

# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020 年 11 月



## エグゼクティブサマリー

この記事で説明するのは、宇宙産業が現在直面している新しいテクノロジーです。これは今日の商業的な常識が覆されるだけでなく、宇宙を利用するインフラの設計や運用に大きな変革をもたらされる可能性があります。市場や技術の動向から見て、より柔軟なマルチミッション・プラットフォームに焦点を当てる必要があるという仮説があります。これは SoftSats と呼ばれるもので、既存の衛星とは異なり運用パラメータと無線インタフェースを基本的にソフトコード化（つまり主にソフトウェアで決定）するもので、現在の主流となっているハードウェアによる実装方法とは真逆のアプローチです。これにより、事業者は弾力的で機敏なプラットフォームにアクセス可能となり、技術的な投資を無駄にすることなく長期間にわたって市場の要求に対応させていくことができます。また、このイノベーションの標準化が進んで柔軟性が高められ、システ

ムを再利用できるようになれば、宇宙へのアクセスコストが削減されて市場全体に利益をもたらされます。

SoftSats のキー・イネーブラーとなるのは、新しい広帯域データコンバータです。これにより初めて Ka バンドへのダイレクトアクセスが可能になり、中間周波数での処理を省くことができるため、これまで不可能だった RF ソフトウェアリゼーションがクリティカルなスペクトル帯域まで広がります。複雑な広帯域用コンポーネントの開発状況について、実験環境で評価した二つの概念実証設計の初期成果も含めて説明します。結論は明確で、アーキテクチャを再検討して SoftSats への準備を進める時期がきています。2021 年後半には製品初期段階のサンプルをお披露目できるでしょう。それまでは現在のプロトタイプを用いた実験をさらに継続していきます。

## New Space（ニュースペース）のご紹介と将来の SoftSat の展望

世界的に大きな成長の機会と、新たな宇宙ビジネスへの動きが生まれています。このことは、欧州委員会に提出されたヨーロッパ宇宙セクターに関する 2019 年の報告書<sup>1</sup>において明らかになりました。この包括的な報告書では新興技術の動向について検討し、主要なアプリケーションや資金面で拡大するリスクや課題について焦点を当てています。

ニュースペースの動向の成果の一つとして、柔軟性の高い衛星がまもなく登場します。この記事内で SoftSats と表記するこのシステムは、複雑なソフトウェア定義による宇宙プラットフォームです。SoftSats は宇宙インフラのコア技術、特に無線インタフェースに革命をもたらすもので、革新的なビジネスモデルを新たに作り出すことは確かです。Teledyne e2v にとって、SoftSats はオンボードのソフトウェア定義の処理技術を用いる衛星の一つで、機敏なダイレクト・アクセスによるソフト無線（DASRs）技術を備えたものです。様々なミッションをサポートしながら、表（図 1）で強調されているように、運用シナリオを市場の要求や運用環境に合わせてダイナミックに切り替えることができます。

| オペレーションモード | サービス            | 周波数帯域／プラン                      |
|------------|-----------------|--------------------------------|
| A          | SAR EO          | C および X バンド<br>周波数プラン Nb xyz91 |
| B          | 船舶通信            | X バンド<br>周波数プラン xyz02          |
| C          | SAR EO および時分割通信 | C および X バンド<br>周波数プラン Nb xyz03 |
| D          | 通信              | Ka バンド<br>周波数プラン Nb xyz04      |

図 1 - RF ソフトウェアリゼーションにより、一つの SoftSats で複数のクライアントサービスを提供することが可能

SoftSats には二つの対をなす特徴があり、それはモジュール式のダイレクト・アクセス RF ハードウェアによる RF ソフトウェアリゼーションと、オンザフライの再構成機能です。これらを組み合わせて利用することで、将来の市場動向に対応しながら、SoftSats のミッションに対し全て迅速にマルチモード運用で対応することが可能になります。

1. 「ヨーロッパにおける宇宙セクターの将来」、ヨーロッパ投資銀行 ©2019

# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020 年 11 月



再構成により（単一ミッション用の）固定ハードウェアペイロードに伴うリスクをかなり低減できます。SoftSats を使用して、新たな無線周波数計画をオンデマンドでダイナミックに導入したり、個々の中継器を再配置して変更後のミッションプロファイルに適合させることができます。さらに、電子走査が可能なアンテナ（ESA）と組み合わせることで、サービスプロバイダは多用途で長寿命の宇宙中継用機材を得ることが可能です。

SoftSats が標準化の波に乗れば、さらに全体のコストが削減できます。実際、この開発の先駆けとなる、Atlas Space Operations の CTO が近年描いているような「サービス<sup>2</sup>としての衛星通信システム」が出現する可能性が出てきました。一見、突飛な考えに見えますが、このアイデアの実現性はまもなく市場に登場する新しい

データコンバータが裏付けています。これですら、Ka バンドのダイレクト・コンバージョンが現実のものとなり、将来のマイクロ波無線インタフェースや衛星通信インフラについて再び考えることができます。

この記事の残りの部分では、宇宙産業に大きく影響する破壊的な技術と市場の動向の双方について考察します。その上で、Teledyne e2v がどのように対応しているのかをお伝えします。

**国際電気通信連合 (ITU) のブロードバンド調査レポート 2019 (State of broadband report 2019) によると、現在 4980 基以上の人工衛星が地球軌道上にあり、その中の 15% が通信専用の衛星です。**

<sup>2</sup> 「サービスとしての Satcom の将来」ブラッド・ボード、Atlas Space Operations CTO および共同創設者、2020 年 10 月 2 日

## 市場のメガトレンド：積極的な競争と、際限なく増加するデータの双方が宇宙インフラの未来に影響します

過去 30 年の間、通信衛星は高度に専門化されたシングルタスクのプラットフォームであり、大企業や政府が運用するものだと考えられてきました。例として、ベースステーションやデータ中継器として運用される、静止軌道ベースの高スループット衛星（HTS）を考えてみましょう。今日の通信インフラのほとんどは、これらの衛星を利用したネットワークを介して、地上ベースのインフラを形成しています。ここ数十年はこのような従来モデルによって経済を成長させてきましたが、最近では歪みが見えつつあります。地上の商業的な進歩に合わせた宇宙ベースのプラットフォーム開発は、依然として厳しい状況です。急速に拡大してきた技術を宇宙に移行するには何年もの時間が必要で、事業者のリスクが増大します。ソフトウェアでなくハードウェア定義の宇宙を媒介とする機材はすぐに別のものにとって代わられてしまうため、事業者にとって頭痛の種となります。

**IDC2 による 2018 年時点での予測によれば、データは年平均成長率で 61% の増加が見込まれ、2025 年には 175 ZB（1 ZB = 10<sup>21</sup> バイト、すなわち 1 兆 GB）が必要になると考えられています。**

近年、従来の宇宙オペレータやそのクライアントは、運用コスト、リスク、投資のすべてを低減できる方法を探っています。同時に、この 5 年間には起業家の活動が目立ち、以下のように私財投入によって宇宙経済を回そうとする流れが見て取れます。

- ・ 2015 年、SpaceX が Starling プログラムを発表しました。これは 3 万基ほどの衛星を低地球軌道（LEO）に配置し、レイテンシの低い広帯域アクセスを全ての人に届けようとするものです。
- ・ 650 基の衛星によってコンステレーションを構築する OneWeb の当初計画は、Starlink とほぼ同時に発表されました。
- ・ ジェフ・ベゾスの Amazon プロジェクトカイパーが 2019 年 4 月に発表されました。これは 3,236 基の衛星を今後 10 年間で再び打ち上げるプロジェクトで、LEO における広帯域インターネットの提供を目標としています。

# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020年11月



際限なく増加するデータ容量は、衛星容量のプランニングに大きく影響します。この話題への注目はどんどん高まっています。新たな 5G 無線システムや増加し続ける IoT アプリケーションにより、データも加速度的に増加します。2018 年の IDC による予測<sup>3</sup>で取り上げられた成長のペースは、信じ難いものです。IDC による予測では、データは年平均成長率で 61%の増加が見込まれ、2025 年には 175 ZB (1 ZB = 10<sup>21</sup> バイト、すなわち 1 兆 GB) が必要になると考えられています。

こうした主に商業的な動機によるデータの増加だけでなく、より難解な用途とニーズも存在します。政府は国防のために、宇宙プログラムへのコミットメントを倍増させています。超大国が関心を寄せる極超音速ミサイル技術の開発により、軍拡競争が加速されると示唆する意見もあります。さらに、地球温暖化に対して、科学者は気候変動の影響をより適切に監視する方法を求めており、地球観測で使用される合成開口レーダーなどの高解像度機器の配備への関心が高まっています。急速に変化し大量のデータが必要なこうした状況に対し、業界は対応を余儀なくされています。今後 10 年間は宇宙技術が急速に進展し、商業化の機が熟す時期と言えます。通信技術は、まさにこの迫りくる変革を促進するための準備が整った段階にあるのです。

3. 「エッジからコアまで、世界のデジタル化について」 IDC ©2018 年

## 用語

### ニュースペース

新たな宇宙への投資哲学に広がる世界的な動向です。一連の技術の進歩が組み合わされ、民間企業セクターの急速な成長につながっています。この動向によって、今後 10 年で多様なプロジェクトや開発の種がまかれることになり、宇宙での競争が激化するきっかけとなりました。

### SoftSat (ソフトウェア衛星)

オンボードのソフトウェア定義の処理技術を用いた衛星システム。機敏なダイレクト・アクセスのソフト無線 (DASRs) 技術との組み合わせにより、様々なマルチモード統合技術ミッション (通信、ナビゲーション、センシング) をサポートし、運用シナリオを市場の要求に合わせてダイナミックに切り替えることができます。SoftSats の運用ミッションや無線インターフェースは、衛星に搭載したアクティブ・ファームウェアで定義されます。現在は商業目的の SoftSats として知られたものはまだ軌道にありませんが、ESA は 2020 年中に OPS-SAT を開始します。これは本格的な SoftSats の先駆けになると筆者は考えています。

### ダイレクトアクセス・ソフトウェア無線 (DASR)

DASR は高度なソフトウェア無線で、動作特性がアルゴリズムで定義されています。従来のハードウェアの制約を受けず、新たなプログラムコードを与えることで、ダイナミックに再構成することができます。

## 半導体技術の問題により生じた、宇宙機器用部品のサプライチェーンの分裂

半導体技術を熟知していない限り気づかないかもしれませんが、チップ業界が直面する混乱により、将来の製品ソーシング戦略が変化しつつあります。主な要因は二つあります。

- ・ 28 nm 未満のノードでは、CMOS プロセス技術の最大周波数が崩壊します。このため、高度な処理の観点からは RF ソフトウェア化の利点があるとしても、最新のノードは先進的な高周波サンプリングシステムの構築を一切サポートしていません。

- ・ 次世代の微細化プロセスの開発や、それを利用した製品の開発にかかるコストの増加は加速度的で、大量に必要とするコンシューマ向け製品でなければ割に合わなくなります。

電力の大幅な改善という点でもトランジスタ密度の増加という点でも、微細化プロセスに対するリターンは減少しているのです。その一方で、開発製造コストは天文学的に増加しています。



# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020 年 11 月



## RF 用 CMOS の勢いが弱まる時期

この 20 年間、ムーアの法則に後押しされる形で、大量の CMOS プロセスの製造が続いてきました。これによって価格が下がり、ソフトウェア定義ベースバンド無線技術はその恩恵をうけてきたのです。新たなノードの商業化によってイノベーションが繰り返されたことで、コンシューマのパフォーマンスは最高のものとなり、電力削減や多様なアプリケーションでの利用も可能になりました。何年もこれが自然法則のように見えていましたが、最近ではデバイスの基本的な物理的制約により、エンジニアリングのトレードオフがバランスを崩し、イノベーションが停滞しています。

MOSFET 半導体の主要な性能指数は  $f_{max}$  (最大周波数) です。この  $f_{max}$  は元々のプロセス性能を高周波利得で表したものです。図 2 の  $f_{max}$  は、トランジスタの電力利得が 1 に低下する際の周波数です。何年もの間、 $f_{max}$  はゲート寸法の縮小に伴い増加し続けてきましたが、残念ながら周波数スケールでは一転して遅くなる傾向にあります。28 nm では  $f_{max}$  は 360 GHz 程度まで到達しました。これに続く 14 nm ノードの場合には、28 nm の場合の半分 (160 GHz) にまで急落しています。周波数低下の理由は複雑です。プロセスの寄生抵抗と静電容量の双方が混在し、パフォーマンスバジェットにますます影響するようになっていきます。また、しきい値電圧が低下すると、ダイナミックレンジ、ドライバのパフォーマンス、さらにノイズレベルも影響を受けます。では、今後アナログ回路が衰退した場合、業界はどのようにイノベーションのペースを維持できるのでしょうか。ヨーロッパでは、研究開発の資金は二つの柱に焦点を当てています。

- ・ DOTSEVEN は、700 GHz の  $f_{max}$  を有するシリコンゲルマニウム (SiGe) のヘテロジニアス・バイポーラトランジスタ (HBT) の開発を目指す、3 年間の先鋭的な研究開発プロジェクトです。

- ・ TARANTO は、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) をより高いレベルで統合して進化させることで、次世代の BiCMOS 開発における技術的な障壁を乗り越えることを目的としたプロジェクトです。

これらのプログラムが目指す方向を図 2 の上部の赤い矢印で示しています。これはコアデジタル CMOS や、無線アナログ回路向けの代替プロセスアプローチから延伸したラインからは離れています。

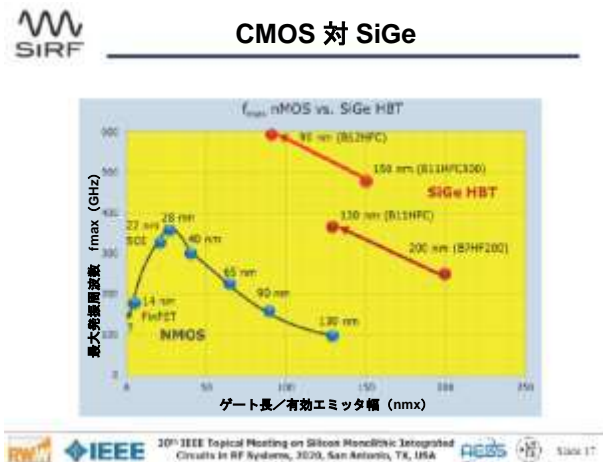


図 2 - CMOS および SiGe プロセスの  $f_{max}$  の変化。28 nm 未満のゲート長では CMOS の性能が低下。(データソース: Infineon、IEEE Radio & Wireless Week、2020 年 1 月、サンアントニオ、テキサス州 (米国))

**微細化 SoC 設計のコストは膨大に膨れ上がるため、今後それに代わるものが必要になります。**

シリコンの場合の設計コストも爆発的に増加しています。IBC study<sup>4</sup>によれば、IC 設計コストは 65 nm のデバイスでは 2,850 万ドルだったものが、28 nm では 5,130 万ドルへと倍増し、28 nm より小さい場合にはさらに加速度的に増加します。これらのコストはすでに専門市場が負担できる額をはるかに超えています。このような経済的検討はソフト無線設計の文脈ではほぼ無意味です。しかし、強調すべき重要な点は、宇宙産業では専用 IC (ASIC) の設計から得られる CMOS スケーリングや性能の利点にしばしば依存してきたということです。これにより、特注システムを構築する際、将来コストの削減や電力改善を図ってきました。しかし、専用アナログ回路では、古いプロセスノードに依存するか、さもなければ最新の BiCMOS プロセスで見られるシリコンゲルマニウム (SiGe) HBT を利用した高周波デバイスへと飛躍をとげなければなりません。

4. 「進行した設計コスト (新たな CPU、GPU、SoC) のエボリューション」国際ビジネス研究学会 © 2018 年

# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020 年 11 月



信号パスのイノベーションを取り戻すには、カスタム ASIC から徐々に離れていくことを余儀なくされます。性能上の課題が強調されるためです。将来の RF 信号パスは必然的にバルクの CMOS から離れ、最新のフィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA) によって実現される高度な信号処理機能をミックスドシグナル・フロントエンドと組み合わせたアーキテクチャへと変更せざるを得ません。FPGA はバルク CMOS 同様、さ

らなる経済性と性能利得を目指します。まさにこの文脈に沿って、Teledyne e2v のようなイノベーターはこれまでインフラへの投資を続け、小型の統合システムインパッケージ (SiP) ソリューションを市場に提供してきたのです。SiP は RF 小型化の次フェーズの中心であり、SoftSats の設計の主な推進力となるのは間違いありません。

## 半導体技術の問題により生じた、宇宙機器用部品の製品サプライチェーンの分裂

SoftSat パラダイムを実現するために最も必要な進化とは、どのようなものでしょうか。最も重要なのは、再プログラミング可能な処理、信号の変調と復調、プロトコルコーディング、そして周波数生成の開発で、以下のようなものがあります。

1. Ka バンド (40 GHz) の信号帯域幅に対応する、マルチギガヘルツの広帯域データコンバータ (ADC および DAC) が利用可能であること。これは、従来のアナログ RF (ベントパイプ) 信号チェーンで達成された性能を上回ります。このようなコンポーネントがさらなる付加価値を生み、オンボード・デジタル・アップおよびダウンコンバージョン機能や数値制御が可能になります。
2. 将来のシリコンフォトニクスを含め、12 Gbps 以上のデータレートまでサポートする、超高速相互接続およびバックプレーン技術
3. 複数チャンネルを精密に時間同期させ、サンプルポイントでの同期を確実にしてシステム全体の信号の位相を維持すること
4. SiP の利得やスペクトル特性を向上させる、新たな高性能かつ低誘電率の有機基板

5. 宇宙グレード、または宇宙環境で使用できるコンポーネント

6. 改良された半導体電力増幅器

宇宙産業が本格的な SoftSat を提供できるかどうかは、これらの一つ一つにかかっています。全てを詳細に論じるにはスペースが足りないので、この記事の残りの部分では重要な四つのポイントに焦点を当てます。

## K バンドより高い周波数帯の RF ソフトウェアリゼーションに向けて

完全な Ka バンドサンプリングシステムの構築に向けた基礎段階として、Teledyne e2v では 2019 年ごろに実験的プロジェクトを開始しました。このプロジェクトでは、線形性の高い 24 ギガヘルツの信号量子化器 (トラックアンドホールド増幅器 (THA)) を、当時最新の広帯域 ADC、EV12AQ600 と組み合わせました。その様子を図 3 に示します。



図 3 - PS620 の実験用フロントエンド・ボードのイメージ

### 機能デバイスの主なパラメータ

#### EV12AQ600 ADC

- ・ クアッドの 12 ビット 1.6 GSps ADC コアにより、1、2、4 チャンネルのタイムインターリーブをサポート
- ・ 完全インターリーブモードによる 6.4 GSps までのサンプリング
- ・ 6.5 GHz の入力帯域幅 (-3dB)
- ・ 統合された広帯域クロスポイントスイッチ
- ・ マルチチャンネル同期のための Sync チェーン

#### RTH120 THA

- ・ 入力帯域幅 : 24 GHz
- ・ デュアル THA により、サンプルクロック・サイクルの半分以上の出力ホールド時間を実現
- ・ 完全差動設計

# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020年11月



PS620 の概念実証は、マイクロ波 THA とクアッドコア ADC とを組み合わせています。6.5 GHz のアナログ入力帯域幅を特徴とする内部広帯域クロスポイントスイッチとの組み合わせにより、1.5 Gsps での個別サンプリングが可能です。この ADC はコアインターリーブに適しています。4 つのコアのインターリーブにより、6 Gsps 以上でのサンプリングが可能です。K バンド THA や適切なサンプリング周波数を選択してナイキスト折りたたみ原理を適用することで、K バンドから EV12AQ600 のベースバンドである 6 GHz 帯域への直接ダウンコンバージョンが可能であると考えられます。この結果については、これまでのホワイトペーパーでお伝えしています<sup>5</sup>。

このモジュールで行った試験は、上述の量子化器による K バンド帯 (18~26.5 GHz) でのダイレクト・ダウンコンバートの限界を見極めることを目的としたものです。初期のスプリアスフリー・ダイナミックレンジ (SFDR) 試験から、三つの問題があることがわかりました。

- ・ 入力信号の電力に THA ダイナミック性能に大きく影響すること

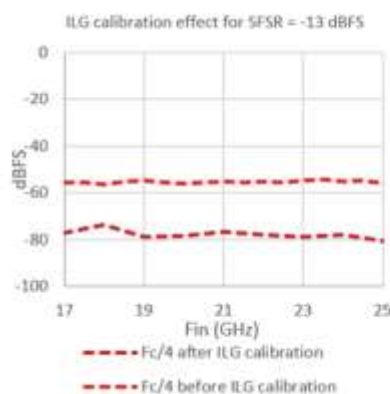


図4 - 高周波に最適化したインターリーブの影響

- ・ ADC の高ナイキストゾーン・インターリーブ性能に対して、工場での校正結果が大きく影響すること
- ・ 高ナイキストゾーンでサンプリングする際、ADC の積分非直線性 (INL) 誤差が影響すること

初期実験の報告では、いくつかの制約がありました。特に注目したいのは、コアインターリーブの校正 (ILG) です。当初の ILG はベースバンド周波数に合わせてきちんと最適化されていました。しかしスペクトル解析から、 $F_c/4$  を中心とするスペクトルのスプリアスは各コアのインターリーブ・ステージのオフセットの差が影響していることが明らかになりました。

当然ながら、オフセットは様々な試験周波数にわたり影響を及ぼしていました。何度も調整を重ねた結果、 $F_c/4$  スプリアスを大幅に低減できることがわかりました (図4)。K バンド帯での動作にフォーカスして 21.5 GHz で校正したところ、非常に良い結果が得られ、K バンド全域でほぼ 15 dB という結果が得られました。



図5 - 初期の PCB ベースのプロトタイプによる校正前後の K バンド SFDR 実験結果

さらなる最適化の可能性というのは限界だと思われました。しかし、コンバータの積分非直線性 (INL) は明らかに第3高調波 (H3) に影響を与えていました。ILG 誤差と同様に、INL 校正は製造試験でのベースバンド動作に対して行います。しかし、試験エンジニアは高周波校正ではさらに改善されると予測しました。実際、H3 においてさらに 3~5 dB の低下が見られました。このような結果 (図5) から、ここで説明するようなダイレクト・マイクロ波アクセス製品計画が策定できました。

<sup>5</sup> 「先進的な広帯域サンプリング・ソリューションによる K バンドでのダイレクト・サンプリング RF 技術の限界を超える」  
Teledyne e2v©2019年。



# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020 年 11 月



## 広がり続けるマイクロ波ダイレクト・アクセス製品のロードマップ

Ka バンド・ダイレクト・アクセスに向け、Teledyne e2v では図 6 に示すように PS620 の概念実証を超え、さらに 2 バージョンの検証を計画しました。

2020 年の一年間で、最初の概念実証を更に進化させました。第 2 プロトタイプ PS640 では、EV12AQ600 ADC をペアで使用してタイムインターリーブすることでサンプリングレートを 2 倍とし、使用帯域幅が 30 GHz の新たなマイクロ波サンプラーと組み合わせています。これは K バンドを超える領域に到達するための最初のステップです。

| 様々なソフト無線受信パス | Proto 1 PS620               | Proto 2 PS640             | Ka-band quantizer         |
|--------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| アーキテクチャ      |                             |                           |                           |
| デバイス構成       | MPM - パッケージ部品使用             | MCM - フリップチップダイ使用         | MCM - フリップチップダイ使用         |
| 構造           | PCB                         | FC-BGA                    | FC-BGA                    |
| 周波数          | Ku-band (24 GHz まで)         | Ka バンド                    | Ka バンド                    |
| サンプリングレート    | 6-Gsps                      | 12 Gsps                   | 12 Gsps                   |
| THA/帯域幅      | デュアルクロック RTH120 19~21.5 GHz | 社内の第 1 世代プロトタイプ 30 GHz まで | 社内の第 2 世代プロトタイプ 40 GHz まで |
| ADC          | 1 x AQ600                   | 2 x AQ600s                | 拡張マイクロ波 ADC               |
| 消費電力         | 8 W                         | タイムインターリーブ                | TBD (未確認)                 |
| 入力信号パス       | 差動                          | 14.5 W                    | シングルエンド                   |
| ENOB         | 7 ビット                       | シングルエンド 6.5 ビット           | TBD (未確認)                 |
| 状況           | 現在、概念実証の試験結果が入手可能           | 初期評価結果および α 版サンプルが入手可能    | 2021 第 3 四半期までに α 版を準備予定  |

図 6 - Teledyne e2v 社 Ka バンド用ソフト無線開発のロードマップ

## 初期の Ka バンド完全対応プロトタイプの実験結果

SFDR プロットにみられるように、第 2 プロトタイプ的设计から既に有望な結果が得られています (図 7)。この結果から、10 GSps でサンプリングした 25 GHz の入力信号の場合、第 3 高調波のスプリアスは -57 dBFS となり、入力レベルを考慮すると SFDR の -51 dBc と同等となっています。これはとても見込みのある結果です。初期の PS620 は RF プリント回路基板上の標準パッケージコンポーネントに基づく設計でしたが、PS640 はそれとは異なります。新たな低誘電率の有機基板を採用し、フリップチップコンポーネントと

することで RF 性能を向上しながら、同時にスペースも削減できます。Teledyne e2v の SiP の組み立てサイズは 33 x 19 mm で、0.8 mm のボールピッチで接続、ノード数は全部で 799 個です。このモジュールについてはさらに、将来の製造標準をサポートするために、ボールとバンプの相互接続を RoHS 準拠とすることについても考慮しました。その結果、小さな 6.3 mm<sup>2</sup> のモジュールが、Ka バンドの直線変換を達成した業界初のモジュールになりました。完成品の写真を図 8 に示します。

Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020 年 11 月

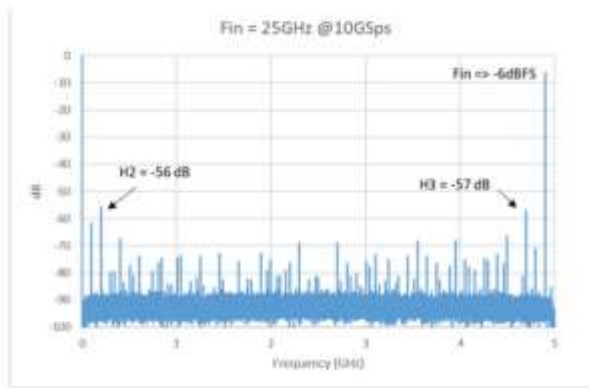


図7 - 25 GHz の連続波入力の場合の SFDR



図8 - PS640 マルチチップモジュール (MCM)

### Ka バンドのパズルを完成させる最後のピース

来年の終わりまでには、第 3 ステージのイノベーションの初期サンプルを準備する予定です。36 ヶ月以上にわたって集中的に注力した結果、量産可能な SiP とすることができました。第 2 世代のマイクロ波サンプラーも含まれます。このサンプラーは次世代の ADC コアと対になるものです。Teledyne e2v は、完全な機能セットについてはまだ明らかにしていません。一方で、ADC はいくつもの拡張を実装してコアタイム・インターリーブを改善し、様々な数値制御特性を提供することで、ソフト無線アプリケーション設計を簡素化しています。

最近の開発において注目したアーキテクチャと、Ka バンド機能への移行を決定づけた違いはこうです。つまり、Teledyne e2v がとった戦略が、差動アナログ信号とクロック線のバランスをとるのではなく、シングルエンド信号だったということです。この戦略をとったことで、大きな利点がありました。宇宙用として認証されたコンポーネントを見つけるのが難しく、適切なバランスを見つけるのが特に困難なことを Teledyne e2v も承知しています。また、そのようなコンポーネントは高価で、スペースを確保する必要も出てきます。ほとんどのマイクロ波発生源がシングルエンドであることを考慮すれば、これは非常に良いことです。

### セクション 4.5 - Ka バンド送信パスを開発中

Teledyne e2v の開発チームでは補完的な送信パスソリューションにも取り組んでいます。現在、合成 Ka バンド周波数発生をサポートするデュアル 12 ビット電流型 RF DAC を開発中です。実験室で測定したデバイスの代表的な広帯域出力電力のスペクトルを図 9 に示し

ます。

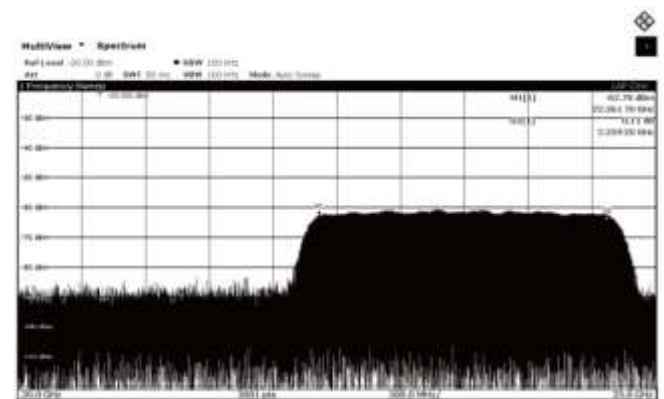


図9 - 2.26 GHz マルチトーン出力電力スペクトル ( $F_{clk} = 20 \text{ GSps}$ ) 2RF モード、4 倍補間、ASINC = ON

EV12DD700 は以下のような先進的な機能が多数含まれるため、送信側にかなりの柔軟性を持たせることができます。

- ・ 25 GHz における -3 dB のアナログ帯域幅
- ・ 2RF を含めた複数の出力モードにより、21 GHz 以上において、アップコンバージョンフリーの合成周波数プロジェクションが可能
- ・ デジタルビームフォーミング
- ・ プログラマブルな逆 sinc フィルタ
- ・ 非常に機敏な周波数ホッピングをサポートする、高速プログラマブル複素ミキサ
- ・ 32 ビット NCO を利用したデジタルアップコンバータ
- ・ Sync チェーンを介したマルチデバイス同期



広帯域データコンバータにより、宇宙での RF ソフトウェアリゼーションをサポートする独自の Ka バンドダイレクトアクセス・コンバージョンが可能に

2020 年 11 月



DAC により、-55 dBc 以上の SFDR が達成できます。さらに、マルチモードホッピングを含めた非常に機敏で高速な周波数ホッピングも (RTZ、連続およびコヒーレントモードも組み込んで) サポートします。これまでの Teledyne e2v の DAC ソリューションと同様、製

品は複数の出力コーディング・モード機能を搭載し、スペクトル合成信号帯域幅において必要に応じて出力電力特性を修正できるように設計されています。2RF モードでは、出力電力のピークが Ka バンドにわたって存在します (図 10 では緑色の破線で表示)。

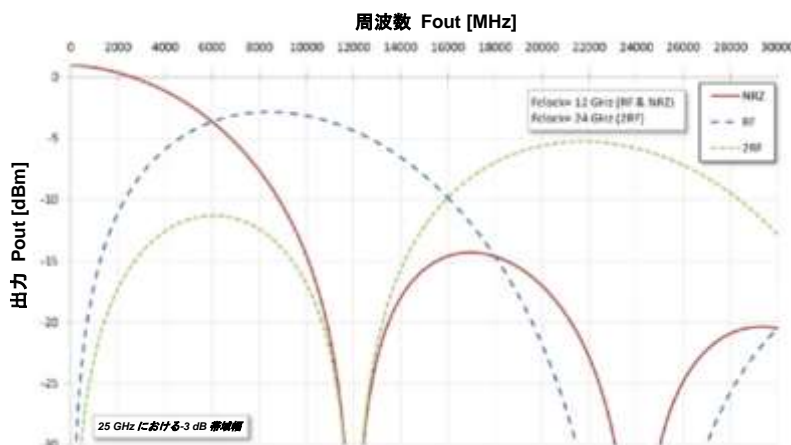


図 10 - 今後の EV12DD700 デュアル DAC における三つの出力特性シミュレーション

### 高速データ処理

最近のデータコンバータを使用する際には、高速シリアルデータ・ストリームの管理が問題になります。Teledyne e2v の製品では、ESIstream (ESI: 高効率シリアルインターフェイス) というオープンソースの 12 Gbps リンク技術を利用しています。このシリアル化プロトコルは最小のオーバーヘッドで設計され、シンプルなライセンスフリーの IP を FPGA 領域で提供します (例えば、Xilinx の Kintex Ultrascale および Virtex7、Intel の Arria 10 など)。

ESIstream プロトコルにより、線形帰還シフトレジスタ (LFSR) 周波数帯変換器を使用した 14b/16b エンコーダに基づくデータ効率は 87.5% となります。ディスペリティビットを追加することで DC バランスのとれた伝送が確保でき、トグルビットを追加することで同期モニタが可能になります。個別の同期信号 (SYNC) と受信側のシンプルな SYNC トリガによるカウンターによって、リンクはマルチデバイスの同期と決定論的レイテンシをサポートしています (図 11)。カウンターはユーザ定義の時間で ESIstream 受信 IP 出力バッファからデータを発出し、決定論的リンクレイテンシを確実にします。

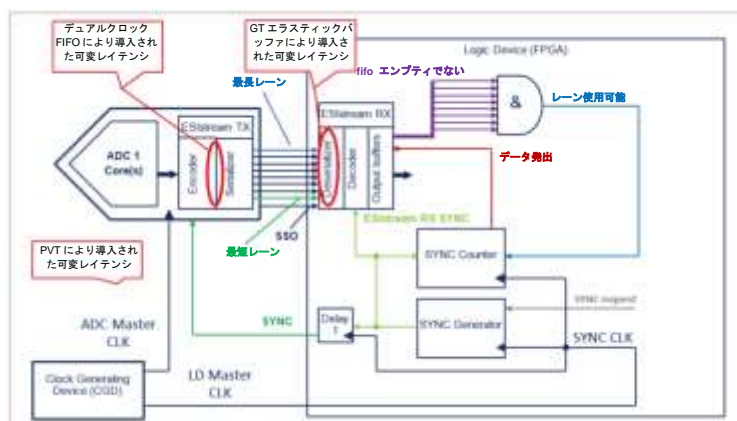


図 11 - ESIstream プロトコルでサポートされるシングル ADC の決定論的レイテンシ原理

# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020 年 11 月



## クリティカルなタイミングとサンプリングの同期の問題

現在、システムの性能向上のため、多くの無線アプリケーションでビームフォーミングが使われています。ビームフォーミングは信号の干渉を利用して信号電力を空間的に方向づけます。このようなシステムでは、全てのチャンネルを正確に同じタイミングでサンプリングする、同期サンプリングが必要になります。そして、信号の空間的（位相的）情報をアンテナアレイ全体で保持します。複雑になり電力も必要になるという欠点はあるものの、様々な利点もあります。

- ・チャンネルの信号対ノイズ比（SNR）が高く、無線リンクのバジェットが高くなり、信号のレンジも広がります（または必要な送信電力が低減できます）。
- ・干渉エネルギーが特定の方向から来るため、ビームフォーミング・アルゴリズムでは信号無効化を利用して干渉を制限あるいは低減します。

しかし、ギガヘルツ周波数での動作では、IC デバイスでも基板レベルでも、信号伝搬時間が重要な要因となります。プリント回路基板（PCB）の配線は伝送ラインとして機能するため、位相情報を保持するには信号配線長を整合させることが重要です。クロック周期が 166 ps（6 GHz クロック）の場合、たった一センチの配線で 60 から 75 ps の信号伝搬時間が加わります。そのため、設計では基板配線の影響は大きく、プリント回路基板配置がマイクロ波システムで重要な成功要因である理由が見えてきます。

しかし、優れた設計を妨げる要因がデジタルドメインで発生します。それはメタステーブル（準安定）といい、デジタルシステムにおける不確定な状態です。クロック周波数が上がると、メタステーブルなイベントが発生し、システムのタイミングが合わなくなる可能性が大きくなります。同期をとる方式によってはメタステーブル状態に対抗することができます。まさにその場面において、Teledyne e2v の SYNC チェーンが設計者の助けになるのです。

メタステーブルな状態に直面した際の決定論的操作は、代替アプローチでは難しいことが多いです。JEDEC JESD204B サブクラス 1 アプローチは、きちんと機能させるという課題を考えると、設計者に与えた印象は良いとは言えません。しかし Teledyne e2v は、堅牢で復元力のある同期が実現しました。これは SYNC 信号を用いて全てのデバイスでマスタークロックを再調整するものです。決定論的同期は、イベントドリブンの差動電気信号のペア、同期および同期出力（SYNC お

よび SYNC) によって達成されます。その間では、これらの信号によって、目的のデバイスのローカルなタイミングがリセットされ、さらに全てのデジタルサブシステムが基準マスタークロックに適切にロックされます。加えて、大規模なマルチチャンネルシステム全体にある複数のデバイスにまで、同期を拡大することもできます。

SYNC チェーンには以下のような利点があります。

- ・比較的シンプルであり、クロックを追加せずに多数の並行チャンネルを、システムに保証された寿命期間にわたって同期することができます。
- ・1回のトレーニングサイクルで、システムの同期を確立できます。
- ・環境条件（P、V、T）が変化したとしても、タイミングのパラメータは同じものを使用できます。

SYNC チェーンにより、堅固なシステム全体の同期ソースが与えられます。

## 新たな高性能パッケージと相互接続アプローチ

パッケージ技術は、マイクロ波システム設計において技術を要する「ブラック・アート」の一つとして際立っていますが、それには理由があります。全ての半導体はパッケージにより機械的強度を保持しています。パッケージによって半導体ダイが直接、環境に触れないようにしているのです。電力消費が多くなり、また多くの場合、複雑な設計によって多数の相互接続ノードをサポートします。

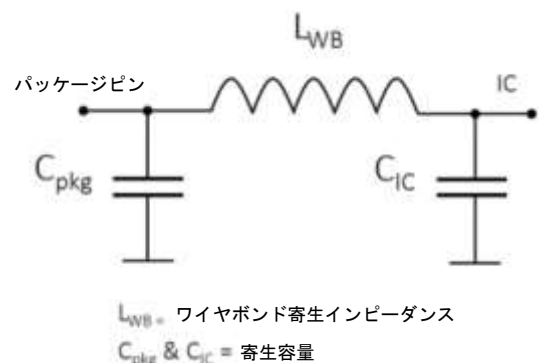


図 12 - パッケージピンと IC 接続の集中定数回路モデル

# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020年11月



マイクロ波 IC の場合、性能を最適化するには追加した分の寸法が重要で、これはパッケージに存在する寄生成分に依存します。寄生成分とは、パッケージに起因する非理想的な電気回路素子のことで、個々のパッケージ素材特性において発生します。マイクロ波周波数での代表的な寄生成分としては、リードフレームとダイとを接続するワイヤボンディング特性や、PC 基板とパッケージのコネクタとの間の素材の切れ目などが挙げられます。IC 接続部を検査する際には、相互接続を表すのに、図 12 に示す集中定数回路モデルという単純化し

た電気回路モデルを使用します。このダイアグラムをみると、寄生成分から生じたインピーダンスの差が強調されており、信号周波数が上昇した際のインピーダンス整合の必要性も強調されています。従って、パッケージ素材の選択が重要な役割を果たします。これまでの多くのマイクロ波 IC では、低温同時焼成セラミクス (LTCC) 基板が用いられてきました。しかし、Ka バンドに適用するには、図 13 で強調しているように、主な電気部品を高速な有機基板に移行する必要があります。

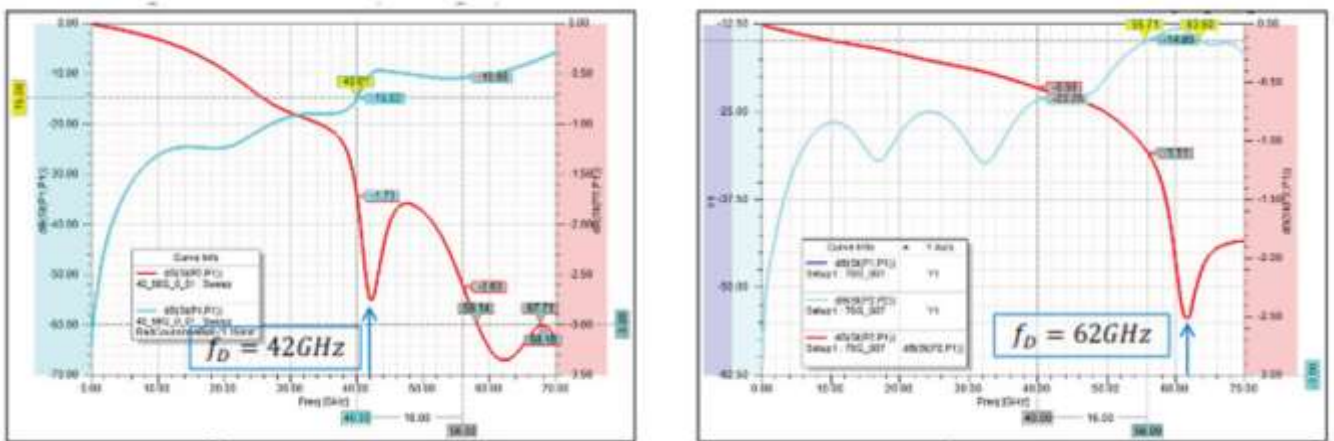


図 13 - セラミック (LHS) および有機基板 (RHS) の周波数特性が示す、有機基板への移行の必要性

製品開発フローには、パッケージ・ストリップライン設計の詳細な有限要素解析も含まれていました。高周波構造シミュレーション (HFSS) で、基板とパッケージとシリコンの接合部の電磁プロファイルをシミュレーションし、デバイスの電気部品を最適化します。この解析では、波は PCB (左下) からんだボール (PCB とパッケージの境界) へと伝搬し、さらにビアを介し

て IC 基板へと伝搬してから、バンプを介して (すなわち、パッケージとフリップした IC の境界) シリコンに到達します。その後、適切な HF 信号コネクタによって、65 GHz の周波数までの特性を実験的に検証しました。



# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020年11月



## 近未来の分散型ソフトウェア無線設計の展望

上述した（セクション 3.1）技術の分裂を考慮すると、新たなアーキテクチャのアプローチが必要になります。現在、最新のダイレクト・アクセス Ka バンド対応の量子化器には、図 14 に示すように、現在の設計パラダイムの自然な進化が反映されています。図に示したのは、RF データ収集コンポーネントと、FPGA 信号処理を組み合わせたものです。各素子はそれぞれのタスクに最適なプロセス技術を選択し、利用してきました。このように、結果として得られる高密度の SiP はより小型になり、コストやデバイスのフットプリントが最小限に押さえられます。

1. 集中/モジュール (MCM) アーキテクチャ

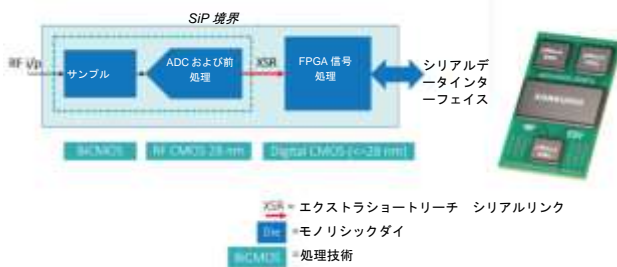


図 14 - モジュール式 Ka バンド量子化器と、Teledyne e2v による RF フロントエンド SiP ソリューションの例 (右側)

シリコンフォトニクスは、新たに強化された設計パラダイムを告げるものです。このパラダイムは、システムへの互換性のあるより本質的なデジタルアプローチを衛星無線アーキテクチャに適合させます。光インターコネクトシステムは光インターネットワーキ

ングフォーラム<sup>6</sup> (Optical Internetworking Forum、OIF) によって既に体系化されており、6~56 Gbps のシリアル化相互接続をカバーする実装に関して合意しています。これにより、完全分散型無線アーキテクチャ（図 15）が可能になります。このアーキテクチャでは超広帯域デジタルコンバータがアンテナと同じ場所に配置され、デジタルデータはファイバーを介して中央処理装置に伝送されて利用されます。複雑なアルゴリズムのビームフォーミングを促進させるだけでなく、設計の自由度を高め、軽量化を実現します。さらに、信号の歪み、ノイズ、クロストークなどの厄介な電子的な問題に対しても有効です。

2. 将来の分散型アーキテクチャ

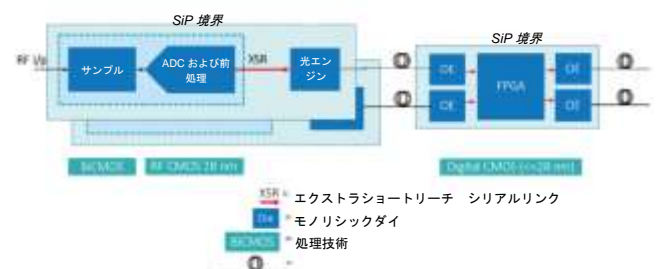


図 15 - 将来の分散型アーキテクチャでは、軽量化を実現しアーキテクチャ上の自由度を向上させるため、シリコンフォトニクスを利用

<sup>6</sup> 「OIF-CEI-56 G プロジェクト」出典：OIF 2015年9月

## SoftSats への準備は万全ですか？

この記事では SoftSats について説明しました。SoftSats は多用途のソフトウェア定義宇宙プラットフォームです。単一のミッションにしか対応しない高コストの従来型衛星とは一線を画すもので、より高度なオプションの実現を今後 10 年で目指します。そのためエンジンとなるものは二つあります。最先端のデータ変換、そして信号処理用の半導体です。

SoftSats は、物理層の無線インタフェース用のソフトウェア無線と、マルチミッションで無線 (OTA) の再構成が可能なペイロードとを組み合わせたものです。現在の市場の流れを考慮すると、このように移行していくのは明らかです。この要求は商業的にも技術的にも実行可能な直接アクセスの Ka バンド・ソフトウェア無線でサポートされています。この技術は新たなクラスの広帯域データコンバータにより強化されています。

# Ka バンドまでのダイレクトアクセスが可能な Teledyne e2v のデータコンバータを使用した、RF ソフトウェアリゼーションを提案します

2020年11月



この要求は商業的にも技術的にも実行可能なダイレクト・アクセスの Ka バンドソフトウェア無線でサポートされています。この技術は新たなクラスの広帯域データコンバータにより強化されています。レビューにあるように、Teledyne e2v では戦略的な開発により、受信、送信双方の信号パスに取り組んでいます。今後12~18ヶ月の間にその成果がみられるでしょう。当面は、既に行っているように、ライブデモンストレーションにより最新の機能を紹介し、この計画が商業的・技術的にどの程度の可能性をもったものなのか、その証拠を示していきます。

## SoftSats への架け橋は軌道に乗ったのでしょうか？

ESA の OPS-SAT は、重さ 7 kg で 3U のキューブサットです。515 km の軌道を周回し、「宇宙のソフトウェア実験室」と呼ばれており、ソフトウェア定義無線とデュアルコア ARM cortex A9 へのアクセスを提供します。設計者によると、活動中の衛星ではリスクが高くて評価することのできない、たとえば画期的な制御システムやソフトウェアであっても、OPS-SAT はそうしたシステムやソフトウェアを軌道上でデモンストレーションできるとのことです。100社以上のヨーロッパの企業や機関がこのプラットフォームの実験プロジェクトプランに署名しています。

様々な業界の努力により、SoftSat ビジョンの実現を支える研究が継続しています。SoftSat の概念の多くの要素で、今もミッションの検証が行われています。このことは筆者にとって大きな励みです。注目すべきプロ

ジェクトの一つは、2019年12月に打ち上げられた欧州宇宙機関 (ESA) の OPS-SAT です (囲み内参照)。この他、並行して進んでいる業界での開発により、SoftSat ビジョンが明確に意味づけられています。さらなる高性能デジタル処理を実現することも要求されます。ありがたいことに、地上での課題への挑戦に支えられ、プロセッサは急速に進化しています。例えば、重要な画像認識とセンサーデータ融合という課題を考えてみます。この二つの課題は、自動運転ソリューションの開発者が人工知能 (AI) の急速な発展に伴って直面している問題でもあります。

SoftSats のもう一つのキーコンポーネントは、高い効率性や SWaP (サイズ、重量、電力) の小さい半導体電力増幅器技術といった点で、より優れています。現在、Advantech や Tesat などの企業がこうしたソリューションを開発中で、新世代の窒化ガリウム (GaN) デバイスへと舵を切っています。

宇宙プロジェクトには依然としてリスクがありますが、イノベーションへの関心はますます高まっています。このことから、今が RF ソフトウェアリゼーション技術や SoftSat の概念が開発計画の変更にもどの程度影響するのかを評価する好機であると言えます。今日では、動きが遅い企業は機敏な起業家に追い越されてしまうということが現実的なリスクとなっています。SoftSat パラダイムに早期に適応したものが、最も市場の恩恵を受けることになるのです。ダイレクト・アクセス Ka バンド技術にステップアップする時期がきたのです



お問い合わせはこちら：

**Marc Stackler,**  
アプリケーションエンジニア  
シグナルプロセッシングソリューション  
[Marc.stackler@teledyne.com](mailto:Marc.stackler@teledyne.com)



お問い合わせはこちら：

**Yuki Chan,**  
マーケティング&コミュニケーション  
マネージャー  
[Yuki.chan@teledyne.com](mailto:Yuki.chan@teledyne.com)

