

X-Microwave による RF 設計のプロトタイピング

著者 : Jacob Ciolfi、アソシエート・エンジニア

概要

一般に、RF 設計のプロトタイピングは複数の評価用ボードを組み合わせることによって行われています。その作業には、非常に長い時間と多大なエンジニアリング・リソースが必要になります。しかも、その結果得られたプロトタイプの性能は、1 枚のボード上に構築される最終的なシステムの性能には達していない可能性があります。このような課題の解決に向けて、X-Microwave は、RF 設計のプロトタイピングに最適なモジュール式のシステムを提供しています。それらを利用すれば、60GHz までに対応するプロトタイプの組み立て／テストをわずか半日ほどで実施することができます。つまり、RF 対応のシグナル・チェーンのテストに必要な時間とリソースを大幅に削減することが可能になります。しかも、そのプロトタイプは、変更が可能で整然としたプリント基板に近い形で実現されます。本稿では、まず X-Microwave のプラットフォームの概要とその長所について説明します。その上で、同プラットフォームを初めて使う際に活用できるステップバイステップのガイドを提供します。

はじめに

一般に、RF 設計のプロトタイピングを実施する際には、次のような作業が行われることになるでしょう。まずは、シグナル・チェーンで使用する各種コンポーネントの評価用ボードを購入します。続いて、RF ケーブルを使って各ボードの接続を行います。その上で、シグナル・チェーンを適切にレイアウトして量産用の基板を構築した場合に、どの程度の性能が得られるのかを見積もる作業を実施することになるはずです。しかし、この方法では、評価用ボードの長いパターンと、各ボードの接続に使用する長いケーブル／コネクタによって、大きな挿入損失が生じる可能性があります。また、プロトタイピングに使用する各評価用ボードには、電圧について固有の要件が存在します。そのことが原因で、オンラインにするまでに相応の時間がかかり、苛立ちを覚えることもあるでしょう。加えて、RF コンポーネントの中には、複数種の電圧を特定のシーケンスで印加しなければならないものがありま

す。そのルールに反してしまうと、コンポーネントが故障してしまうかもしれません。更に、電源や RF 信号を接続するだけでも配線が複雑に絡み合った状態になるはずで、デジタル制御も必要であれば、より一層煩雑な状態に陥ることは間違いありません。しかも、初めて電源を投入したときにシステムが動作しなかったとしたら、そのデバッグ作業は多大な忍耐と我慢を要するものになってしまいます。RF エンジニアリングの世界において、プロトタイピングはよく知られる頭痛の種です。より迅速に、より簡単に、より正確にプロトタイピングを実施するにはどうすればよいのでしょうか。X-Microwave のプラットフォームは、この課題の解決に役立つものです。

次のような状況を想像してみてください。あなたは RF シグナル・チェーンのプランを策定し終えたところです。おそらくは、次の作業としてプロトタイピングに取り組むことになるでしょう。実験室に入り、コンポーネントを手にとって、作業台の上でわずか 60 分間のうちにプロトタイプの組み立てが完了するとしたらどうでしょうか。12V_{DC} の 1 台の電源、信号発生器、スペクトル・アナライザを接続し、初めて電源を投入した途端に、シミュレーション結果と 1dB も変わらない、最終的な基板レベルの性能を測定できるのです。そのプロトタイプで使用しているアンプの性能に不満を覚えるといったケースもあるでしょう。その場合、六角レンチを使って 10 分ほど作業を行えば、アンプを交換した後の回路のテストを即座に実施できるのです。X-Microwave のプラットフォームを利用すれば、プロトタイピングの作業はこのように変化します。

X-Microwave のプラットフォームはモジュール式なので、特殊なツールを使用することなく、簡単に変更することが可能なシグナル・チェーンを 1 時間足らずで構成することができます。これらのシグナル・チェーンは、X-Microwave ブロックで構成されます。X-Microwave ブロックは単一の IC に対応し、相互に接続が可能な RF 対応のボードです。そのエコシステムには、最大 60GHz の周波数に対応するコンポーネントが用意されています。RF 用の接続は、はんだ付けではなく、六角ネジを使って接点をしっかり固定することで実現されます。そのため、取り付けが簡単でありながら高い堅牢性が得られます。



シグナル・チェーンに対する電源の供給やデジタル制御は、評価用ボードを使用する場合と比べてはるかに容易です。必要なものは、制御ボードに給電するための12V_{DC}の電源が1つ、Raspberry Pi、FPGA、あるいはユーザが選択した別のドライバだけです。X-Microwaveのプラットフォームはモジュール式であることから、シグナル・チェーンの変更も迅速に実現できます。このことは、デバッグに要する時間の大幅な短縮につながります。また、コンパクトで、可搬性があり、整然としたプロトタイプを構成することが可能です。

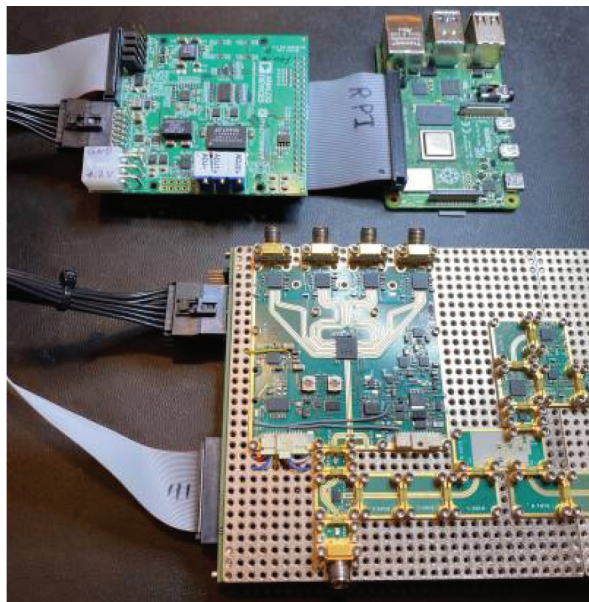


図1. X-Microwaveのプラットフォームを利用したプロトタイプの全体像。ブリッジ・ボードであるFMC-XMW、X-Microwaveベースのシグナル・チェーン、Raspberry Piで構成されています。電源とデジタル制御用の要素も盛り込まれています。

X-Microwaveのソリューション

X-Microwaveのソリューションを利用してプロトタイピングを行えば、最終的な設計に対応する1枚の基板と同等のレベルの性能を得ることができます。しかも、評価用ボードを使用した場合と同等以上の開発スピードと変更可能性 (modifiability) を確保することも可能です。X-Microwaveのプラットフォームを利用して構成したプロトタイプ (以下、X-Microwaveベースのプロトタイプ) は、単一のICに対応する小さなブロックで構成されます。それらをつなぎ合わせることでシグナル・チェーンが実現されます。X-Microwaveのエコシステムには、多種多様なシグナル・チェーンに対応できるよう数千種ものRFブロックが用意されています。例えば、アンプやミキサー、スイッチ、フェーズ・ロック・ループ (PLL)、VCO (Voltage-controlled Oscillator) などが提供されています。個々のRFブロックには、単一のRF ICが実装されています。各RF ICは、パッケージ済みまたはベア・チップの状態で使われています。その周囲には、機能やマッチングの観点から最適化を図るための受動部品が配置されています。X-Microwaveは、RFブロックの設計とレイアウトに特別な注意を払っています。それにより、各ICがデータシートに記載された値に近い性能を発揮できるようにしています。各RFブロックには、ICからブロックの端のローンチまでにわたって接地され

た共平面導波路のパターンが設けられています。それらのローンチから隣のブロックまでのRF接続は、はんだ付けが不要なGSG (Ground-signal-ground) のインターコネクトを使用することで実現されます。それらのインターコネクトは連続した基板パターンに非常に似ているので、プロトタイプの全体的な性能は、大きな接続部を備える評価用ボードを使用する場合と比べてはるかに正確に最終的なシステムの性能を表すことができます。GSGのジャンパによる接続では、**わずか1dB未満の挿入損失しか生じません**。シグナル・チェーンを構成するコンポーネントの数が増加すると、より多くのインターコネクトが必要になります。そうすると、X-Microwaveのプラットフォームと、SMAコネクタで接続された評価用ボードの挿入損失の差は更に顕著になります。

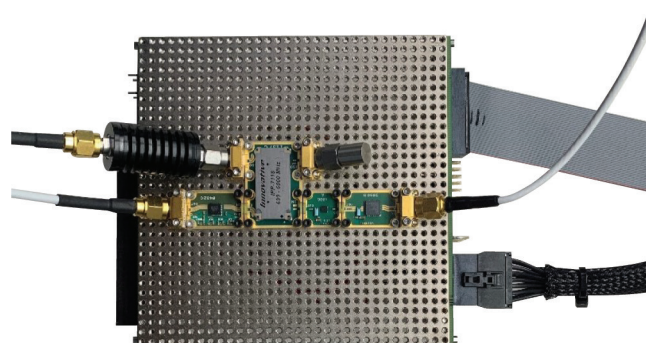


図2. X-Microwaveのシグナル・チェーン

Microwaveベースのプロトタイピングでは、複数のRFブロックをプロトプレート上にマウントします。シグナル・チェーンの両端にSMAプローブのブロックを取り付けることで、ボードにRF信号を入出力することが可能になります。また、X-Microwaveのプラットフォームには、RFブロックを囲むためのウォールやリッドが用意されています。それらにより、キャビティ効果のシミュレーションを実施できます。

プロトプレートの底面には、専用のバイアス／制御ボードがマウントされます。それにより、電源と制御信号を供給します。個々のアクティブなRFブロックに対しては、それとペアになる専用のバイアス／制御ボードが用意されています。各バイアス／制御ボードは、RFコンポーネントに必要なレギュレートされた電圧の供給、電源シーケンス、デジタル制御のための回路を備えています。同ボードは、それが対応しているRFブロックのボードの直下にあるプロトプレートの底面に取り付けられます。上部に位置するRFブロックのボードに対しては、スプリング・ピンによって電気的に接続されます。電源シーケンスとバイアスは、専用のバイアス／制御ボードによって処理されます。そのため、設計者は本質的に重要なRF性能に集中して取り組むことができます。

X-Microwaveベースのプロトタイプは、一連の評価用ボードを使用する場合と比べて最終的な設計にはるかに近いものになります。両手法の差は、シグナル・チェーンで使用するコンポーネントの数が増えるとより顕著になります。X-Microwaveベースのプロトタイプでは、その評価結果について確信を得ることができます。実際、基板設計の繰り返し回数を最小限に抑え、開発プロセスを加速することが可能になります。

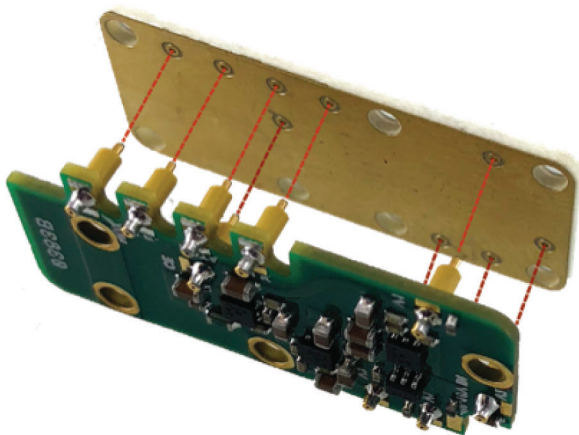


図3. RFブロック（上）とバイアス／制御ボード（下）の接続。
プロトプレートは写っていません。

プロトタイピングの手順

X-Microwaveのプラットフォームを利用したRF設計は、一般的なRFシグナル・チェーンの設計と似たような形で実施します。必要なブロックを素早く見つけられるようにするために、X-Microwaveがサポートしているコンポーネント製品については、種類、仕様、メーカーでフィルタをかけられる検索機能が用意されています。また、ICメーカーのサイトを見ると、このエコシステムでサポートされている製品のページには、X-Microwaveのバナーが設けられていることがわかります。

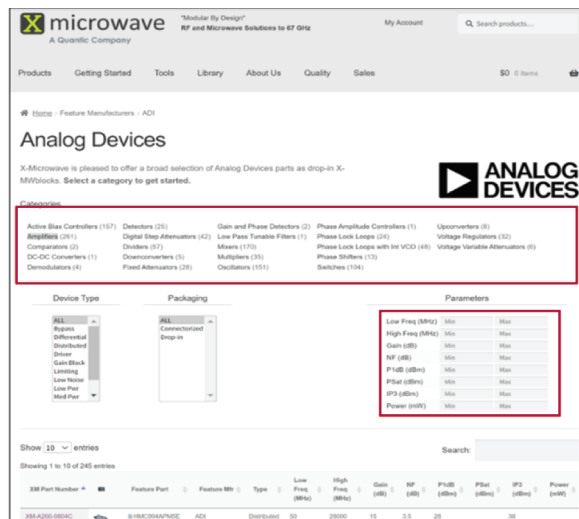


図5. X-Microwave製品のパラメトリック検索機能
(メーカー順にソート)

部品の選択が完了したら、次に行うべきことはシグナル・チェーンのシミュレーションです。Keysight TechnologiesはRFシミュレーション・ツール「Genesys®」を提供しています。このソフトウェアにはX-Microwave製品のモデル・ライブラリが組み込まれています。それらのモデルは、パターンของことも考慮して、RFブロックのローンチからローンチまでシミュレートできるように構築されています。そのため、X-MicrowaveのRFブロックのシミュレーションでは、パターンを考慮しないICベースのシミュレーションと比べて高い精度が得られます。ICのメーカーは自社製品のGenesys用のモデルを提供していないこともありますが、X-Microwaveのモデル・ライブラリは広範な製品をサポートしています。

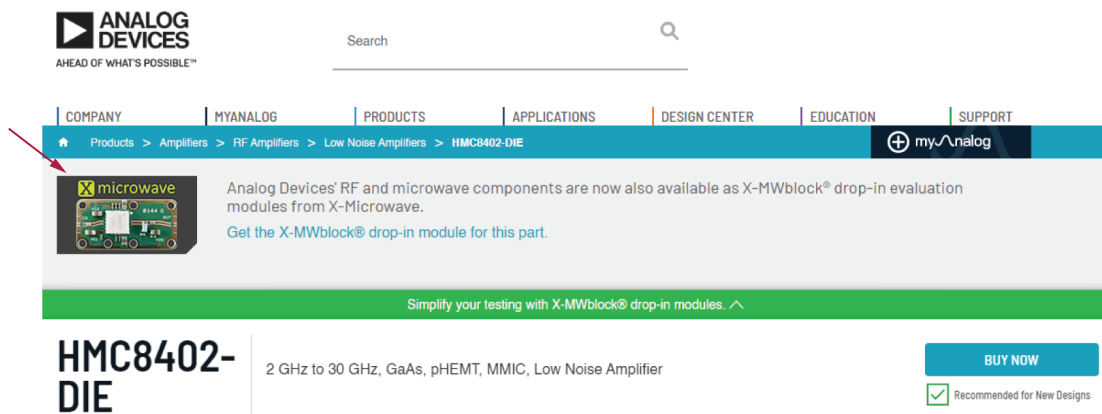


図4. HMC8402-DIEの製品ページ。
X-Microwaveのバナーが用意されています。

Genesysでシミュレーションを実行し、所望の性能が得られることを確認したら、X-Microwaveのレイアウト・ツールを使用する段階に進みます。同ツールを使用すれば、RFシステム全体のレイアウト（電源の追加を含む）を1時間未満で完了することができます。このレイアウト・ツールには、[X-Microwave](#)のページからオンラインでアクセスすることが可能です。同ツールを使用すれば、シグナル・チェーンを構成する各RFブロックをプロトプレート上にどのように配置するかを決定することができます。RFブロックを配置したら、ボタンを1回クリックするだけでバイアス／制御ボードが自動的に追加されます。シグナル・チェーンで使用するすべての部品情報は、右上の部品表（BOM：Bill of Material）に即座に反映されます。ここには、「Export CSV」ボタンも用意されています。それによって生成されるCSVファイルには、BOMの情報が含まれています。注文を行う準備が整ったら、X-Microwaveに同ファイルを送信して正式な見積もりを行ってもらいます。

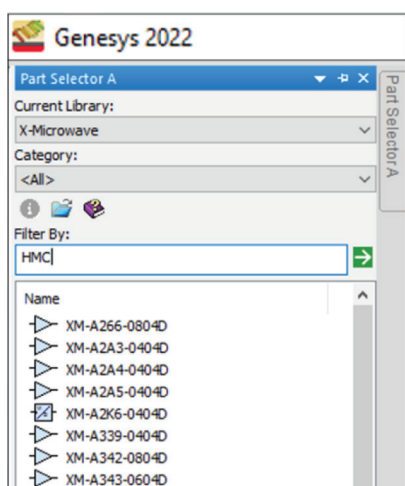


図6. Genesysのパーツ・セレクト。品番によってRF ICの検索を行うことができます。X-Microwaveのライブラリも表示されています。

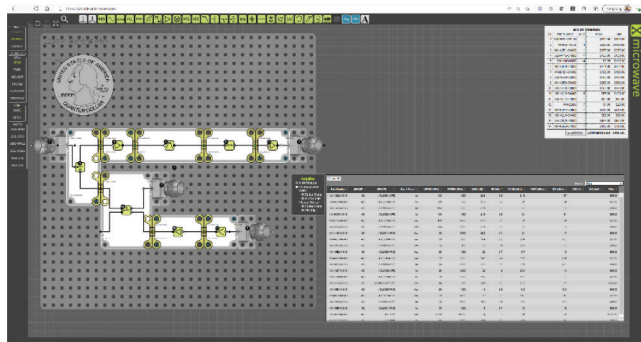


図7. X-Microwaveのレイアウト・ツールの利用画面。シグナル・チェーンを示すと共に、パーツ・セレクトとBOM関連の機能を強調表示しています。

ここまでで説明したように、シグナル・チェーンを構成するためには、RFブロックとバイアス／制御ボードが必要です。BOMに注目すると、ブロックの電氣的な接続と機械的なマウントのためにいくつか追加の部品が必要になることに気づくでしょう。まず必要なのはプロトプレートです。プロトプレートとしては、32×32、16×16という2つのサイズのものが販売されています。32、16という数字は、X-Microwaveにおけるグリッド単位のサイズを表します。つまり、ボード上のネジ穴の間隔を基準にしてサイズが表現されています。必要な部品としては、GSGジャンパとアンカーも挙げられます。GSGジャンパは柔軟性を備える小さな長方形の回路です。同ジャンパを、隣接するRFブロックのローンチの間をまたがるように配置することで、RF接続が形成されます。一方のアンカーは、GSGジャンパ全体をネジでRFブロックにしっかり固定するために使用します。それにより、確実な電氣的接続が実現されます。

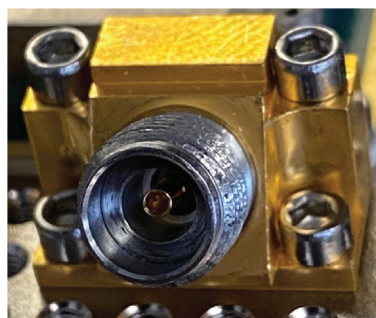


図8. X-Microwaveのプロープ。2.92mm、1.85mmのものが用意されています（写真は前者）。

外部のRF信号源をシグナル・チェーンに接続するためには、X-Microwaveのプロープが必要です。周波数に応じ、2.92mm、1.85mmのいずれかのプロープを使用します。2.92mmのプロープは50GHzまでの信号に良好に対応できます。一方、1.85mmのプロープについて、X-Microwaveはテストにおいて67GHzの上限を超える性能を発揮していると説明しています。それ以外にも、プロトプレートにあらゆるものを取り付けるためのネジが必要になります。提供されているのは、長さの異なる7種類のネジです。最短のネジはバイアス／制御ボードを取り付けるために使用します。最長のネジは、X-Microwaveのウォールのエッジにリッドを取り付けるために用います。最後に挙げるのは、すべての構成部品を接続するために必要なツールです。具体的には、ネジを締めるための1/16インチの六角レンチと、小さな物を小さな場所に配置するためのピンセットが必要になります。RFブロック、バイアス／制御ボードを入手したら、X-Microwaveのオンライン・レイアウト・ツールで作成した配置図に従ってボードの組み立てを行います。

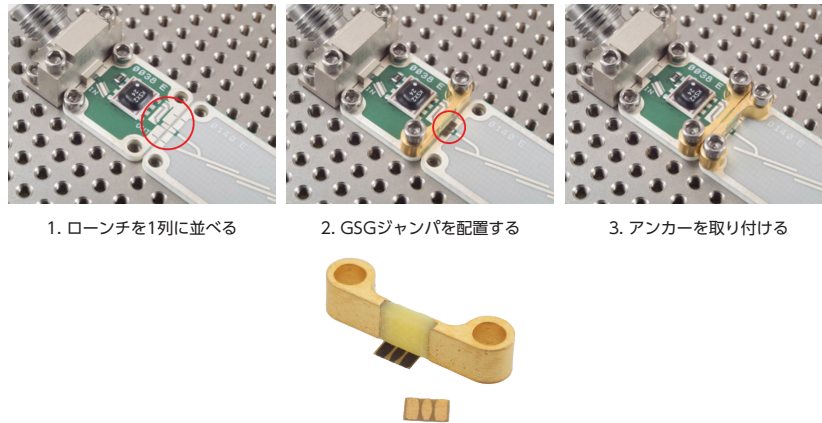


図9. GSGの配置手順（上）。
（下）はGSGとアンカーの外観です。

テストを行う前に必要となる残りの作業は、電源とデジタル制御用の信号をボードに接続することだけです。それらをバイアス／制御ボードに接続する手段としては、ブリッジ・ボード「AD-FMCXMWBR1-EBZ」が最適です。このボードは、最大8本のGPIO（General Purpose Input/Output）ライン、それぞれ8本のチップ・セレクト・ラインを備える2つのSPI（Serial Peripheral Interface）バス、2つのI²Cバスを提供します。また、このブリッジ・ボードでは、2種類のデジタル制御モードを利用できます。1つは、ブリッジ・ボードにRaspberry Piを直接接続し、Pythonで記述した簡単なプログラム（数行のスクリプト程度）でシグナル・チェーンを駆動するというものです。もう1つは、ブリッジ・ボード上のFMCコネクタを介してX-Microwaveのシグナル・チェーンにFPGAを接続するというものです。この方法であれば、ハードウェアのプロトタイピングと同時に、最終製品に近いレベルのソフトウェアを開発／テストすることができます。ブリッジ・ボードに12V_{DC}の1つの電源を接続すると、X-Microwaveベースのプロトタイプに7種の電圧を供給することができます。それらのうち3つは、ポテンショメータによって調整することが可能です。レベル・シフトなど、ブリッジ・ボードのいくつかの設定は、ジャンパによって選択することができます。また、ブリッジ・ボードは2本のケーブルを使用するだけでX-Microwaveベースのプロトタイプに接続することが可能です。そのため、RFの実験環境をすっきりと整理できます。バナナ・ケーブルやワニ口クリップを使った迷路のような配線が存在する実験室とは対照的な環境が得られます。このブリッジ・ボードを使えば、小型で整然としたX-Microwaveベースのプロトタイプに、電源とデジタル制御用のソリューションを洗練された形で追

加することができます。そのため、ハードウェア全体の可搬性が極めて高くなります。つまり、デモや出張に最適な最小のサイズでプロトタイプを実現できるということです。X-Microwaveベースのプロトタイプを紹介する際、追加で必要になる機器はRF信号源とRF対応の測定ツールだけです。

すっきりした実験環境とモジュール式のエコシステムは、より迅速かつ生産的なデバッグ作業につながります。つまり、デバッグにあまり頭を悩ませることなく、より少ない時間で最終的な製品の製造段階まで進むことができます。

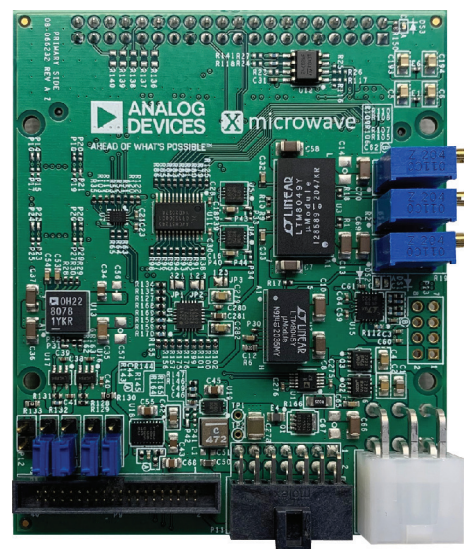


図10. FMC-XMWブリッジ・ボードであるAD-FMCXMWBR1-EBZの外観

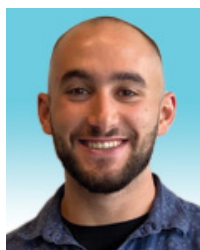
まとめ

従来、RF システムのプロトタイプは複数の評価用ボードを組み合わせるによって行われてきました。しかし、その作業には多大な時間がかかることに加え、フラストレーションを超えるレベルの苦痛が伴っていました。X-Microwaveのプラットフォームは、そうした問題の解決策となるものです。X-Microwaveのソリューションは、より迅速で、よりの確なプロトタイプングのプロセスを実現します。しかも、60GHzまでのRF 設計に対応できます。この手法を採用すれば、よりコンパクトで簡単に変更が可能な設計を実現することが可能になります。また、シグナル・チェーンのデバッグや実験の作業は大幅に簡素化されます。加えて、X-Microwaveベースのプロトタイプは、アナログ・デバイセズのブリッジ・ボードと併用することで非常に可搬性が高まります。追加で必要なものは、12V_{DC}の電源が1つとデジタル制御用のRaspberry Piだけです。各シグナル・チェーンは小さな靴箱に収まるほどの大きさです。デモ用のセットアップは、スライド・デッキをロードするよりも短い時間で完了します。

X-Microwaveベースのプロトタイプは、非常に高い性能を発揮します。当然のことながら、それに伴って従来のプロトタイプング手法よりも多くのコストがかかる可能性があります。とはいえ、1回だけ発生する初期費用を除けば、X-Microwaveベースのプロトタイプングにかかるコストは、多くの場合、評価用ボードでプロトタイプを構築する場合と同等になります。X-MWblocks[®]の中には、開発時間の短縮が収益性にもたらす効果を考慮するまでもなく、評価用ボードと比べて経済的なものも存在します。

謝辞

本プロジェクトを支援してくれた多くの方々に謝意を表します。特に、本プロジェクトに関する指導や本稿執筆にあたっての支援を行ってくれたSteve Ruscak氏とJeff Stevens氏に感謝します。また、実験室での作業に協力してくれたRF 担当メンターの方々、本稿の初期の構想段階に助言を授けてくれたWesley Harris氏とSydney Wells氏、有益な助言／提言を行ってくれたCarolyn Reistad氏に感謝します。



著者について

Jacob Ciolfiは、アナログ・デバイセズのアソシエート・エンジニアです。入社は2021年で、RF アプリケーションに特化した現場をローテーションする形で研修プログラムに取り組んでいます。ウースター工科大学で電気／コンピュータ工学の学士号を取得。余暇には、バレーボール、料理、旅行を楽しんでいます。