

# 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

2019 年 12 月



## はじめに

インターネットユーザーやネットに接続する IoT 機器が増え続け、デジタルコンテンツであふれかえる世の中。ネットワーク通信に要求される容量も際限なく増え続けています。これを受け、マイクロ波サンプリングの限界を探究している当社では、実験セットアップのデモンストレーションを先ごろ実施しました。

これは、K バンドからのダイレクト・デジタル・ダウンコンバートを実現するものです。このプロジェクトは、今年の [ESA MTT ワークショップ](#) で紹介した、広帯域 DAC の [EV12DS480](#) による K バンドダイレクト・デジタル・シンセシスについての研究に続くものです。こちらの研究は、[技術資料<sup>1</sup>](#) や [最近のウェビナー<sup>2</sup>](#) で文書化されています。

## プロジェクトの目的

このプロジェクトでは、24GHz アナログ・フロントエンドの構築を目的としています。これにより、K バンド（周波数 18~27GHz）のマイクロ波のダイレクト・サンプリングが可能になります。実験にあたり、50dBc を超えるスプリアスフリーダイナミックレンジ (SFDR) を得ることを目指しました。

このマイクロ波フロントエンドボード (FEB) は、Teledyne の 2 つのグループ会社 (Teledyne Scientific 社と Teledyne e2v 社) がそれぞれ別々に開発した既存の 2 つのギガヘルツ高速コンポーネントを組み合わせて開発されています。ラボでの評価は、12 ビット広帯域データコンバータ EV12AQ600 と UHF 帯デュアルトラックアンドホールド回路増幅器 (THA) [RTH120](#) を組み合わせた、高性能 FEB で実施しました。

データコンバータは 6.4Gsps までのサンプリングが可能で、フルパワーでの入力信号帯域幅は 6.5GHz です。トラックアンドホールド回路は線型性に優れ、24GHz という広い帯域幅を持つ回路です。このため、ナイキストの法則を適用してサンプリング周波数を適切に選択することで、K バンドの信号を直接ベースバンドにダウンコンバートできるのです。その際、ダウンコンバート用に別の回路を付加することなく、ADC を使用して必要な信号を取得できます。ソフトウェア無線の基本理念に基づいて迅速な RF 設計を可能にしながら、簡

潔で電力消費も抑えられる RF 信号取得システムを実現します。また、いずれはこのシステムを省電力化することも念頭においてプロジェクトを展開しています。

## 使用するデバイスの主なパラメータ

### EV12AQ600 ADC

- ・クアドコア ADC、チャンネル数：1、2、4 チャンネル
- ・フル・インターリーブモードにおけるサンプリング：最大 6.4 GSps
- ・入力帯域幅 (-3dB)：6.5GHz
- ・広帯域クロスポイントスイッチを内蔵
- ・同期チェーンによるマルチチャンネル同期

### RTH120THA

- ・入力帯域幅：24GHz
- ・デュアル THA により半クロックサイクル以上の出力ホールドを実現
- ・完全差動設計

# 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

2019 年 12 月



本稿ではこの研究の状況を記録するとともに、これまでに分かった事柄について詳述し、今後改善が見込まれる点にフォーカスを当てます。

この一連の試験では、K バンド（18～27GHz）でダイレクト・ダウンコンバートを実施する際の限界を見極めることを目的としています。初期のスプリアスフリー・ダイナミックレンジ試験から、以下の 3 つの問題があることがわかりました。

- ・ 入力信号レベルが THA 性能に与える影響
- ・ 高ナイキストゾーンにおいて、低周波校正が ADC のインターリーブ性能に与える影響
- ・ 高ナイキストゾーンでのサンプリングにおける、ADC 内の積分非直線性（INL）誤差への影響

最終的には、このプロジェクトで得られた知見を次世代の K バンド向け製品の設計に生かしたいと考えています。

## 困難を極めたプロジェクトの始まり

フロントエンドボード（FEB）セットアップの基本的なブロック図を図 1 に示します。FEB は、広帯域 ADC と ADC の入力段となる THA の両方に対応するよう設計されました。図 2 に示す FEB には、パワースプリッタ、位相器、バランも含まれています。ボードへの入力は 2 系統あり、一つは RTH120 をバイパスし、第 1 および第 2 ナイキストゾーンでの 6GHz までのパフォーマン

スを最適化したもので、（図示していません）もう一つは 6～24GHz の広帯域用です。このプロジェクト開始時、RTH120 は試作品であり、まだ完全には最適化されていませんでした。

この実験システムの初期構成で想定した ADC の初期設定は以下の通りです。

- ・ 入力帯域幅（6.5GHz）
- ・ 1 チャンネルモード、4 つのコア全てが最大サンプルレート（例：6.4GSps）でインターリーブ
- ・ サンプル周波数は 5GSps に設定
- ・ インターリーブの校正については、標準デフォルトデータシートの CalSet0 にある設定とした



図 2 - キャリアボードに搭載した最初の FEB プロトタイプ

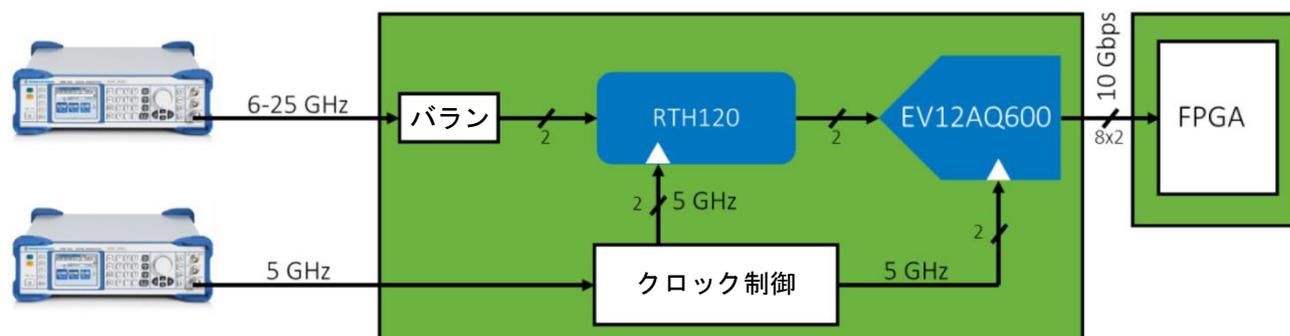


図 1 - FEB 試験評価セットアップと主なアクティブデバイス

# 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

2019 年 12 月



## 最初のダイナミック試験結果

FEB の最初の計測では、スプリアスフリー・ダイナミックレンジ (SFDR) 応答にばらつきが見られました (図 3)。ADC では 2 つの異なるシグナル・フルスケールレンジ (SFSR) でスイープし、30GHz を超える信号周波数までカバーしました。図 3 のグラフは、17GHz から 25GHz までを拡大したものです。



図 3 - ベースライン FEB 性能 (SFDR スイープ: 17~25GHz)

## 初期結果の考察

SFDR 特性には明らかに解析する価値があり、今後ダイナミックに改善するためにどこを探るべきかという洞察も得られました。これらの (図 3 にある) 結果の考察から、以下のことが導き出されています。

- ・ 入力信号レベルが低い方が SFDR の平坦度が高い (図 3 の -7dBFS と -13dBFS を比較)
- ・ 最初の実験セットアップでは、SFDR の目標 50dBc を達成することは困難

改良の第一ステップは、どのスプリアスが SFDR を制限しているのかを特定することです。図 4 のグラフは、-7dBFS と -13dBFS の入力それぞれに対する主なスプリアスを表示したものです。

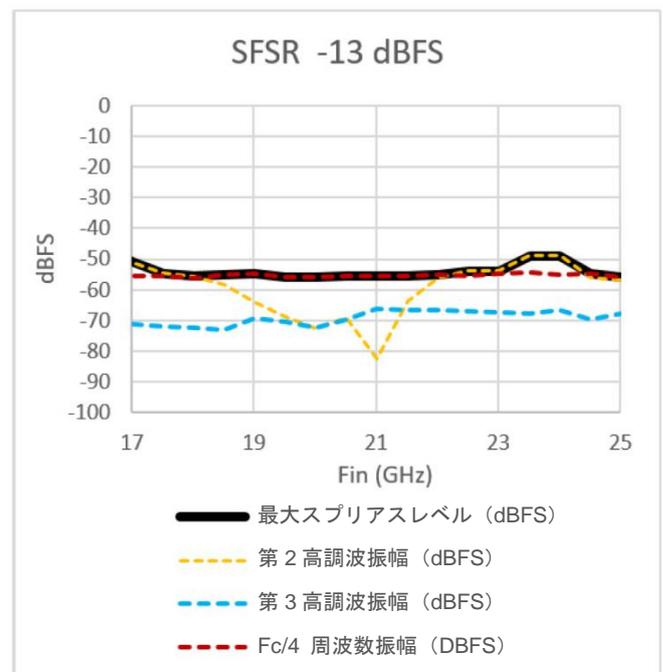
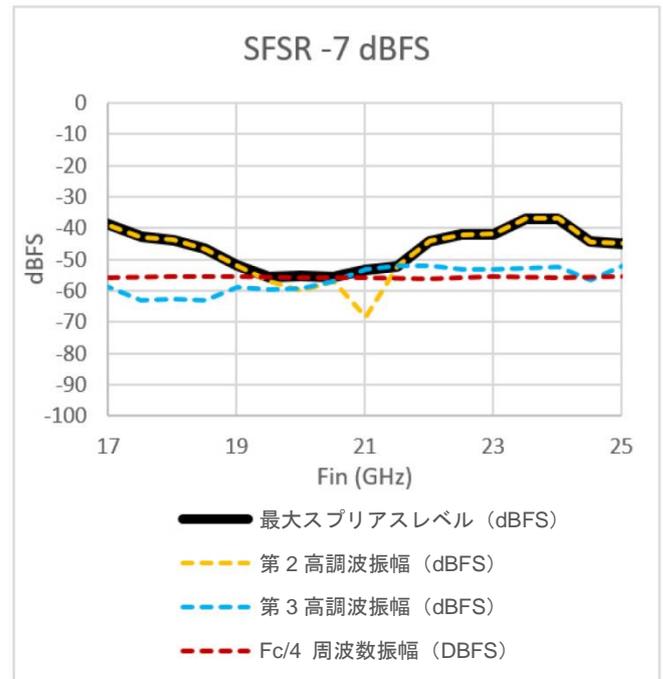


図 4 - 2 つの信号入力レベルに対するベースライン FEB 性能 (SFDR スイープ: 17~25GHz)

# 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

2019 年 12 月



これらのグラフから、周波数範囲と入力レベルの振幅によっては、様々なスプリアス周波数成分が SFDR のばらつきの原因となり、結果的に図のような高レベルのスプリアスとなることがわかります。また、第 2 高調波 (H2) と第 3 高調波 (H3) の影響、サンプル周波数 (Fc/4) の寄与も見取れます。目に見える形で評価することで、以下のことが観測できました。

- ・ -7dBFS では、最大スプリアスレベル (黒線) に対して第 2 高調波が最も影響を及ぼしています。
- ・ H2 が改善された場合、次に影響が大きいのは Fc/4 のパフォーマンスです。入力信号レベルが低い場合 (-13dBFS) では、Fc/4 が最も大きく影響しています。しかし、どちらの信号レベルでも、Fc/4 が SFDR を約 58dBFS (18GHz~22GHz) に制限していることがわかります。この要因に対処しなければ、さらにダイナミックに改良することは困難です。Fc/4 の問題から、複雑に絡み合った ADC コアの問題が浮かび上がります。スプリアス信号の原因は、オフセットのミスマッチなのです。
- ・ -13dBFS の場合、50~60dBc の SFDR が最適解として得られることがグラフからわかります。

製品データによれば、H2 を低減することによって THA パフォーマンスを改善させる唯一の方法は、入力信号レベルを低減させることです。SFDR が H2 により制限され (例えば 19.5GHz 未満、21.5GHz を超えるような領域)、SFSR が -7dBFS の場合に有効になると考えられます。

## データコンバータのパフォーマンス最適化

一方で、ADC には更なる改善の余地があります。初期の試験では、コアのインターリーブの精度に関する問題が浮かび上がりました。これは驚くべきことではありません。標準的なインターリーブの校正 (ILG) は、製品試験の際に工場で行います。これはベースバンドでの動作に最適化されており、本研究が目的とする高周波帯域の応用に最適化されているわけではないこと

は明らかです。

ADC のインターリーブを詳細に調べ、スプリアスの最大の原因はオフセットのミスマッチであることを突き止めました。目的の周波数帯でのオフセットの影響を測定しながら微調整を行ったところ、Fc/4 のスプリアスを大きく低減できる可能性があることがわかりました (図 5)。K バンドでの動作にフォーカスして 21.5GHz で校正すると、非常に良い結果が得られました。

インターリーブ前後の K バンドでのシステムパフォーマンスを図 5 に示します。上の曲線はデフォルトの設定 (CalSet0)、下の曲線は高周波用に校正したものです。後者では、オフセット、ゲイン、位相のミスマッチが補正されています。これはかなりの改善で、K バンド全域にわたり、システムのゲインが SFDR で約 15dB 増加しました。

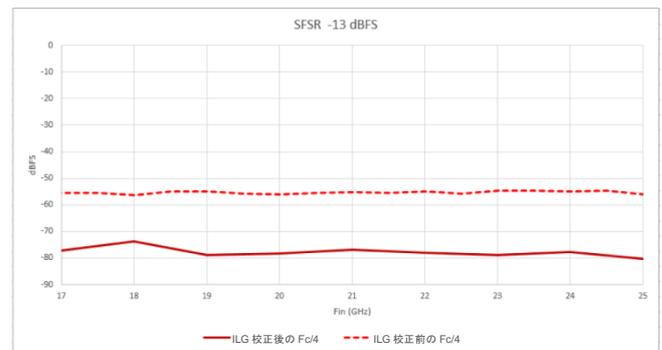


図 5- ILG 校正の影響

## インターリーブ校正以外での改善の可能性

周波数によっては、H2 が低く H3 が支配的になっていることがグラフの 21GHz 周辺からわかります (図 4)。この場合、ADC のスプリアスの影響を低減する別の方法をとることになります。それが、INL の校正です。

# 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

2019 年 12 月

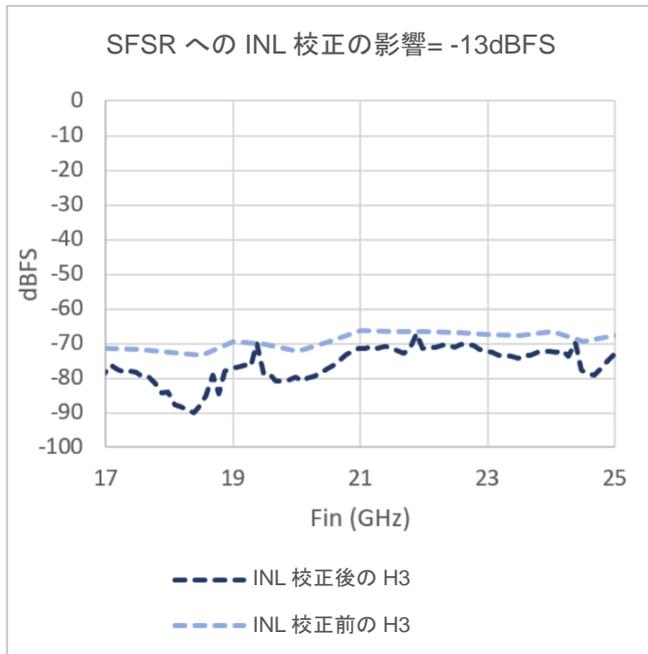


図 6 - INL 校正の H3 への影響

パフォーマンスをさらに改善できる選択肢は限られているように見えますが、コンバータの積分非直線性パフォーマンス (INL) も H3 に影響し得るのです。また、インターリーブの場合 (ILG) と同様に、INL の校正も通常は製品試験の際にベースバンドで最適化されています。しかし Teledyne の試験エンジニアは、INL を高周波ナイキストゾーンでの動作に対して再校正することにより、さらにダイナミックな改善が見込まれると考えています。

INL 調整はユーザーが実施できるものではなく、また、そうすべきものでもありません。目的に見合うよう調整するのは非常に困難です。原則として、INL を改善するには、理想的な伝達関数からのずれをできるだけ抑えていくことになります。調整のための試験装置の製作には、工学的研究が必要でした。

可能な限り最小化した高周波 INL を達成することで、17~25GHz における H3 を 3~5dB 改善できる見込みです (図 6)。

**INL について** ADC では、INL はデバイスの伝達関数の理想的な直線からのずれとして表されます。精密エレクトロニクスにおいては、INL はコンバータの周波数全域にわたり 0.5LSB 以内であることが期待されます。しかし現実的には、広帯域インターリーブシステムではこれは困難です。完全なインターリーブモードで動作する EV12AQ600 の場合、INL は  $fin = 100\text{MHz}$  において  $\pm 4.5\text{LSB}$  と規定されます。



図 7 - K バンドにおける校正前後の SFDR

## 試験の結論

元々の目的は、K バンドにおいて十分なダイナミック・サンプリング・パフォーマンスを得られるかを評価することでした。より具体的に言えば、18~22GHz で 50dBc という最低限の目標値が達成できるかということです。ハードウェアの初期モデル特有の問題があり、当初は期待した結果が得られなかったものの、実験セットアップを系統的に改良したことにより、最終的にはかなりの改善が見られました。最終的なグラフ (図 7) から、SFDR のパフォーマンスがきちんと狙い通りの入力周波数範囲に収まっていることがわかります。本プロジェクトの結果は以下の通りです。

- ・19.2~21.5GHz における SFDR は、最大 15~18dBc の改善を達成

- ・19~21.5GHz における SFDR は、50dBc 越えを達成

スペクトルを見ると、FEB での 20.478GHz にあるピークにおいて以下のパフォーマンス特性が得られています。

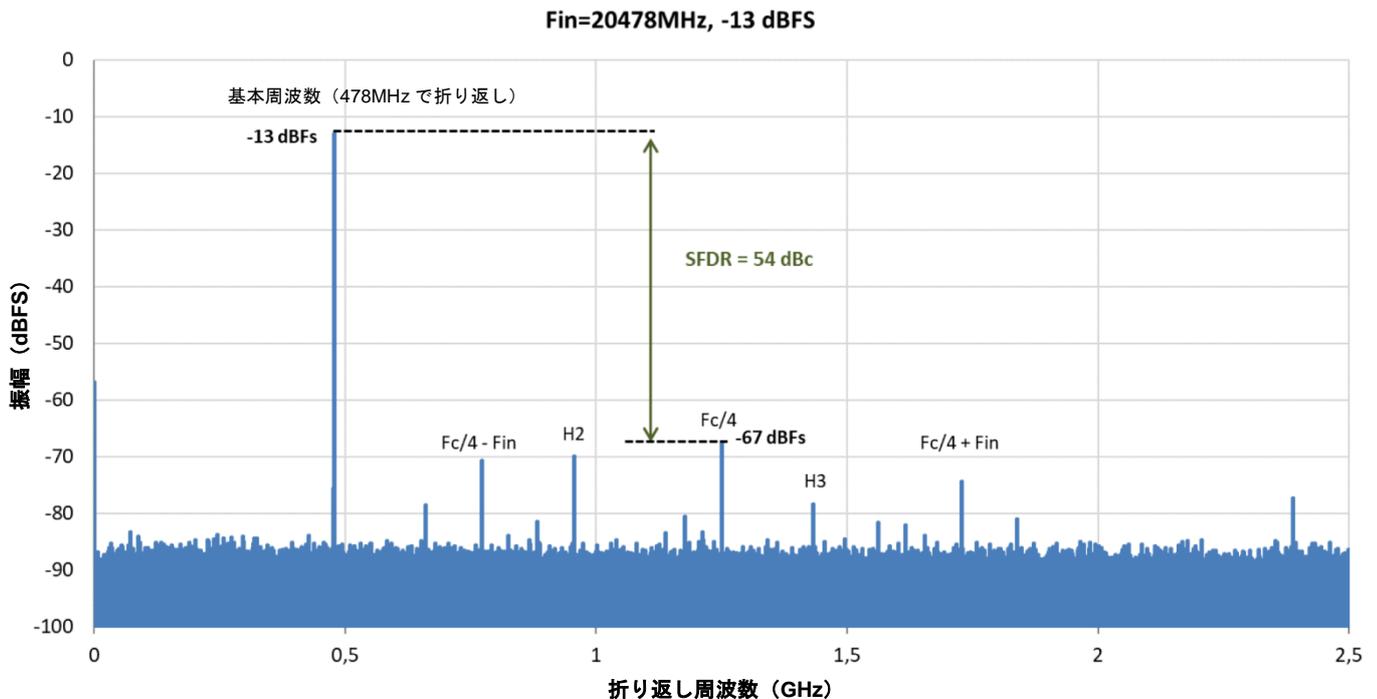


図 8 - 実験に用いた FEB において、20.478GHz をベースバンドにダウンコンバートしたスペクトル図

これまでの結果から、以下のことがわかりました。

- ・ 20.478GHz での入力信号レベルが-13dBFS の場合、SFDR は約 54dBc を達成 (図 13)
- ・  $F_c/4$  および関連するスプリアスがサンプリングしたスペクトルに影響しているものの (-67dBFS において)、すべてのスプリアス ( $F_c/4 \pm F_{in}$ , H2 & H3) において-69dBFS を下回る
- ・ SFDR を最低でも 50dBc にするという工学的研究の目標は、この構成において 19~21.75GHz の帯域で達成

## 将来の展望

本稿で取り上げた結果は FEB のプロトタイプから得られたもので、まだ完全ではありません。目立つものとしてはクロック分配の問題があり、THA のダイナミックなパフォーマンスを低減させる恐れがあります。現在、改良版の FEB を製造中です。これにより、ダイナ

ミクスの改善、特に H2 によるスプリアスレベルが改善されると見込まれています。さらに、この FEB で THA をバイパスして直接入力することで、ベースバンドでのパフォーマンスを最適化できます。2020 年中には、新たな FEB で実験研究を実施し、さらに最適化された結果が得られ次第、フォローアップレビューを発行する予定です。

当社にとってこのプロジェクトは、K バンドにおける統合された直接サンプリングソリューションへの第一ステップです。新たな可能性の提示にとどまらず、この複雑な領域におけるエンジニアリング・スキルの向上にもつながります。このプロジェクトにより、複雑でインターリーブされた ADC コアの高周波における最適化について、特に高ナイキストゾーンでの校正トレードオフと INL と ILG の最適化に関して、かなり詳細な洞察が得られました。当社では、ハイエンドな広帯域データコンバータの性能レベルを今後さらに向上させるべく、このプロジェクトの成果を活用していきます。

<https://www.teledyne-e2v.com/products/semiconductors/>

#### 参考資料：

- ・ 1 Teledyne e2v 「マイクロ波 DAC による DC から 26.5GHz の X、Ku、および K バンドにおけるダイレクト・デジタル・シンセシスの簡略化」 2016 年
- ・ 2 IEEE ウェビナー 「12 ビット 8GSps DAC による K バンドにおける信号生成」 R. ピラード 2019 年



お問い合わせ：  
Romain Pilard  
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](mailto:romain.pilard@teledyne.com)



お問い合わせ：  
Jane Rohou  
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](mailto:jane.rohou@teledyne.com)

