



はじめに

ここ数十年で無線技術の標準化が進みアプリケーションが増えるとともに、接続されるデバイスも爆発的に増加し、データ帯域とスループットへの要求がかつてないほどの高まりをみせています。簡単に言えば、革命的なモノのインターネット(IoT)の広がりにより45億人ものユーザがインターネットに接続され、現在の需要曲線は年間25%以上の需要増を見せており¹、ますますひっ迫する状況になっているのです。世界で在宅勤務へと切り替わりつつある現状を踏まえ、地上でも宇宙でも通信において重要となるインフラストラクチャの試験が進行中です。

率直に言いますと、無線周波数スペクトル空間は枯渇しつつあり現在の需要には対応しきれなくなってきました。つまり、現代の通信ネットワーク計画にはデータフローを保つためのよりスマートな方法が必要だということです。貴重なRF領域のスペクトルを分割して再利用し、最大限活用するのです。この実現に向けて、将来を見越したインフラストラクチャのバックボーンの再構築がここ数年で始まっています。

**現在、インターネット・トラフィックは年平均成長率(CAGR)が25%を超えており、2020年には月間200 EB超(エクザバイト = 10^{18} バイトあるいは 10^6 テラバイト)、2022年にはさらに増加して年間4.2 ZB(ゼタバイト)に達する見込みです。
(情報源: Cisco 2019)**

この記事では、将来の電子データ通信を具現化するキーテクノロジー、ソフトウェア技術について検討します。ソフトウェア定義の無線サブシステムやソフトウェア定義ネットワーク(SDR/SDN)において影響が大きいからです。現代では、最大のシステム効率、最適化された利用、そしてダイナミックな機敏性を得るため、システムのハードウェアを仮想化し、人工知能を極限まで活用して複雑な操作を調整していくことが検討されています。まるでSFのように思われるかもしれませんが、実はこの技術はすぐそばまで来ているのです。

ワイヤレスネットワークは非常に複雑になり、これまでのアプローチ、例えば設計時の利用計画を維持し続

けたり画一的な戦略を採用したりしては、最適化が不可能です。代わりに求められるのは、より知的で洗練された技術です。コグニティブ無線(CR)はその一例です。無線によりネットワークの動的挙動を監視できるため、様々な用途の要求をセンシングし、自動的に物理層パラメータを変更してネットワーク性能およびサービスの質(QoS)を最大化します。多くの場合、同じワイヤレスチャンネルやスペクトル帯域を異なる用途に使用していることが、拡大するQoS標準を同時に満たすことを困難にしています。現在の基本的な制御構造では、レイテンシ、スループット、信頼性や弾力性といった機能に対する極端な要求に同時に対応することは非常に難しいのです。特に、データレートの高低、タイムクリティカルな信号とそうでない信号など、通信に対するニーズが多岐にわたる状況には対応しきれません。

そこでソリューションとなるのが、ソフトウェアリゼーション・アプローチです。ソフトウェアリゼーションは比較的新しい用語で、これまではハードウェアの進化で対応してきた通信の諸問題に対し、アルゴリズムによるアプローチを採用します。その実現のため、今後システムはより仮想化され、数値制御されていくと思われま

ではソフトウェアリゼーションは、ネットワーク設計や計画にどのような影響を与えるのでしょうか。それは次のような場合です。

- ・SDR(ソフトウェア無線): コグニティブ無線の技術と合わせることで、変調、エラー訂正、搬送波周波数、チャンネル帯域幅もソフトウェアにより制御可能になり、動的な運用プロファイルに対応します。SDRの性能は、ビームフォーミング、フェーズドアレイアンテナ、高速な搬送波周波数ホッピングを配備することにより、さらに拡張可能です。
- ・SDN(ソフトウェア定義型ネットワーク): コントロールプレーンおよびデータプレーンのハードウェアを互いに切り離し、制御を集約してインフラストラクチャをアプリケーションから解放します。

¹ Cisco Systems のデータより



ソフトウェアリゼーションへの原動力

EU(欧州連合)の「ホライズン 2020 プログラム」は、次世代インターネット(NGI)に関連する問題について予測し、ネットワーク 2020 のドキュメント「[NGI](#)におけるスマートネットワーク²⁾」にまとめました。2018年後半に発行されたこのドキュメントでは、主にソフトウェアリゼーションを基盤に構築された次世代ネットワークの多様な課題について、特に SDR および SDN の観点から述べています。

研究開発領域についても概観し、現状のネットワーク・インフラストラクチャを丁寧に解説しています。今日の課題の多くは、エンジニアに限らず一般の人にもよく知られているように、データのセキュリティや個人のプライバシーなどの問題です。ネットワーク接続機器が劇的に増加している中では、サービス・スケジュールの調整はあまり目立たない課題です。このネットワーク接続機器の劇的な増加は、これはインダストリー4.0 をけん引する「モノのインターネット(IoT)」の影響によるものです。

ネットワーク基盤では、非常に複雑な状況が発生しています。サポートされるアプリケーションの複雑さ、莫大なデータ量、そして通信量の増加による容量スケーリングの要求、通信技術の多様化(無線標準、光接続、衛星通信など)に対する課題があります。そして、多くの関連業者やサービスプロバイダのサポートが必要になります。必然的に、人工知能や機械学習ソリューションを活用して全てを統合し、この先進的な装置を調整していくことが必要になります。クラウド、フォグ、エッジコンピューティングのリソースが協調的に動作するように、データに対して集中型および分散型のアプローチを同時に最大限活用するというストーリーです。

より機敏性のある RF 処理へ

フランスのグルノーブルに事業拠点を置く Teledyne e2v は、マイクロ波分野を専門としています。当社は初期の軍事用レーダー配備システムの時代から、この分野でビジネスを展開しています。進行波管やサイラトロン設計に始まり、70 年以上にわたる実績があります。

無線周波数(RF)ソフトウェアリゼーションとは

ソフトウェアリゼーションとは標記のように、無線通信チャンネルあるいはシステムを、アプリケーションのアルゴリズムを通してプログラマブルな、あるいは再構成可能な特性へと展開していくことです。このような無線は、ソフトウェア定義型(SDR)あるいはコグニティブ無線(CR)など呼ばれます。ローカルな RF 環境を検査し、その後にそれ自体の物理層特性(搬送波周波数、変調モードなど)の設定をして、利用可能なスペクトル容量を最大限活用できるようにします。

ここ十年間、デジタル電子技術は格段に進歩しています。最新の 5G モバイル無線端末に代表されるように、非常に複雑で機敏性のある無線システムが消費者向けの高度なサービスとして広がってきました。しかし、ネットワーク計画や制御に限って言えば相当な尽力が無い限り将来の通信インフラストラクチャのスムーズな運用を編成していくのは困難です。身近な自販機の補充要求から非常にダイナミックな自動運転や交通管理システムに至るまで、クリティカルなデータをマシン間(M2M)ネットワークでやり取りする必要があることから、スループットやレイテンシに対するプレッシャーが増加しています。

当社では、1995 年から機敏で拡張性のある無線活用が始まり、アナログ-デジタル変換(ADC)およびデジタル-アナログ変換(DAC)用 IC による初期の広帯域データコンバータを開発するなどして貢献してきました。

²⁾ [NGIにおけるスマートネットワーク\(2018\)](#)
欧州技術プラットフォームネットワーク 2020



私達の供給しているデバイスは、高周波のアナログ RF 信号を直接ダウンコンバートまたはアップコンバートによりデジタルドメインに入出力できます。数値制御された RF 無線システムを実現する重要なコンポーネントであり、柔軟な制御により次世代通信インフラストラクチャを後押しします。

ソフトウェアリゼーションや数値制御の根拠にあるもの

無線通信システムは、使用する搬送波周波数、データ(あるいは情報の)信号に合わせて行う変調(あるいはミキシング)方式が重要になります。私たちのデータコンバータは、信号周波数を AD コンバータでサンプリングし、デジタル信号を連続的に供給します。ここから、得られた情報をデジタル信号プロセッサ(DSP)内で抽出します。DA コンバータは無線信号の生成に使われ、規定された合成 RF 信号スペクトルを生成します。また、信号電力を特定のチャンネル内およびチャンネル間で収まるよう調整することができます。

現在のヘテロダイン方式の無線設計では、信号エネルギーを無線スペクトル帯域内およびデータ変換のベースバンド周波数域に収めるため、中間周波数段階が必要となります。このような中間周波数段階には、局部

周波数発振器とのミキシング回路が必要です。従って、設定や校正のほか、コストや設計の複雑さが課題となります。しかし、半導体デバイスの速度(すなわちトランジスタのスイッチング・スピード)も上がっており、中間アナログミキサ段階やさまざまな局部発振器の必要性がなくなり、直接ネイティブな信号帯域とのデジタル変換ができるようになります。ナイキストサンプリングの AD コンバータを用いて直接 RF 変換することで、正確でミキサなしのチャンネル選択(チューニング)が可能になります。さらに、デジタル信号プロセッサ内で広範囲のデータのデコードや復調方式が数値的に利用可能になるという付加的な利点もあります。

システムの送信側でも同様です。現状の広帯域 DA コンバータでは、信号エネルギーをマイクロ波周波数に収めることができます。コンバータにより数値制御が可能になり、通信インフラストラクチャにプログラマビリティと柔軟性をもたらします。このような知的で柔軟な無線により、ダイナミックに調整できる物理層が実現されます。また無線システムを、容量面での短時間なスパイクへの対処や、様々な異なる運用モードの実現へと目的を変えて使うこともできます。

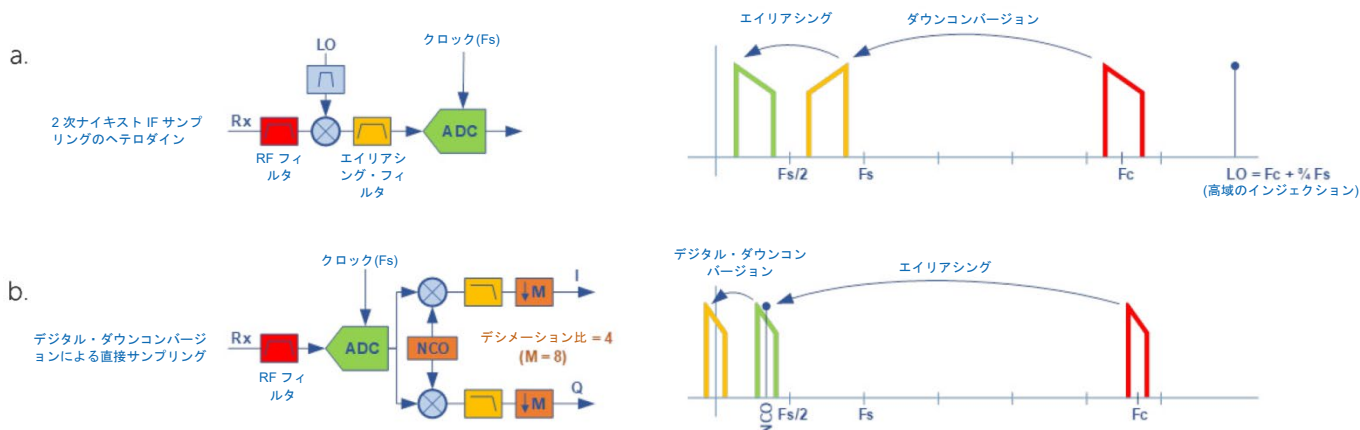


図1-単純化したRx信号チェーン: a) ミキサー・ダウンコンバージョンによる従来のシングルステージ・ヘテロダイン型無線、b) ADコンバータ内でのサンプル信号エイリアシングを利用した直接変換システム



数値演算により拡張される現代の通信システムの機敏性と柔軟性

これまで、サンプリング理論、フーリエ変換、畳み込みなどの数学理論により、通信システムの設計は強化されてきました。無線システムでデータコンバータを使用する場合、興味深い挙動や利点がみられます。

信号経路設計におけるコンバータやデジタル信号プロセッシングの影響は、図 1 に示すように明確です。現在のヘテロダイン設計(図 1a)では、アナログミキサが受信信号をダウンコンバートしてADCの2次ナイキストゾーン内に落とし込みます。これがSDRの第一段階になります。変調した「直接RFアクセス」アーキテク

チャ(図 1b)では、ADコンバータが信号エイリアシングをこの最初のダウンコンバージョンステップで利用します。最終的なADコンバータ後のダウンコンバージョンでは、DSP内で異なるデジタル数値制御発振器(NCO)を使用し、特定の搬送信号にロックします。

最終的には、このスケーラブルな数値アプローチにより、柔軟性の高い受信システムでデジタル・ドメイン変数が規定する多数のチャンネルを管理できます(図 2)。従って、コグニティブ無線を促進する道がはっきり見えているのです。

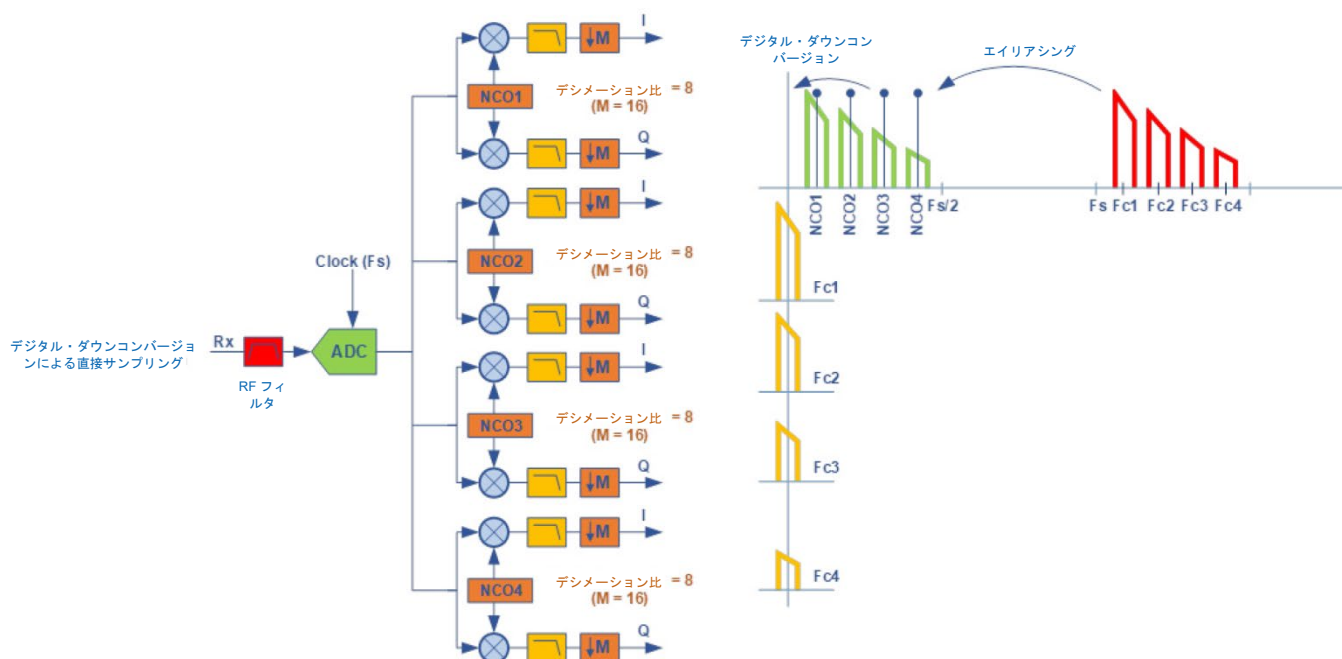


図 2-図に示すように、拡張 SDR では数値制御発振器が別々のいくつかのチャンネルに同調可能です。

受信経路の RF サブ・サンプリング

サンプリングによりデジタル化したシステムでは、ナイキスト・シャノンの標準化定理より、アナログ→デジタル変換の際、デジタルドメインで元の信号の帯域幅 B の 2 倍のレート ($2B$) でサンプリングすれば完全に復元可能になります。さらにバンドパス・フィルタを

適用すると、サブサンプリングを使用することで、高ナイキストゾーンにおける RF 信号を AD コンバータの帯域「幅」を超えて直接ベースバンドスペクトル範囲内にダウンミックスできます(図 2)。サブ・サンプリングには AD コンバータの手前のトラックホールド増幅器 (TH) を使用します。



THは周波数コンバータとして機能し、適用されたRF信号を「フォールディング」します。この場合は、20~22.5 GHzを、ADコンバータのベースバンド帯域(1次ナイキストゾーン(NZ1)、すなわち0~2.5 GHz)に折り返します。こうして中間周波数生成回路(局部発振器やIFなど)を省くことで構成をかなりスリム化でき、アナログ信号経路設計が容易になります(図3)。



図3-受信経路TH($f_s = 5$ GHz)、2.5 GHz帯域信号のサブ・サンプリング(搬送波21.25 GHz)

これが数値制御による無線システムを実現する基本設計段階となります。以前発行したEV12AQ600のコンビネーションの資料³に既述したように、6 GspsのADCを広帯域THと組み合わせることでKバンド内の信号のサブサンプリングが可能になります。

伝送経路のマルチ・ナイキストゾーン周波数合成

送信側では、従来のヘテロダイン無線伝送DAコンバータにより1次ナイキストゾーン(NZ1)において出力信号電力が供給されます。エイリアス信号電力はローパスフィルタでカットされます。しかし、送信DAコンバータ(TxDAC)がより高次のナイキストゾーンにも信号電力を十分に供給できる場合にはどうなるでしょうか。この場合、図4に示すように、バンドパスフィルタにより対象とする周波数を選択できます。

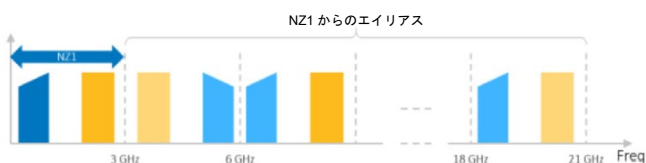


図4-NZ1で生成され高次のナイキストゾーンにエイリアシングされた合成RF信号($f_s = 6$ GHz)

例えば、EV12DS480 TxDACを使用すると、信号電力は26.5 GHzまで対応でき、8.5 Gspsのレートでのサンプリングが可能になります。

ADコンバータのサブ・サンプリングとDAコンバータのマルチ・ナイキストゾーン周波数合成はRF数値制御において重要な要素であり、Teledyne e2vでは次世代の無線設計をさらに強化するためにサポートしていきます。

Kaバンドにおけるイノベーションの推進力

EU(欧州連合)の「ホライズン2020」研究対象プロジェクトの一つである星間探査プログラムでは、RF信号チェーンを簡素化する新たな広帯域データコンバータの開発や、Kaバンドにおける直接変換技術を推進しています。このビジョンでは、コンポーネントの目的の一つにより大きなシステムの統合があります。つまり、RFチャンネル密度の拡大、消費電力の低減、帯域幅の拡大、動的性能の改善を図りつつ、欧州の宇宙ビジネスを強化します。プロジェクトではいくつかの壮大な目標を達成することが期待されています。進化した遠隔通信インフラストラクチャや拡張した地球観測(EO)性能などがその例です。

星間探査は、Teledyne e2vが新たなデータコンバータを開発する原動力となっています。これと並行して、Teledyne e2vではアナログフロントエンド(AFE)デモンストレータを試作しています。これはマイクロ波周波数のサンプリング帯域を飛躍的に拡張し、マイクロ波直接デジタル・ダウンコンバージョンと周波数合成の一新を実現するものです。

プロトタイプ的目標仕様

- ・ Kaバンドの入力帯域幅における高性能アナログサンプラー
- ・ Kaバンドにおける高いスプリアスフリー・ダイナミックレンジ
- ・ シングルエンド入力信号経路(バランフリー設計)
- ・ 高いコード効率、ESIstream シリアルデジタルインターフェース
- ・ 同期チェーン機能を含む強力なクロック制御により、ビームフォーミング用として位相整合したマルチチャンネルの簡易なスケールアップが可能

³ Teledyne e2v ホワイトペーパー、2019年12月発行：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

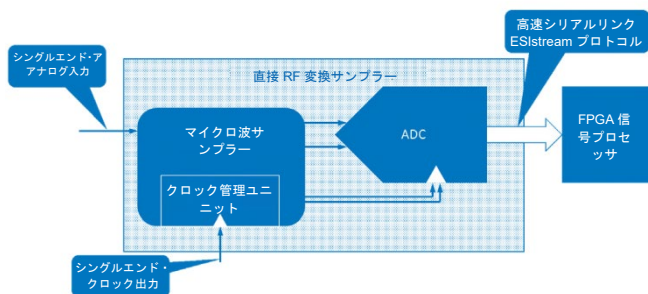


図5-直接変換 RF サンプラーのプロトタイプ

直接変換 RF サンプラー(図5)については、2020 年末にむけて明らかになる予定ですが、マイクロ波 Ka バンド (26.5~40 GHz)において-3dB の帯域幅のアナログ入力を実現する見込みです。プロトタイプではこの卓越した帯域幅を超え、いくつかの独特の特性により、デバイスを実際のシステムに「簡単に実装」することができます。この製品には次の特徴があります。

- ・ シングルエンド・アナログ入力により、PC ボード設計やレイアウトを簡素化
- ・ (比較的)高価で場所をとる HF バランを使用しないため、以下の2点を両立
 - より経済的なマイクロ波直接デジタルサンプリング
 - アナログ信号サンプラー内の信号の歪みを最小限に抑制
- ・ 独自のマイクロ波サンプラーとジッタを抑えたクロック管理
- ・ このアナログフロントエンド(AFE)の出力側におけるLVDSを回避し、多くの既製FPGA(XilinxのKU60シリーズなど)と互換性のあるライセンスフリーのESIstreamプロトコルを使用した高速シリアルインターフェイスシステムを利用

星間探査により、次世代 TxDAC 開発が進み、K バンド以上でもマルチナイキスト RF 性能を有する EV12DD700 が開発されました。デバイスは複数のユーザ定義出力データモードを伝送します。これには特殊な「デュアル RF」モードも含まれており、信号出力性能を既存の EV12DS480 に比べて飛躍的に拡大します。この最新のコンバータは 8 Gsps 以上でのサンプリングが可能で、デジタル数値制御と合わせて柔軟性の高い変換を実現します。

モジュール化され機敏性を増したマイクロ波 SDRS により設計の制限が緩和

入力信号の簡素化

複雑なマイクロ波 RF システムにおいて、クロストークや EMI 感受性を最小限に抑えることは、言うまでもなく設計の最大の難関です。このため、ハイエンドなデータコンバータの多くは、差動バランス信号を使用して信号およびクロック入力を送信します。スムーズな運用能力からこれが現在のスタンダードとなっていますが、欠点もあります。差動回路設計は二重に手間がかかるのです。

- ・ 各 ADC 入力は通常シングルエンドソースです。例えば RF アンテナ信号が同軸ケーブルを經由してレシーバに伝送されます。この信号処理のため、差動回路では各入力(マイクロ波サンプラーと ADC)にバランを取り付けてシステムのインピーダンスを整合させる必要があります。このようなコンポーネントには、PCB 上の実装スペースが必要になり、特に Ka バンドで運用する設計においてはコストアップにつながります。
- ・ 差動設計における高速クロックエッジの処理には、PCB のパターン配線の長さを厳密に調整する必要があり、設計が非常に複雑になります。入力ステージへのシングルエンド接続により、レシーバステージでの信号位相の誤差累積を最小限に抑えるか、あるいは完全になくすることができます。

拡張したコンパクトなデジタル・データの接続

データコンバータのデジタル・データの接続に関しては、この数十年間で市場に急速な動きがありました。別々のデータクロックを備えた多重差動シリアル LVDS データラインから、クロックを組み込んだ超高速送受信機を使用するシリアルリンクへの移行です。JESD204 に代表される多重生成による実行か、あるいはライセンスフリーの ESIstream かということですが、どちらも 12 Gbps 以上のデータレートをサポートしています。

信号プロトコルを使用すれば、システムの実装において銅配線から光配線による物理層に変更することでチャンネル密度を上げられることがすぐにわかります。このような場合、デシメーションと補間技術により必要な伝送レーン数を低減できます。



信号位相情報をサンプルクロック精度で管理

サンプルクロック周波数が上昇すると、特にビームフォーミングのマイクロ波無線システムにおいては、必然的にサンプルエッジがシステム全体に適用されることとなります。信号サンプルの位相精度はシステム全体の空間測定の精度に関わるため、非常に重要です。例えば精密な合成開口 EO レーダシステムなどにおいて、重要な要因となります。

Teledyne e2v 社独自の同期チェーン^{4,5}は、同期信号の準安定性に起因するこの問題を、比較的低速なパルスエッジを使用して複数のコンバータを同じ精度のサンプルクロックに固定することで解決します。大量のチャネルを同時に使用することが可能になり、フェーズドアレイや MIMO など、大規模に展開する RF システムの位相整合が大幅に簡素化されます。

結論 - よりアンテナに近くなる、より高密度なモジュール

以上のように、本プロジェクトの目的は、星間探査プロジェクトのビジョンや市場の要求からもたらされた広帯域製品のポートフォリオにおいて、サンプリング帯域幅や技術的な性能を劇的に拡大することにあります。直接変換技術によるマイクロ波 Ka バンドへの変換は、意義のある挑戦的な目標です。しかし、あらかじめ分配しておくことでうまくいくことがわかっており、独立したコンポーネントを使用して直接 K バンドを取

り扱うことで、経済的に実用化することができます。また、放射線のトータルドーズ耐性など、宇宙におけるオペレーションで要求されるような高信頼性を確保するシステムに向けて、この目標は達成しようと強調することが重要です。

エンジニアリングにおける難題への取り組みが進んでいる中、Teledyne e2v は近い将来、高度に拡大可能なシステム・イン・パッケージ(SiPs)データコンバータモジュール、つまりマルチ入出力 ADC/DAC をマイクロ波サンプラーと組み合わせクロック管理と連動させたものがより高密度になり、よりアンテナの近くに配置されると予測しています。このことによって超広帯域 CR が現実になり、より機敏性のある無線インフラストラクチャの課題は少なくとも物理層においては大部分が解決されます。SDR は柔軟な SDN の中で重要な位置を占めるでしょう。

本プロジェクトの重要な技術ポイントは「極秘事項」ですが、心待ちにする人も多くいます。いくつかの主要な技術が今年第 4 四半期に発表される見込みですが、現時点で対処すべき課題をお持ちで、本開発プロジェクトのより詳しい情報を必要とされる場合は、Teledyne e2v まで直接お問い合わせください。予備的なデータがすでにありますので、機密保持契約を締結していただいた上で、ご覧頂くことができます。

⁴ Teledyne e2v 技術文書、2019年3月：[シンクロナイゼーションチェーン：GHz データコンバータにおけるマルチチャネルの簡素化](#)

⁵ Teledyne e2v ビデオ：[たった7分間でマルチ ADC シンクロナイゼーションを学びましょう！](#)



お問い合わせはこちら：
ロメイン・ピラード
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
romain.pilard@teledyne.com



お問い合わせはこちら：
ジェーン・ロホウ
マーケティング&コミュニケーションマネージャー
jane.rohou@teledyne.com

