

# Ka バンド帯の信号の ダイレクトコンバージョン技術

2023 年 12 月



## 要旨

アナログデジタルコンバータ(ADC)は、電磁気の世界と高度なデジタル信号処理の世界をつなぐ重要なダウンリンクの懸け橋です。システムに不可欠なこれらのコンポーネントのサンプリング周波数および帯域幅をより拡大することで、通信技術を進歩させて更に幅広い用途に利用できる可能性が高まります。フランス、グルノーブルの Teledyne e2v は、マイクロ波工学分野における強力な実績を生かし、データスループットとシステム性能の向上に対応するためのフロントエンド無線技術の進歩に貢献し続けています。

最新の ADC、EV10AS940 は、シングルチャンネル、分解能 10 ビットのインターリーブ ADC で、33GHz -3dB の帯域幅を備え、ダイレクト・コンバージョン性能を Ka バンド内まで拡大します。この最新の進歩による大きな特徴として、電力消費量を 6 分の 1 のわずか 2.5W/ch まで削減するとともにブロードバンド動作を実現し、複雑なデジタル周波数制御を提供しています。本稿で紹介する主なイノベーションは次のとおりです。

1. 革新的なシングルエンドのクロックおよび信号入力(バランの不要化に貢献)により、サンプリング帯域幅の拡大に貢献するとともにシステム規模を削減
2. デジタルダウンコンバータ(DDC)や複数の数値制御発振器(NCO)など、高度なデジタルアセットを内蔵
3. 複数の NCO によって、外部ミキサーを使用せずに高速周波数ホッピング(FFH)を実現可能
4. フォームファクターが小さいため、デバイスをアンテナと同じ場所に実装でき、スマートなアンテナアレイやビームステアリングのアプローチを円滑化

本稿では、これらの主な進歩についてそれぞれ説明します。

## 序論

マイクロ波のダイレクト・コンバージョン性能の限界を押し上げ、ソフトウェア無線(SDMW)やアンテナトゥビットのコンセプトを追求するうえで、Teledyne e2v は大きな進歩を実現してきました。当社は数年前、実験的デバイス EV12PS640 を用いた概念実証設計を紹介し、ブロードバンドサンプラーの開発に取り組んでいくことを示しました<sup>1</sup>。この研究をさらに強化するため、完全デジタル式マルチバンド SAR レーダーのフィージビリティスタディ<sup>2</sup>が行われ、2022 年 5 月 10 日～12 日に開催された第 7 回 RF・マイクロ波システム/機器/サブシステムに関するワークショップおよび第 5 回 Ka バンドワークショップで発表されました。

その結果、当初の想定よりも高速かつ高性能なデバイスを実現しました。これは驚くことではないかもしれませんが、実際にシリコンを製造して動作を確認する以前に、理論的には説明されていたためです。

### 本稿の内容

本稿では、Teledyne e2v の革新的な Ka バンド対応ダイレクトデジタルサンプラー、EV10AS940 を紹介します。具体的な内容は次のとおりです。

- 33GHz までの信号を、5GHz 帯域でサンプリング可能
- 195 mW/Gsps という極めて低い消費電力
  - 2.5W @ fclk =12.8GHz で評価
- 斬新な新設計アプローチによる高性能の実現
- デジタルダウンコンバータ(DDC)や複数の数値制御発振器(NCO)などのデジタル機能を内蔵
- 小さなフォームファクターのシングルチャンネルの設計に最適

### 想定される用途

- HTS 衛星通信システム
- SAR などの地球観測レーダー
- テレメトリ、トラッキングおよびコマンド(TT&C)システム

<sup>1</sup> Teledyne e2v による ADC 概念実証の紹介 - P~Ka バンドからの直接サンプリングを実現、2022 年 11 月

<sup>2</sup> L、C、X、および Ku バンドで動作する完全デジタル式マルチバンド SAR システムのフィージビリティスタディ

# Ka バンド帯の信号の ダイレクトコンバージョン技術

2023 年 12 月

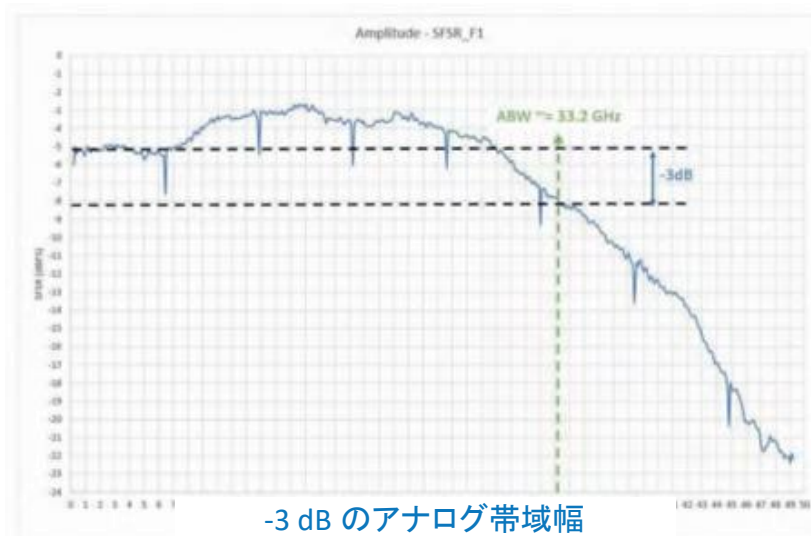


図1 - EV10AS940 のブロードバンド入力帯域幅

## 次世代の設計目標のために求められた新しいアプローチ

本デバイスは、新しいアーキテクチャ、新しいプロセス技術、および多くのシステムイノベーションを組み合わせました。ひとつ前の製品である EV12AQ600 でも、同じアプローチが取られています。フロントエンド入力設計を進化させることで、帯域幅が拡大するとともに設計の柔軟性が向上します。電力消費量は大きく減少する傾向にある一方で、デジタル周波数制御機能を内蔵することは、本サンプラーの価値を大きく高めると同時に省スペースの観点でも有利となります。

## シングルエンド入力

一例として、高度なフロントエンド設計とシングルエンド信号およびクロック信号を取り上げます。これは、現代の RF 設計で一般的である平衡差動入力信号と大きく異なる部分です。この違いがもたらす明らかなメリットについて考えてみましょう。

現代の RF 設計では、信号をデータコンバータに入力する際に必ずバランが必要となります。これはいくつかの課題を生み出します。第一に、内在する帯域幅の制限によりバランは信号周波数応答に大きな影響を及ぼす可能性があります。バランは調達できる選択肢が限られているため、周波数計画を複雑化します。さらに、バランは明らかに設計に重量、空間的制約、およびコストの増加をもたらします。本デバイスではバランが不要なので、ブロードバンド入力段で 33 GHz -3 dB の帯域幅(図 x を参照)を実現し、積分 DC ブロックと 50Ω の実効インピーダンスが強化されています。これはフロントエンドに対する大きな強化点であり、より密度の高い設計レイアウトが可能になります。

## 広い帯域幅

Ka バンドで動作する新設計のサンプラーのために、革新的なブロードバンドフロントエンドが考案されました。33GHz -3dB という帯域幅は、目標達成と言えるでしょう。本デバイスは十分なスプリアスフリー性能を発揮し、Q バンド(33~50GHz)領域内でも有用な信号サンプリングを実現します。主な動的仕様については右のデータを参照してください。フロントエンドに対するさらなる変更点としては、シングルエンド信号のアプローチへの移行、オンチップ DC ブロックの搭載、50Ω のインピーダンス整合などが挙げられます。

### EV10AS940 の主な動的特性のスナップショット

33GHz (-3dB) のアナログ帯域幅  
 $F_s = 12.8\text{GHz}$ ,  $\text{POUT} = -6\text{dBFS}$  における SFDR

$F_{in} = 4.1\text{GHz}$	$\rightarrow -54.5\text{dBc}$
$F_{in} = 14.1\text{GHz}$	$\rightarrow -50.2\text{dBc}$
$F_{in} = 17.4\text{GHz}$	$\rightarrow -50.4\text{dBc}$
$F_{in} = 28.4\text{GHz}$	$\rightarrow -50.5\text{dBc}$
$F_{in} = 40.5\text{GHz}$	$\rightarrow -32.1\text{dBc}$

# Ka バンド帯の信号の ダイレクトコンバージョン技術

2023 年 12 月



## 信号周波数管理

非常に高度なミックスド・シグナル製品は、特にマルチバンドやビームステアリングの用途をターゲットとして、包括的なデジタル信号周波数制御を提供します。統合されているデジタル信号のダウンミックスは、微調整用の位相同期された 4 バンクの NCO で補われ、これらはデバイスの 33 GHz (L バンド~Ka バンド) の入力範囲から選択可能な 4 つの独立した周波数帯をサポートします。

決定論的な専用の周波数ホッピングトリガー信号を使用した各微調整用 NCO チャンネル(図 2 を参照)上の専用の位相アキュムレータにより、位相同期された高速周波数ホッピング (FFH) が実現されます。これにより、マルチバンドシステムをサポートする 4 つの独立した構成チャンネルが提供されます。4 つのチャンネルすべてにわたって位相の連続性が実現されています。各 NCO チャンネルには 4 ビットの位相微調整が実装されており、非常に柔軟性の高いクロスチャンネル位相遅延の管理が可能です。5 つ目の NCO チャンネルは、位相設定の粗調整を行い、4 つの NCO の微調整出力をゲートで制御することにより、大規模なアレイアンテナ環境内の個々の RF チャンネル間の相対位相オフセットを操作します。FFH はさらに、ゼロ復帰 (RTZ) モード、位相連続モード、および位相同期モードの 3 つのプログラム可能なモードでサポートされています。

決定論性は、本統合型サンプラーが持つ価値優位性の一つです。これは、当社の他の製品にも多く適用されている機能であり、同期チェーン(右の囲み記事を参照)がもたらす優位性です。これは、大規模な分散型のデバイスアレイ全体でサンプル同期を可能にするためのロバストなアプローチです。同期信号は、信号処理マスターによって外部から入力される低速のクロックエッジです。同期信号は、サンプリングシステム全体で準安定または不確実なクロックエッジ事象が発生するのを防ぐために使用されます。個々のサンプラーは、同期信号をローカルなサンプリングゲート信号として使用します。同期チェーン内の各デバイスに対して同期出力信号が入力されて出力は同期信号のパススルー時間(1 つのサンプラー内の通過時間)のレイテンシを考慮して調整されます。同期信号が同期出力信号としてタイミング調整されるため、システムが立ち上げ時の校正を一度実行した後は大規模なシステム全体にわたって同期されたサンプリングが広い動作温度範囲で保証されます。これにより、決定論的なサンプリングが保証されるとともに、精密な信号位相関係がすべてのバンド間で維持されます。

### 同期チェーン-ビーム形成のための大規模なチャンネル並列化を実現

サンプルクロック周波数の増加に伴い、特にビーム形成システムにおいては、信号サンプルクロックエッジをシステム全体に決定論的に適用することが不可欠となりました。これはシステムの空間精度限界を決定します。サンプル位相精度は、特に合成開口地球観測 (EO) レーダーにおいては、クロックシステムの精度に多大な要求を課します。

サンプルクロック位相の要件を緩和するため、Teledyne e2v は革新的な同期チェーン機能を開発しました。これにより、フェーズアレイ内の個々の ADC がデジタル準安定問題を解消します。これは、チェーン上の各デバイスが、受信した同期信号の「タイミング調整」を行い、タイミングチェーン上で後に続くすべての ADC と共有するためです。これは、各デバイスが精密なタイミングでサンプリングを行うようになるための独創的な方法です。その結果、大規模なチャンネル並列化が可能となり、チャンネル位相整合という悩みの種が大きく緩和されました。

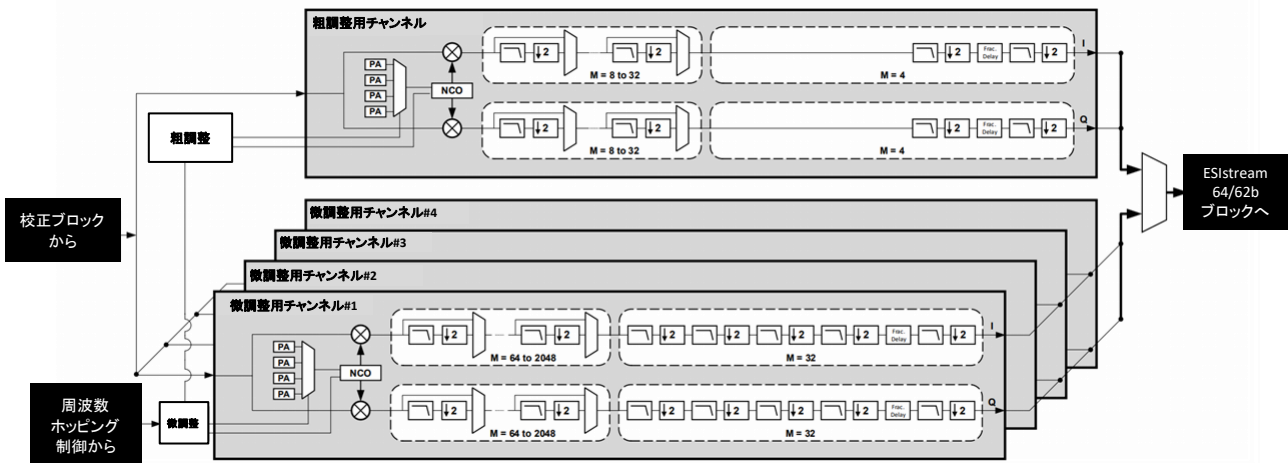


図2- マルチバンドFFH をサポートしたデジタル位相粗密制御NCO

# Ka バンド帯の信号の ダイレクトコンバージョン技術

2023 年 12 月



EV10AS940 は特にマルチチャンネルシステムで動作するように設計されています。全てのチャンネルの RF フロントエンドの確実な位相同期が保証されるため、本製品はデジタルビーム形成フェーズドアレイに非常に適しています。ダウンコンバージョンまたは周波数混合は、2~1024 のデータデシメーション比を提供する内蔵のデジタルダウンコンバータによって得られます。

間引かれたデータは、専用の ESStream 高速シリアルリンク(HSSL)に 12.8 Gbps で出力されます。ESStream は、Teledyne e2v のライセンスフリーのデータプロトコルです。この最新拡張版のプロトコルは、62B/64B 符号化を使用して強化された 96.9 %のデータ転送効率を誇ります。ESStream の主なメリットは、決定論的なレイテンシとハードウェアのオーバーヘッドが低いこと、リンクプロトコルの FPGA 実装を行いやすいことです。さらに、ESStream は符号化スキーム内に DC ケーブルバランシングが組み込まれており、最大 64 ビットのランゲスを保証します。また、アクティブリンク同期モニタリングも可能です。

## 発熱、消費電力、スペース

発熱、消費電力、スペースを抑えることは、あらゆるブロードバンド設計における重要な考慮事項であると同時に、厳しい環境内、特にスペースが制約されて高い信頼性が求められるシステム設計に影響を与える主なファクターです。現代的な設計の SWaP<sup>2</sup>性能の継続的な改善に注力することで、本製品は一步進んだ改善を実現しています。本サンプラー設計では、消費電力の著しい改善が実証されています。初期の概念実証デバイス EV12PS940 の消費電力が約 15W であったのに対し、本統合型デバイスでは、サンプル速度を向上させながら消費電力が 6 分の 1 のわずか 2.5W/チャンネルまで削減されています。

このような大幅な削減は、設計レイアウトの簡略化に貢献すると同時に温度管理に課される要求も緩和します。デバイスの温度モニタリングは、オンチップ温度モニターの測定値を読み取ることで行うことができます。このデジタルセンサーは、瞬間測定値と平均測定値の両方を提供し、これらはデバイス内レジスタを介して取得できます。この方法により、アンテナアレイ全体の温度パフォーマンスを遠隔でモニタリングすることができ、追加のセンサーをプロビジョニングする必要はありません。

この新デバイスは有機基板上にパッケージ化されており、寄生性能低下が抑制されています。基板は、350 ボール、0.8 mm ピッチ、16 x 17.6 mm のフリップチップボールグリッドアレイ (FCBGA) に成形されています。本パッケージは、宇宙探査ミッションを含む高信頼性用途のための認可を受けています。

## 継続的な校正

EV10AS940 はインターリーブ ADC を使用しており、これらは補正や校正を行わずに使用するとオフセットやゲインのミスマッチを生じます。オンチップ校正システムによりこれら 2 つのミスマッチの原因が評価および補償されます。インターリーブ ADC のタイミングミスマッチと帯域幅不均衡については、アナログフロントエンド内で軽減されます。次の 2 種類の校正が提供されています。

- **バックグラウンド校正**は、アクティブ信号サンプリング中に実行される継続的な計算に基づいています。各インターリーブ ADC について、スライドする時間窓上で出力の平均値と RMS 値が評価されます。これらの値は全体の平均値(オフセットの場合)および RMS 値(ゲインの場合)と比較され、それぞれ減算と除算により、リアルタイムでずれが除去されます。
- **デフォルトの工場出荷時校正**。一部の用途では、電力節約などの理由により、バックグラウンド校正機能を利用できない場合があります。このようなケースでは、ワンタイムプログラマブルメモリに保存されている工場校正時の校正係数をフロントエンドに適用することができます。

<sup>2</sup> SWaP - 寸法・重量・電力因子。

# Ka バンド帯の信号の ダイレクトコンバージョン技術

2023 年 12 月



## 結論

新しいブロードバンドマイクロ波サンプラーEV10AS940 は、多くのデバイスイノベーションを実証しています。この種のサンプラーでは初となる本デバイスの注目すべき特徴はブロードバンド、シングルエンドの入力によりバラン不要の設計を促進し、システム帯域幅の最大値に貢献するとともに、PCB の面積を抑えられることです。

統合されているプログラム可能な 2 つの革新的なデジタル周波数制御機能、DDC とマルチバンド NCO サブシステムにより、本デバイスはフェーズドアレイ設計のための理想的なビーム形成ソリューションとなっています。本デバイスは、特に混合ミッション宇宙ペイロードを実現したいと考えているお客様や、地球観測合成開口レーダー(SAR)、さらには高度な電子妨害装置(ECM & ECCM)の性能を向上させたいと考えているお客様に歓迎されることは間違いありません。

さらに、3 つのモードの FFH を実行する能力や、決定論的な位相サンプリングを高いサンプルレートで実現する能力は、本デバイスの高性能マイクロ波技術実証デバイスとしての地位を確固たるものにしていきます。Teledyne e2v は、当社のビジョンであるマルチバンドソフトウェア無線システムに引き続き取り組んでいきます。EV10AS940 は、マイクロ波最先端半導体工学の進歩に向けた継続的な取り組みを示す新たな例であり、デジタルコンバータをベースバンド動作モード(第 1・第 2 ナイキストゾーン)から移行させ、RF アンテナの性能へとさらに近付けるものです。

## 参考文献

- Teledyne e2v による ADC 概念実証の紹介 - P~Ka バンドからの直接サンプリングを実現、[EV12PS640 | Microwave Journal](#)
- [L、C、X、および Ku バンドで動作する完全デジタル式マルチバンド SAR システム、ECHOES Radar Technologies 社との共同執筆によるホワイトペーパー](#)
- [わずか 195mW/GSPS およびシングルエンド入力による、Ka までの複数の周波数帯における ADC の性能](#)
- [最先端マイクロ波 ADC: EV10AS940 FMC ボードの紹介](#)



詳細については、以下宛てにご連絡ください:

Nicolas Chantier

マーケティングディレクター  
信号・データ処理ソリューション部門  
[nicolas.chantier@teledyne.com](mailto:nicolas.chantier@teledyne.com)



詳細については、以下宛てにご連絡ください:

Helene Barneoud

アプリケーションエンジニア  
信号処理ソリューション部門  
[Helene.BARNEOUD@Teledyne.com](mailto:Helene.BARNEOUD@Teledyne.com)

