です。

• マスタ全二重またはデュアルレーン:

- サブブロック A がマスタです。
- サブブロック B がスレーブです。
- サブブロック B はサブブロック A と同期しています。



全二重マスタモードの場合、データレーンが2つ必要のためサブブロックを2つ使用します。  
 マスタサブブロック A は、内部同期機能 (IO ライン管理) によりスレーブサブブロック B に同期を提供します。

この例では、サブブロック B は SD\_B のみ使用することに注意してください。  
 内部同期により、IO の量が最小限に抑えられます。

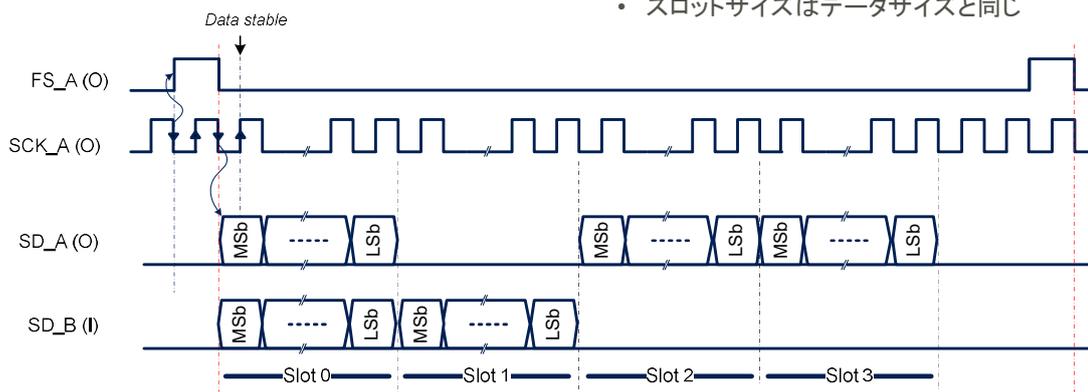
## • TDM マスタ、4スロット:

### • SAI\_A のプログラミング概要:

- マスタTX モード
- 4スロット (NBSLOT = 3)、スロット 0、2、3 がアクティブ (SLOTEN = 0x0D)
- スロットサイズはデータサイズと同じ

### • SAI\_B のプログラミング概要

- スレーブ RX モード
- 4 スロット (NBSLOT = 3)、スロット 0、1 がアクティブ (SLOTEN = 0x03)
- 内部同期有効 (SYNCEN = 1)
- スロットサイズはデータサイズと同じ



これは、TDM プロトコルを使用した別の種類の全二重モードです。

スロット 1 はサブブロック A では非アクティブ (未使用)、スロット 2 および 3 はサブブロック B では非アクティブです。

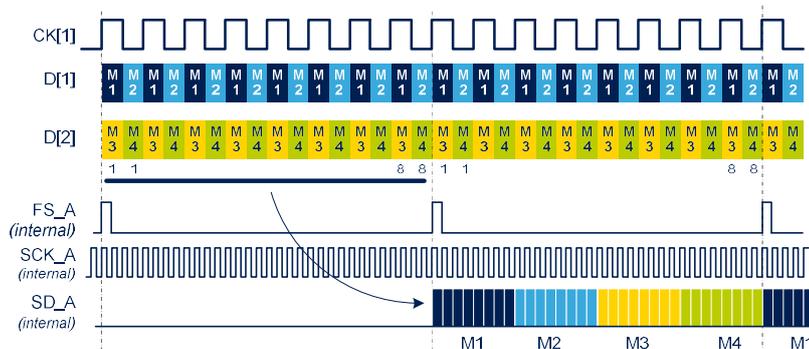
両方のサブブロックに対し 4 つのスロットを持つフレーム構造になっています。

サブブロック A は、サンプルをフレームあたり 3 つ生成します。

サブブロック B は、サンプルをフレームあたり 2 つ受信します。

- 4本のマイクロフォンを 16kHz (CK[1] = 1.024MHz) で接続:
  - SAI\_A のプログラミング概要:

| 説明 (1)                                      | フィールドの値  |
|---|--|
| マスタ RX モード                                  | MODE = 1   |
| TDM プロトコル、8bit の 4スロット                      | PRTCFCG = 0、NBSLOT = 3、<br>SLOTEN = 0xF、SLOTSZ = 0 |
| スロットサイズは 8bit、フレーム長は 32bit                  | FRL = 31、FSALL = 0、DS = 2                          |
| FS はアクティブハイ、フレームオフセットなし、スロットオフセットなし         | FSPOL = 1、FSOFF = 0、<br>FBOFF = 0                  |
| SCK_A クロックを 4.096MHz に設定<br>マスタクロックは生成されません | MCKDIV = 14、NOMCK = 1                              |
| PDM設定: 1つのクロックで最大 4<br>つのマイクロフォン            | MICNBR = 1、CKEN1 = 1、<br>PDMEN = 1                 |



(1)カーネルクロックである SAI\_CK\_A は 61.44MHzと想定しています。



この例では、4本のデジタルマイクロフォンが提供するサンプルをキャプチャする際の最も重要な SAI 設定を示しています。

一般的なアプリケーションでは、マイクロフォンは必要なオーディオレート (16kHz) の 64 倍のビットストリームクロック周波数を受け取ります。

アプリケーションが 16kHz のオーディオストリームを処理する場合、デジタルマイクロフォンに提供されるビットストリームクロックは、16kHz に 64 を掛けたものにする必要があります。これはクロック周波数、1.024MHz に対応します。

4つのデータストリームがあるため、ビットクロック SCK\_A は、マイクロフォンに提供されるビットストリームクロックの 4 倍にする必要があります。その結果、ビットクロック周波数は 4.096MHz になります。

この設定では、SAI\_A はスロットを受信するたびに RX FIFO に 8bit のデータを書き込みます。

16kHz オーディオ信号を再構築するため、ソフトウェアは各マイクロフォンストリームに対してローパスフィルタリングを実行し、その後 64 倍のデシメーションを行います。