

未来とは今である：5G NR ATE とフィールド試験システム
Teledyne e2v のクアッド AD コンバータは、自動校正による
試験測定に革命をもたらします

2020年7月



概要

この20年で3Gから4Gへと急速に進化した移動無線技術は、引き続き5Gの新たな移動通信技術（5G NR）ネットワークの時代に突入しています。しかし各世代を通していつも問題になるのは、高周波機器のテストで必要とされる自動校正試験手法です。

高周波無線自動試験装置（RF ATE）およびフィールド試験システムで最大の問題になるのは、校正、再現性、そして測定結果間の相関です。これが仕様に対する適合性の判断材料となるためです。

無線技術が5G NRへと移行する状況の中、Teledyne e2vのモノリシックなクアッド・チャンネル、マルチポート入力ADコンバータは、最高性能のオンチップ高周波クロスポイント・スイッチを採用しており、RF ATEやフィールド試験環境での自動校正および測定技術に適しています。

Teledyne e2vの [EV12AQ605](#) および [EV10AQ190](#)（クロスポイントスイッチ入力回路を採用した12ビットまたは10ビット・クアッドチャンネルADC）を使用したRF ATEおよびフィールド試験装置は、シングル・チャンネルやマルチポートの自動校正試験計測が可能です。

世代間の問題

5Gとは、通信業界のセルラー・ネットワークの第5世代の技術標準で、2019年から世界的に導入が始まりました。5Gは、多くの携帯電話ネットワークとの接続性を保つ現行の4Gの後継規格です。多くの携帯電話ネットワークとの接続性を保ちながら、より高い周波数帯域や最大で10 Gbit/sのダウンロード速度に対応します。この帯域の拡張により、現行の4G携帯電話ではこの新たなネットワークを使用できず、5G対応の無線装置が必要となります。逆に、5Gでは、帯域幅などのすべての4Gネットワーク要件に対応する必要があります。したがって、幅広いサービスの実現のため、5Gネットワークは、低、中、高帯域の3つの帯域で運用します。

低域5G（sub-1GHz）では4G（600～700MHz）と同様の周波数帯を使用し、4G（30～250Mbit/s）よりやや高速なダウンロード速度を実現します。

中域5G（sub-6GHz）では2.5～3.7GHzの周波数帯で、ダウンロード速度は100～900Mbit/sです。多くの都市部では、この水準のサービスが2020年から開始予定です。

高域5G（ミリ波）は現在、26、28、39GHzの周波数帯を使用しています。上記の5G周波数帯は2020年に試験され、新たな中域の周波数帯（sub-6GHz）に対しても数ヶ月から数年の間に実施予定です（世界中で現在、50以上の中域周波数が使用されています）。2018年、5G規格策定を行う業界団体（3rd Generation

Partnership Project, 3GPP）では、5G NR（5Gの新たな無線アクセス技術）ソフトウェアを使用するシステムを5Gと規定しました。現在の4Gでは1平方キロあたり十万台の機器がサポートされているのに対し、5Gは最終的には1平方キロあたり百万台の機器をサポートします。もちろん、新たな5Gネットワークは最初の通信確立時には既存の4Gネットワークを使用するので、5G無線機器には4G LTEの機能が含まれることとなります。最低ラインとして、5G機器は将来的には、5Gネットワークで際限なく拡大する性能要件をカバーするのみならず、2G/3G/4G/5G（GSM/EDGE/CDMA/UMTS/WCDMA/LTE/LTE-A/TD-SCDMA/TD-LTE）といった、これまでの世代の要件も満たす必要があるのです。

したがって、今後の5G NR ATEシステムの機器試験においては、結果の相関を確実に把握するため、幅広い周波数帯域にわたり、信頼性、再現性のある方法で自動校正および計測を行い、なおかつ試験誤差を低減することが求められます。

誤差の問題

RF ATEの測定環境において、DUT（被試験装置）の外部にある様々な不確実性や誤差を明らかにするには、DUTや製品の性能をより正確に高い信頼性を確保して計測できる試験構成が必要になります。望ましい結果を得るには、測定の不確実性を特徴づけて定量化することがきわめて重要です。

未来とは今である：5G NR ATE とフィールド試験システム Teledyne e2v のクアッド AD コンバータは、自動校正による 試験測定に革命をもたらします

2020年7月



一般的には、測定結果の正確さには常に疑問の余地が残ります。理由は、計測が物理的および電気的環境に影響を受けるため、また使用するソース、測定装置、計器類の性能による限界があるためです。このため、測定値が DUT や試験対象の性能の真の値と完全に一致することはあり得ません。測定値と真の値との差が誤差となります。誤差が（試験以外の）何に起因するかにより、ランダム誤差と系統誤差とに分類できます。ランダム誤差はその名のとおりに、ランダムな誤差で、試験設定中や測定中の予測不可能な時間的・空間的な変数により発生します。一般に、ランダム誤差は、DUT 測定結果への影響に関して、追跡や定量化が非常に困難です。ランダム誤差は主に RF ATE 環境における複数の要因により起こります。例えば、温度、接続性、計測器ノイズや歪み、他にも接続やケーブルによる再現性のある誤差が含まれます。

系統誤差とは再現され得る誤差で、すべてではありませんが通常はある程度まで除去し得るものです。系統誤差はある程度まで抑えることが可能です。校正とは、RF ATE 試験環境の系統誤差を見積もり補正することです。通常、系統誤差を正常に除去するためには、校正標準や基準ユニットが必要になります。標準や基準ユニットは、既知の測定に関する単位をかなりの正確さで再現することが求められます。その後、測定システムを用いて標準や基準ユニットの測定と試験を実施し、測定結果を生データとして保存します。この実測値データを使って、標準や基準ユニットの測定値を既知の値と比較することで、測定時の系統誤差を算出します。これにより誤差がわかります。そして得られた系統誤差を使って、測定値を補正します。ただし、5G NR ATE 試験装置については、DIB（デバイスインターフェース・ボード、プローブカード、ケーブル、接続性など）を含め、多様な周波数や試験条件があるため、標準や基準ユニットを使用しても問題が残ります。校正を行うもう一つの方法は、基準面を規定することです。基準面は、試験システム環境における系統誤差を見積もって補正することで設定します。ただし、ランダム誤差は基準面環境では補正できません。RF/5G NR ATE およびフィールド試験システム環境においては、自動校正および測定技術を使用する各 DUT ごとに基準面を作成することが、ますます求められます。

個別機器の自動校正および試験測定

RF ATE 環境において、各 DIB（デバイス・インターフェースボード）/DUT に対して基準面を作成するには、校正プロセスを規定する必要があります（図 1a、1b）。通常は標準を使用して校正します。理想的には標準として、蓄積される測定誤差が通常の DIB/DUT（ステップ 2）に比べて 1/2 から 1/4 未満程度の「ゴールド基準ユニット」の DIB/DUT を使用します（ステップ 1）。ステップ 1 の誤差が達成されていれば、標準を使用して蓄積した測定値は実際の DIB/DUT の試験（ステップ 2）をするのに十分であるとみなします。RF ATE 環境において、「ゴールド・スタンダードな／基準ユニット」測定誤差を広範囲の周波数、ノイズ、電圧レベル、ゲインで一貫して最低の値に保ち続けることは、非常に困難であり、時間や費用がかかります。

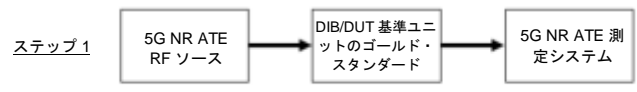


図 1a 簡易ブロック図：ゴールド・スタンダードの基準ユニットを使用した手動の基準面校正



図 1b 簡易ブロック図：DIB/DUT 自動測定

もちろん、標準と DIB/DUT 間の基準面の校正に重大な影響を及ぼすような、配線ばらつきおよび機器のバリエーションが存在します（例えば、複数のデバイス・インターフェース・ボード異常、DIB/DUT 接点／機器バリエーション、ケーブル／コネクタインピーダンス、ソース／計測器バリエーションなど）。要するに、5G NR の機器の校正方法は（かなりのランダム誤差を発生する）基準面を作成するために標準を使用した手動試験と、その後の自動試験との組み合わせになる場合があります。これによって、系統誤差のソース除去ができます。

図 2 に、汎用の 6 ピン（表面実装型）5G NR 向け低ノイズ増幅器（LNA）製品/DUT を示します（外部機器なし）。この LNA の例では、基準面を作成するために、RF ATE 環境での試験の前に校正試験を実施する必要があります。通常、LNA の RF ATE 試験には以下が必要となります。

未来とは今である：5G NR ATE とフィールド試験システム Teledyne e2v のクアッド AD コンバータは、自動校正による 試験測定に革命をもたらします

2020年7月



- ・動作周波数範囲（50 以上の 5G NR ネットワーク周波数帯域）
- ・ゲイン／挿入損失
- ・ゲイン平坦度（周波数範囲において）
- ・雑音指数
- ・入力／出力反射減衰量
- ・入力 IP3
- ・出力 IP3

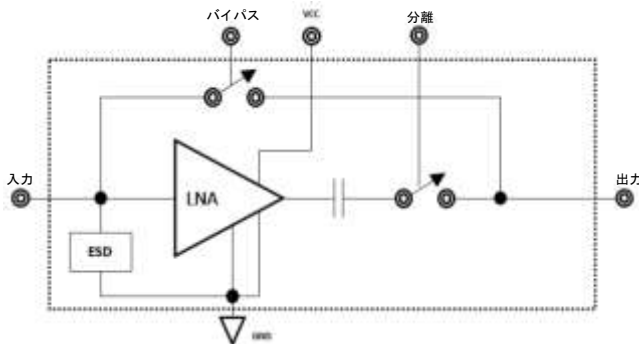


図 2 汎用 6 ピン 5G NR LNA DUT（外部機器なし）

もちろん実際の ATE 環境においては、この特定の LNA の試験に加えて他のタイプの 5G NR 機器（結合器、減衰器、フィルタ、VGA、など）の試験機能が求められます。個別機器あるいはサブシステムレベルで、複数の装置をカスケード接続して行う試験も含まれます（結合器+減衰器+LNA+VGA+フィルタ、など）。このため、マルチポートでも試験する必要があります。

図 3 に、最低限必要な操作外部機器付きの、同じ汎用の 6 ピン（表面実装型）5G NR 向け低ノイズ増幅器（LNA）製品/DUT を示します。これらの機器はできるだけハンドラ接点に近い位置の DIB に取り付けます。実際は、高周波下の図 3 は、図 2 に比べて測定も校正もはるかに複雑になります。DUT と DIB/ハンドラ間の異常として以下のようなものが起こり得ます。

- ・減衰器の不整合と損失誤差（インピーダンス整合および DUT 入出力レベル調整に必要）
 - ・入出力間のインダクタ性能の変動
 - ・制御ラインとゲートドライバ間の相互作用の変化
 - ・接地ループ
 - ・ケーブル/接続インピーダンス
 - ・試験システムに必要な試験モジュール接続の際のコネクタの締め付けによるインピーダンスの差異
- 上述のように、信号チェーン内の機器が増えて DUT サイズが大きくなると、校正の問題が大きくなります。変数が増え、校正や自動試験の誤差は指数関数的に増加します。

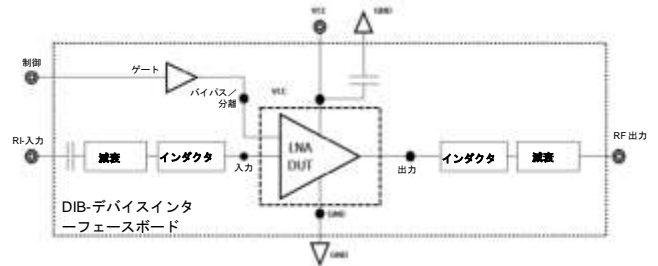


図 3 汎用 6 ピン 5G NR LNA DUT/DIB（外部機器あり）

このため、今後 5G NR ATE システムや通信機器に設置する試験フィールドには、（上述の誤差があっても）幅広い周波数、仕様、条件について、信頼性、再現性を保ち、関連づけることが求められます。また、基準面を作成するため、標準に依存するような手動校正を使わず、自動校正が可能であることも必要です。図 4 に、外部機器のいらないタイプの、（シングルまたはマルチポートの）DIB/DUT 向け 5G NR RF ATE の自動校正計測システムの簡易概念ブロック図を示します。

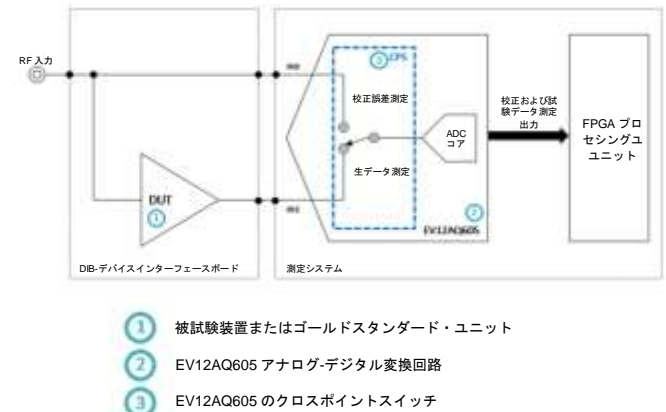


図 4 概念ブロック図：5G NR RF ATE の自動校正試験計測システム

正確で信頼性と再現性のある測定を RF ATE システムで実施するため、テスト・エンジニアは高価なラックマウント式装置や受信器、測定器のフロントパネルに実装された高品質コネクタと、現場の DIB/DUT インターフェースとの接続に配慮する必要があります。DUT への電気的接点となるインターフェース（プローブカードまたはパッケージ/ハンドラ接点インターフェースカード）は、通常、DIB に統合されていますが、同タイプの高品質コネクタを備えていることは稀です。ソース（DUT へと接続）と受信器/計測器（DUT から接続）を DIB を含めてカスケード接続する複数のケーブルやコネクタは、実質的なランダム誤差や系統誤差の原因となります。この誤差を補償するため、概要図

未来とは今である：5G NR ATE とフィールド試験システム Teledyne e2v のクアッド AD コンバータは、自動校正による 試験測定に革命をもたらします

2020年7月



(図4)に示す RF ATE 試験構成では、各個別 DIB/DUT の基準面が作成できるよう、DUT ポートでの自動構成と測定を手動校正なしに実施できます。図4では、試験校正誤差を直接測定し、最終的な DUT 測定 (生データ測定値 - 校正誤差測定値 = 最終的な DUT 測定値) と関連づけ補正することで、校正/試験測定を自動化しています。これは、最初に (自動的に) 内部クロスポイントスイッチ (CPS) を「Calibrate Error Measurement (誤差測定校正)」モードに切り替え、ADC が RF スループットを誤差の寄与を含めて測定できるようにして行います。

- ・直接 RF アンテナ/ソースノイズおよび歪み
- ・DUT への入力反射減衰量/減衰器誤差
- ・電源の問題
- ・接地の問題
- ・付随するソース/ドライバの問題 (上記の例の制御ポートなど)
- ・コネクタやケーブルの誤差/バリエーション

測定値は校正誤差測定値として保存されます。その後、CPS は自動的に「生データ測定」モードに切り替わり、ADC は (必要な外部機器を接続した) DUT に同様の測定を実施します。データは生データ測定値として保存されます。二つの測定から得られたデータはソフトウェアで処理し、自動校正/補正された最終試験結果を算出します。内部 CPS があることで、RF ATE エンジニアはテストを組み合わせ、手動操作や再校正することなく、自動的に DIB/DUT を再構築できます。もちろん、DIB/DUT が複数の機器をカスケード接続して構成されている場合は、前述のものと同様、後述するように、クアッド入力クロスポイント・スイッチ (CPS) を内蔵するクアッド AD コンバータによってマルチポートの測定と自動校正/補正が可能になります。

5G NR ATE DUT 自動校正および試験測定

図5、6に、5G NR ATE 自動校正および試験測定システム用の自動化 (2 ステート) ソリューションを示します。これには、最高のオンチップ高周波クロスポイント・スイッチ (CPS) を使用した、Teledyne e2v の整合されたクアッドチャンネルマルチポート入力 AD コンバータが使われています。Teledyne e2v の EV12AQ605 および EV10AQ190 (クロスポイント・スイッチを採用した 12 ビットまたは 10 ビットクアッドチャンネル AD コンバータ) により、5G NR ATE およびフィールド試験装置開発の際に、シングルチャンネル (図5、6、7) とマルチポート 5G NR 装置のどちらでも、自動校正計測が可能です。CPS は異なる 4 つの

モードで動作します (SPI を介して自動的に切り替え/制御されます)。

- ・1-ch モード IN0 入力：クアッド ADC、インターリーブ、最大サンプルレート 6.4 GSPS (4 X 1.6 GSPS)
- ・1-ch モード IN3 入力：(同上)
- ・2-ch モード IN0 入力、A、B 双方の ADC に接続。IN3、C、D 双方の ADC に接続、最大サンプルレートは各チャンネルで 3.2 GSPS (2 X 1.6 GSPS)
- ・4-ch モード IN0-IN3 入力、それぞれ個別に A、B、C、D の ADC に接続、最大サンプルレートは各個別チャンネルで 1.6 GSPS

また、6GHz (EFPBW) を超える拡張入力帯域幅のある EV12AQ605 はダウンコンバージョン・ステージを通したベースバンドへの信号変換をする必要がなく、Cバンド (4~8 GHz) において直接信号サンプリングできます (直接 RF サンプリング)。

図5に、自動校正計測用の簡易ブロック図を示します。CPS は 1-ch (IN0 入力) モードに設定し、(CPS により) DIB/DUT RF 出力を切り離れた状態で、ADC (A、B、C、D) は DIB/DUT の RF スループットポートを測定します。この「校正誤差測定」では、DIB/DUT (入力) の総合誤差をサンプリングします。

- ・直接 RF アンテナ/ソースノイズおよび歪み
- ・DUT への入力反射減衰量/減衰器/フィルタ誤差
- ・電源と接地の問題
- ・DUT からの入力/反射減衰量/接点の問題
- ・DUT に必要な DIB に含まれる、付随するソース/ドライバ/機器の問題
- ・コネクタやケーブルの誤差/バリエーション、など

AD コンバータから得たこの計測値は「校正誤差計測値」として保存されます。

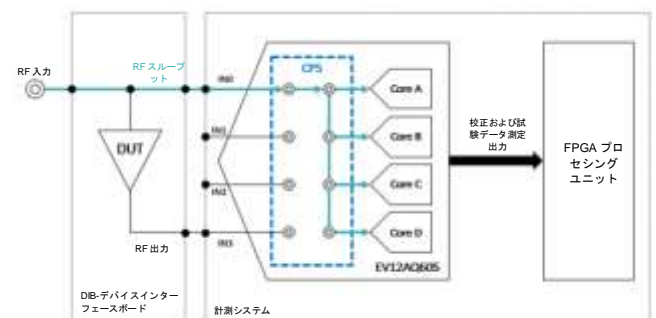


図5 簡易ブロック図：自動校正誤差計測

未来とは今である：5G NR ATE とフィールド試験システム
Teledyne e2v のクアッド AD コンバータは、自動校正による
試験測定に革命をもたらします

2020年7月

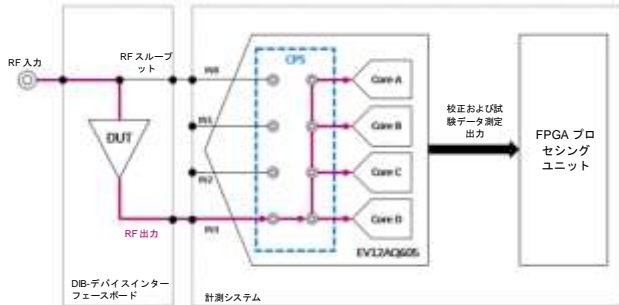


図 6 簡易ブロック図：自動校正された生データ計測値

図 6 に、生データ計測用の簡易ブロック図を示します。校正誤差計測の後、CPS は 1-ch (IN3 入力) モードに設定し、(CPS により) DIB/DUT RF スループットポートを切り離れた状態で、ADC (A、B、C、D) は DIB/DUT の RF 出力ポートを計測します。「生データ計測」では、以下のような DIB/DUT (入力) /DUT (出力) の総合性能/誤差をサンプリングします。

- ・ (校正誤差計測に挙げたものと) 同様の誤差
- ・ DUT RF 出力性能

AD コンバータから得たこの計測値は「生データ計測値」として保存されます。最終的な DUT 計測値は、生データ計測値 - 校正誤差計測値という計算から得られます。

図 7 に、生データ計測と校正誤差計測を同時に行う場合の簡易ブロック図を示します。CPS は 2-ch モードに設定します (IN0 入力は A、B 双方に接続、IN3 入力は C、D 双方に接続)。2-ch モードでは、DIB/DUT RF 出力を ADC (C、D) で計測しながら、DIB/DUT の ADC (A、B) で RF スループットポートを計測します。このような「校正誤差計測」と「生データ計測」を同時に行う構成では、最大サンプルレートを 3.2 GSPS に設定します。この場合も、最終的な DUT 計測値は、生データ計測値 - 校正誤差計測値という計算から得られます。

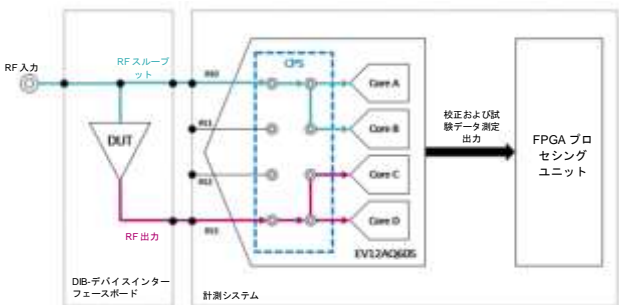


図 7 簡易ブロック図：校正誤差と生データの同時自動計測

導入した通信機器の自動校正および試験計測による 5G NR ATE システム/フィールド試験

図 8 に、マルチポート DIB/DUT 入出力の同時計測の簡易ブロック図を示します。生データ計測を含めたシステムの自動校正計測を行うものです。CPS は 4-ch モードにセットします。これで、各独立サンプリング AD コンバータ・チャンネルが最大サンプルレート 1.6 GSPS で動作します。対象となるポート DIB/DUT を導入したフィールド通信システムに要求される試験/計測ポイントとして校正します。4-ch モードの AD コンバータ (A、B、C、D) では、DIB/DUT やフィールド試験システムの RF スループットポート、ポート 1、ポート 2、RF 出力ポートを同時に計測します。また、この構成では各ポートを同時に計測し、データを「校正誤差計測値」あるいは「生データ計測値」として使用します。最終試験計測値は、生データ計測値から各ポートの校正誤差値を引いて計算します。

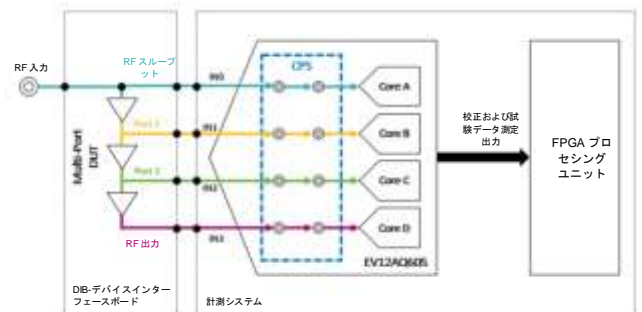


図 8 簡易ブロック図：複数のポートの校正誤差と生データの同時自動計測

さらに、EV12AQ605 では「複数の AD コンバータの同期機能」にあり、マルチポートの試験計測の柔軟性を更に向上させることができます。クアッドコア AD コンバータの同期機能により、自動的に複数の AD コンバータの時間/位相サンプリング調整および再構成が行われ、リアルタイムでの計測と補正が可能になります。また、この AD コンバータの同期機能を使って、システムを 4 チャンネルから 8、12、16 以上の多チャンネルへスケールアップすることも可能です。

CPS 付きの独自のクアッド ADC (EV12AQ605 および EV10AQ190) により、5G NR ATE システムおよび通信機器のフィールド試験の自動校正と試験計測が可能

EV12AQ605 はクアッドチャンネル 12 ビット 1.6GSPS

未来とは今である：5G NR ATE とフィールド試験システム Teledyne e2v のクアッド AD コンバータは、自動校正による 試験測定に革命をもたらします

2020年7月



の AD コンバータです。クロスポイントスイッチ(CPS)内蔵でマルチモード動作が可能であり、4つの独立コアをインターリーブ動作させてより高速なレートでサンプリングできます。4チャンネル動作モードでは、4つのコアにより、4つの独立入力を同相で1.6 GSPSでサンプリングできます。2チャンネル動作モードではコアのインターリーブ数を2に設定することで、2つの入力それぞれがそれぞれ3.2 GSPSのサンプリングレートに達します。1チャンネル動作モードではコアのインターリーブ数を4に設定することで、4つのコアそれぞれに伝送された単一の入力が6.4 GSPSのサンプリングレートに達します。このように自由度が高いため、RF（およびIF）信号のデジタル化では3.2 GHzの瞬時帯域幅まで対応できます。また、6GHz（EFPBW）を超える拡張入力帯域幅においては、EV12AQ605はベースバンドではなく、Cバンド（4~8 GHz）の信号を直接サンプリングすることができます。AD コンバータには、マルチチャンネル・システム設計を可能にする、複数のADコンバータの同期機能があります。このデバイスでは、最適なRF性能と高密度なピン配置を実現するため、HITCE ガラス・セラミック素材を使用した非密封型のフリップチップパッケージを採用しています。

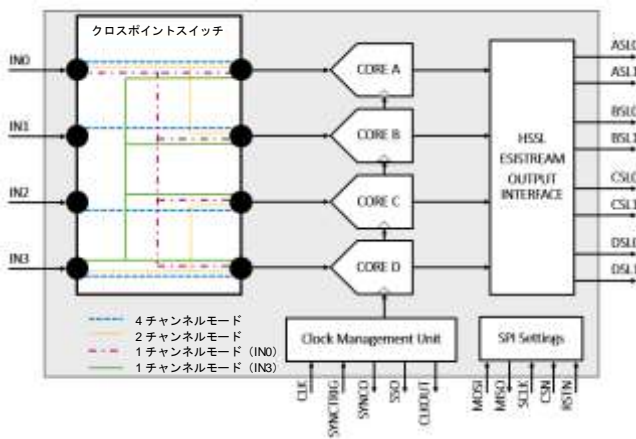


図9：EV12AQ605 ブロック図

この技術資料に記載したコンセプトを実現するための重要なポイントは、チャンネル間の絶縁性能、すなわちクロストークです。クロストークが大きいと、ADC内で発生する誤差が大きくなり、結果が歪む原因となります。これは他のノイズと同様に、自動校正プロセスで補正が可能です。しかし、図10に示すように、EV12AQ605のクロストーク性能においては、このようなノイズの追加があってもADコンバータの使用上の問題にはなりません。

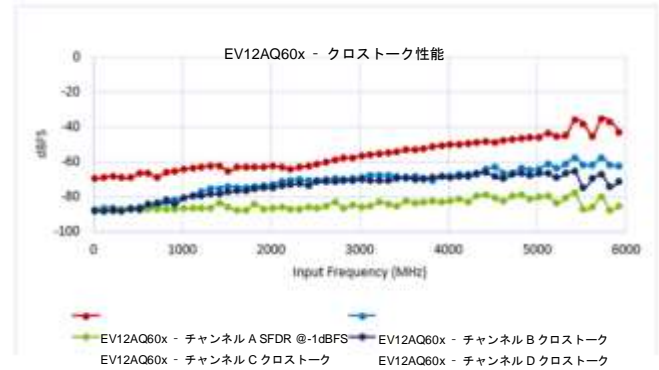


図10：EV12AQ605 クロストーク性能

EV10AQ190 は同じようなクロスポイントスイッチ内蔵のADコンバータです。以下の表にEV12AQ605およびEV10AQ190の概要を示します。

	EV12AQ605	EV10AQ190
サンプリング速度	1.6/ 3.2/ 6.4 GSps	1.25/2.5/5 GSps
チャンネル番号	4/2/1	4/2/1
分解能	12	10
アナログ入力帯域幅 (-3dB)	6.5 GHz (C-band)	3.2 GHz (S-band)
ENOB	8.1b @ 5.3GHz	7.7b @ 1.2GHz
データ出力	ESstream 8 HSSL	LVDS DMUX 1:4
消費電力	6.6 W	5.6 W
温度範囲	0°C to +90°C -40°C to +110°C	0°C to +90°C -40°C to +110°C
パッケージ	CBGA323 (HITCE) 16x16 mm	EBGA380 31x31 mm

結論

移動体無線通信技術において、世界中に5G NRネットワークが配備されつつあり、高周波装置の自動校正高速試験が必須になっています。計測したデータの校正、再現性、相関は5G NR ATE およびフィールド試験システムにおいて非常に重要です。これらの問題は、試験デベロッパーにとっての理想的な費用対効果へのアプローチとなり、全体的な試験速度とスループットに直結します。Teledyne e2vのモノリシックなクアッド・チャンネル、マルチポート入力ADコンバータでは、最高のオンチップ高周波クロスポイント・スイッチ回路を採用しており、5G NR ATE やフィールド試験環境のどちらでも、（シングルまたはマルチポートの）各機器の自動校正と計測が可能です。■



お問い合わせはこちら：
Marc Stackler
セールス&アプリケーションエンジニア、APAC
半導体
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、APAC
Yuki.Chan@Teledyne.com

