

ミックスド・デバイス開発におけるテスト信号の課題

I. はじめに

無線デバイスの設計エンジニアは、次世代の設計を取り入れ、複雑なデジタル要素と RF 要素を組み合わせる必要に迫られています。クロック周波数が高速化し、回路サイズが縮小するにつれ、デジタル・コンポーネントはアナログ的な振る舞いを見せ始めますが、エンジニアはこの振る舞いを考慮しつつ、アナログ、デジタルの混在した複雑な設計を進めなければなりません。デジタル技術と RF 技術の融合が進む中、設計を迅速かつ正確に評価しなければならないエンジニアにとって、このような新たな設計課題は、大きな頭痛の種になっています。

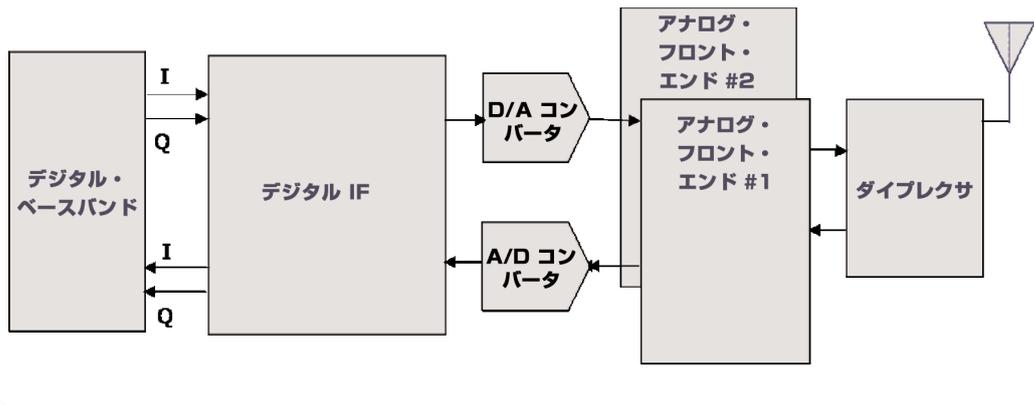
II. 市場の牽引役

激しい競争が繰り広げられる市場では、開発コストを低く抑え、製品を早期に投入することが求められます。後れを取ると、高い代償を払わなければなりません。この「早く、低価格で」というニーズにより、デジタル RF への移行が進んでいます。デジタル RF では、機能の大部分をデジタル・デバイスやソフトウェアで実現でき、アナログ・コンポーネントへの依存が少なく済みます。この動向は RF 分野にとって大きな刺激となり、技術革新のペースが加速され、アナログ無線機能の大部分が高性能・低消費電力の回路に置き換えられています。このような最新のデジタル RF 技術の利用拡大は、無線通信のさらなる可能性を約束します。

商用、軍用にかかわらず、無線製品に求められているのは、より多くの情報をより早く、いつ、どこでも入手できるということです。そして、より多くの場所、より多くのユーザを対象に、低コストの無線アクセスを提供してくれるのが、デジタル RF 技術です。これらのニーズに応えるため、より多くのデバイスがソフトウェアで定義され、ファームウェアの更新とプラグイン・アナログ・フロント・エンド (RFIC) の切り替えだけで機能を変更できるようになりつつあります。これは、開発とテストをデジタル・ベースバンド領域で行う必要が増えているということであり、結果として、インタフェースはアナログからデジタルに移行しています。

このような先進的なデバイスをテストする際は、複雑でダイナミックな信号を必要とします。周波数、振幅、位相を急激に変化させる複雑な変調や多重化を行った信号を生成しなければならないケースが増えています。

行政や軍事産業の分野でも、この技術の利用が増加しています。最新のレーダ・システムでは、デジタル・ベースバンド信号、FPGA、デジタル・ビーム・フォーミング・アンテナ・システム (位相アレイ) の利用が増えています。たとえば、米国では、ソフトウェア無線の JTRS (Joint Tactical Radio) や P25 (Project 25) などの通信システムが導入されています。これらのシステムのテストに役立つのが、当社 AWG5000 シリーズ任意波形ジェネレータをはじめとするミックスド・シグナル・ソースです。

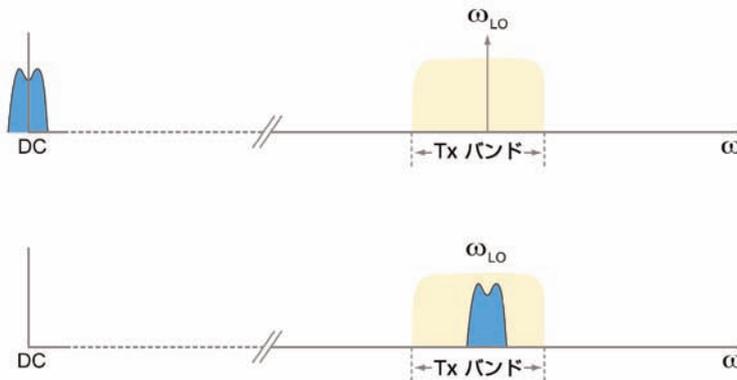


▶ 図 1. アナログ・フロント・エンドの切り替えが可能なソフトウェア定義手法のブロック図

III. ミックスド信号環境における設計検証

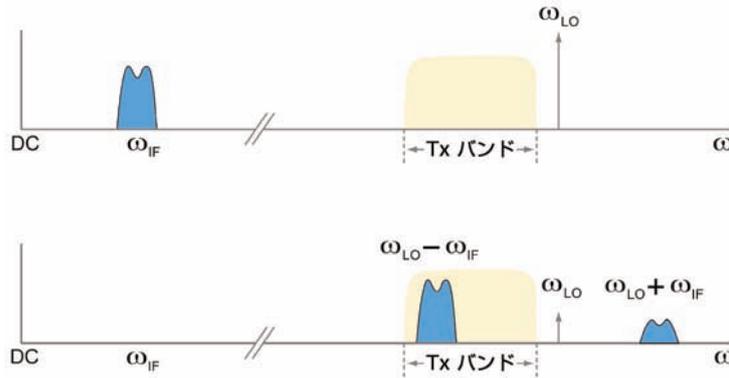
デジタル RF の普及により、技術環境は非常に複雑になりました。ゼロ IF（直接変換）方式を使用しているデバイスもあれば、ロー IF（低中間周波数）方式を使用しているデバイスもあります。この混在環境のため、従来のアナログ・フィルタは使いづらくなったり、まったく使えない場合もあります。現在では、ゲインのアクティブ・ヌルと DC オフセットのミスマッチ、IQ 直交の不均衡などを利用した、ベースバンドの補正が注目されています。

まず、ゼロ IF 手法を考察してみましょう。この手法では、図 1 に示したデジタル IF がなく、信号はデジタル・ベースバンドから直接変換されます。



▶ 図 2. ゼロ IF スペクトラム

ゼロ IF アーキテクチャによる周波数変換の様子を図 2 に示します。このアーキテクチャでは、変調信号は DC が中心となります。この信号が LO（ローカル・オシレータ）と合成されると、結果は周波数 LO を中心とした 1 本のスペクトラムになります。I/Q レベルの不均衡、LO の漏れ、I/Q オフセット、I/Q 変調器の不完全な直交など、トランスミッタにおける障害は、不要な帯域外成分（サイドバンドなど）としてではなく、不完全な RF スペクトラムという形で現れます。



▶ 図 3. ロー IF スペクトラム

図 3 はロー IF アーキテクチャの様子です。使用する要素はゼロ IF のものと同様ですが、大きな違いが 1 つあります。それは、D/A コンバータからの変調信号の中心は DC ではなく、イメージのないロー IF として合成されます。この信号が I/Q 変調器で LO と合成されると、結果は複雑なスペクトラムになります。必要とする信号のスペクトラムは LO からのオフセットに見られ、これはロー IF 周波数（すなわち $\omega_{LO} - \omega_{IF}$ ）になります。

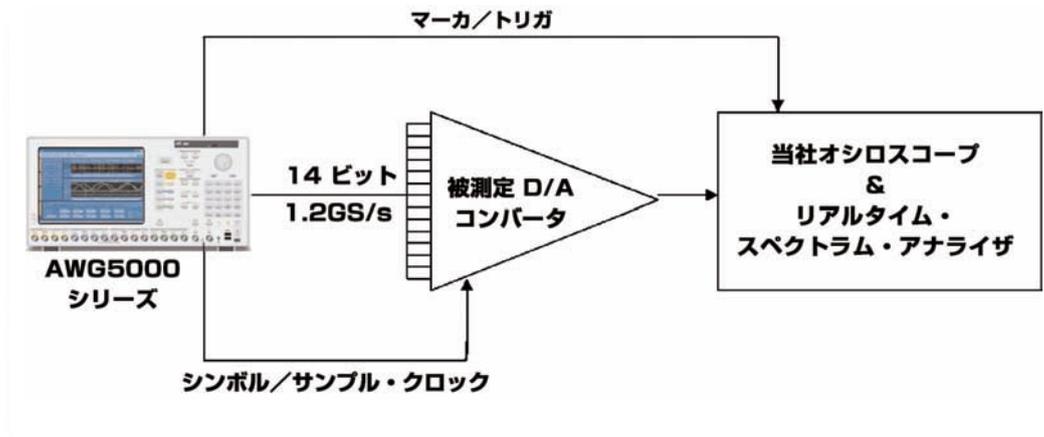
どちらの手法にも長所と短所があります。ロー IF 手法では、I/Q 変調器での誤差は、不要な LO のリーク成分と上側のサイドバンドの原因となります。しかし、ロー IF の周波数を上げることにより、この不要な成分をスペクトラムから十分に離して、フィルタを有効にすることができます。

最新の D/A コンバータでは、ゲインとオフセットのミスマッチをキャンセルする手段が考慮されています。このゲインとオフセットのミスマッチを校正すると、不要な帯域外成分（LO のリークやサイドバンド・イメージ）を減らし、フィルタ処理を簡素化することができます。この手法で不要な成分を十分にフィルタリングできると（ベースバンドから RF への変換に比べて）、完璧な変調キャリアが得られます。

ゼロ IF 手法では、フィルタリングを行っても信号品質の向上は期待できません。信号品質を高めるには、個々の素子の特性を改善するかあるいは LO のリークや直交変調の誤差をキャンセルする必要があります。DA コンバータは様々な変調を含んだ信号を出力できるので、イメージ信号のないロー IF 信号の生成が可能です。AWG5000 シリーズ任意波形ジェネレータは、ベースバンドでの誤差キャンセルや信号補正のアルゴリズムを検証するための振幅や位相を可変したデジタル・ベースバンド信号を提供します。

IV. データ変換テスト

より高い周波数帯域の利用と直線性の観点から、最新の送受信機設計において、D/A コンバータと A/D コンバータは、どちらも単なる主要コンポーネントというだけでなく、大変重要な存在になっています。

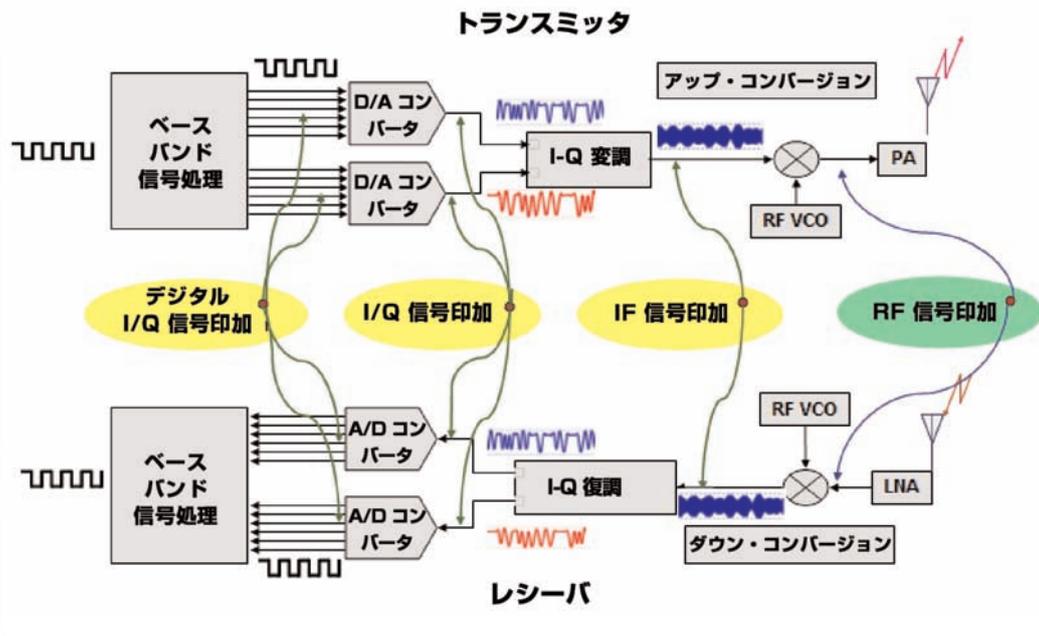


▶ 図 4. D/A コンバータのテスト・セットアップ

図 4 は、非直線性（積分と微分の両方）、ゲイン・エラー、オフセット・エラー、セトリング/スルー時間、クロストーク、グリッチ・エネルギー、スペクトラムなどのパラメータを測定するための、D/A コンバータ・テストの代表的なセットアップ例です。AWG5000 シリーズでは、14 ビットのデジタル・ランブ信号（最大サンプル・レート 1.2GS/s）と、1 つのアナログ・チャンネルにつき 2 チャンネルのマーカ出力（最大 8 チャンネル）を使用し、生成ビットとサンプル・ビットのタイミングを取ることができます。アナログ・チャンネル出力（最大 4 チャンネル）も用意されており、ミックスド信号やデジタル・テスト信号を出力することもできます。これは、シンボル・クロックとサンプル・クロックが離れていて、しかも、入力がシングルエンドではなく差動の場合に特に便利です。

V. エンジニアが直面する切り分けの問題

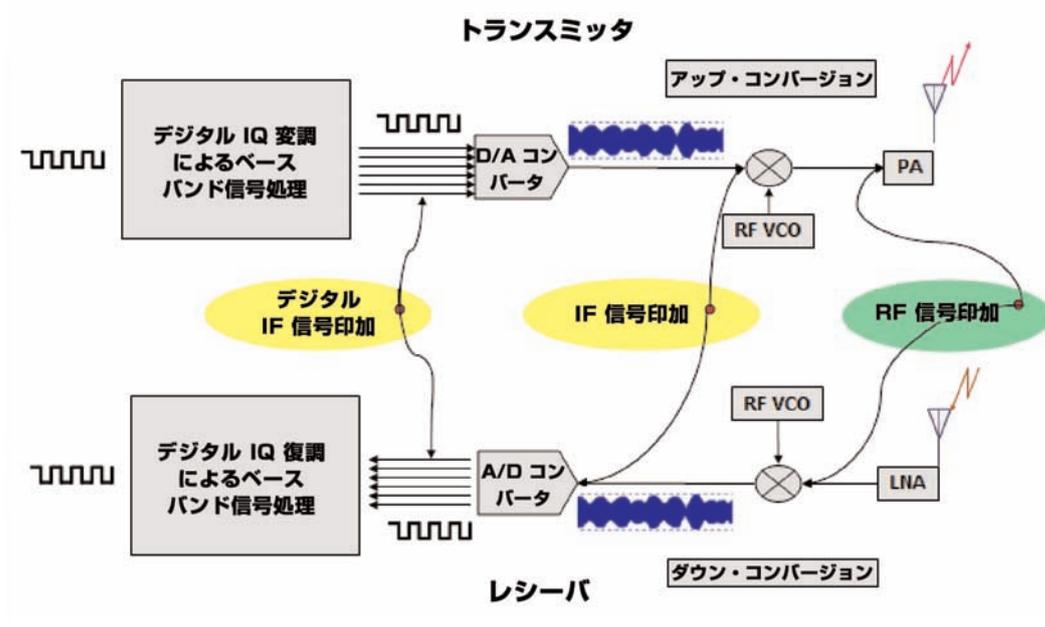
ASIC 設計のテストでは、「実際の速度」で稼働させながら検証を行うことのできる、FPGA プロトタイプがよく使用されています。そこでは当然、「実際の入力信号」を使用して「実際の出力」を得ることが必要とされます。そして、ASIC に実装できるように、機能の切り分けを決定します。アナログ機能とデジタル機能を適切に切り分けることにより、市場投入までの時間を短縮でき、ひいては製品寿命を延ばすことができます。もう 1 つ考慮しなければならないのがコストです。ASIC はパッケージ・コストを削減できるよう、ピン数を 1 本でも少なくする必要があります。チップ・インタフェースとしては、デジタル、アナログ、デジタルとアナログの組合せの 3 通りが考えられます。どのアプローチを採用するかは、デジタル IQ、アナログ IQ、IF 信号を使ったミックスド信号テストを通して吟味する必要があります。



▶ 図 5. I/Q 変調のアナログ・アプローチ

図 5 に示すように、デバイスによっては IQ 変調をアナログで実行するように切り分けているものもあります。左端の「デジタル IQ」の部分については、AWG5000 シリーズで最大 28 のデジタル出力（最大 2 チャンネルでそれぞれ 14 ビット出力）が可能です。マーカ出力と組合せることで、合計 32 のデジタルチャンネルが使用できます。

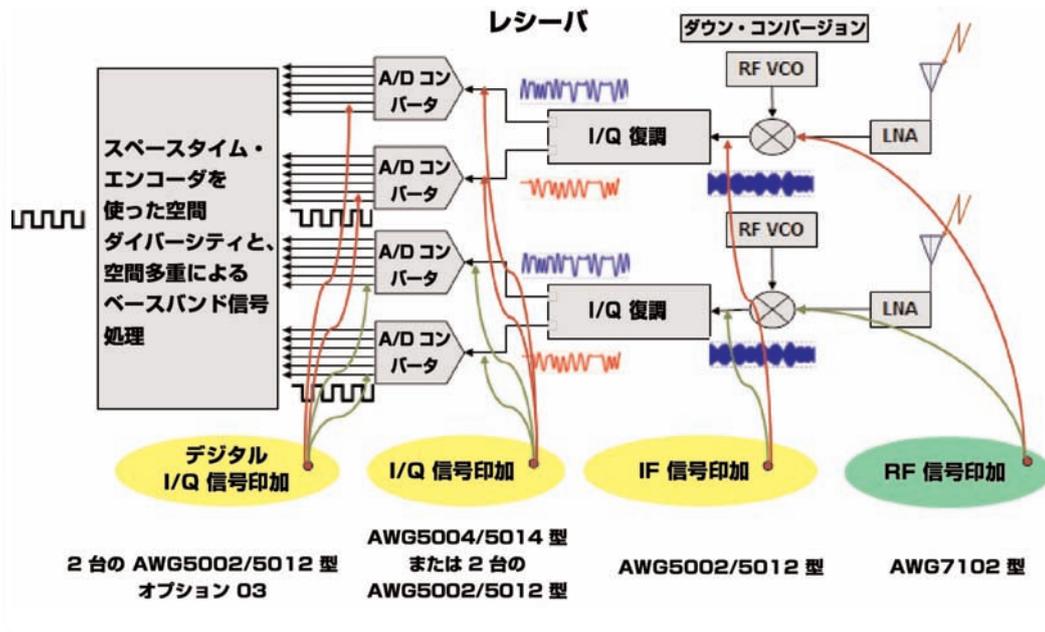
しかし、前述したように、送受信機については、IQ 変調機能をベースバンドで実装することで簡素化を図る傾向があります。また、変調フォーマットもベースバンドのソフトウェア制御で変更できるようになってきています。図 6 に、この手法のブロック図を示します。



▶ 図 6. ベースバンドで実行される IQ 変調 (デジタル)

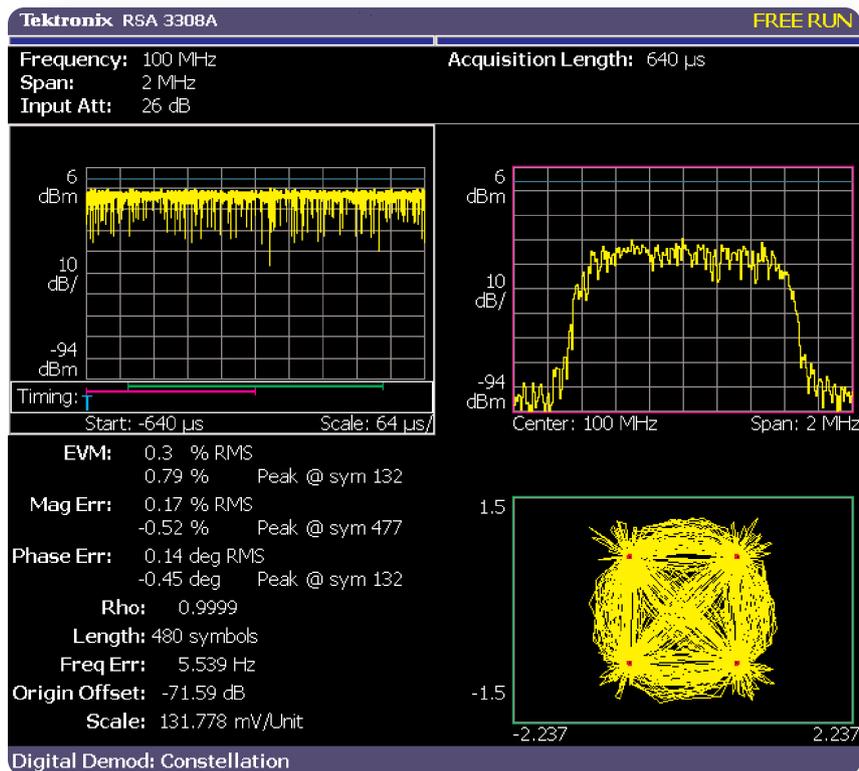
VI. MIMO (Multiple Input, Multiple Output) 手法

現在、多くのマルチビーム・アンテナやアダプティブアレイ・アンテナを必要とする、802.11n などの MIMO (Multiple Input, Multiple Output) 技術の採用が進んでいます。現在、この技術を使用しているほとんどの無線システムは 2×2 のマトリックスで実装されており、送信、受信において各 2 本のアンテナを使用していますが、 4×4 マトリックス・デバイスの開発も進んでいます。このような用途では、高価なベクトル・シグナル・ジェネレータ (VSG) を複数台用意するより、AWG5000 シリーズを 1 台使用することをお勧めします。AWG5000 シリーズでは、複数の独立したチャンネルを使用して、実際の MIMO 環境で見られる振幅/位相の変動を、電気的なスイッチングなしでシミュレーションできるため、コスト効率の面でより有利です。アナログ・アプローチとデジタル・アプローチのどちらをとるかは、非常に重要な問題です。アンテナからの信号を直接 RF プロセス IC と結合すべきか？あるいは、ダウンコンバートしてデータ・コンバータに接続すべきか？ AWG5000 シリーズであれば、両方のアプローチのテストに必要な、現実のシミュレーション信号を出力することができます。



▶ 図 7. MIMO 受信機のテスト・セットアップ

図 7 は、MIMO 受信機におけるテスト信号の印加ポイントの例です。信号が印加されるポイントにかかわらず、AWG5000 シリーズで生成する信号（通常は変調信号）には、高い変調品質が求められます。そうでなければ、信号に劣化が見られた場合、その原因が被測定デバイスにあるのかテスト信号にあるのかを判別することができません。



▶ 図 8. AWG5000 シリーズで出力した QPSK 信号を当社リアルタイム・スペクトラム・アナライザで取り込んだ例。非常に優れた変調品質であることがわかります。

変調品質は EVM（エラー・ベクトル振幅）で測定し、S/N と SFDR（Spurious Free Dynamic Range）の間に高い相関関係があります。AWG5000 シリーズの SFDR は 80dB であり、図 8 に示すように非常にクリーンなデジタル変調信号を出力することができます。

ミックスド信号テストに AWG5000 シリーズ任意波形ジェネレータを使用することで得られる主な利点

- アナログとデジタルの出力性能を組合せることができ、1 台のソリューションでアナログとデジタルの IQ、IF 信号が生成可能
- 直線性に優れた 14 ビット D/A コンバータにより、優れたサンプル・レートと SFDR の組合せを実現
- アナログ出力とマーカ出力の組合せにより、AD コンバータの評価に必要な同期した正弦波とクロック信号を非常に低い相対ジッタで提供可能
- 4 チャンネル機種は MIMO テストに最適
- 内部の変換サンプル・レート・クロック（最高 1.2GS/s）により、外部のクロック・ソースを使用することなく高品質な信号を出力
- 統合されたユーザ・インターフェースでセットアップが容易

VII. まとめ

デジタル信号処理は RF 設計でますます大きな要素になっており、RF 信号解析のために新しい手法が必要になっています。以前からベースバンド信号はデジタル的に処理されてきましたが、今では、IF 信号や一部の RF 信号さえも次第にデジタルで開発されるようになってきました。新しい任意波形生成技術により、デジタル信号と RF 信号が混在した信号を効果的に合成できるようになりました。