

無線通信システムの設計・検証を効率化するシミュレーション手法

Simulation technique to streamline the design and verification of wireless communication systems

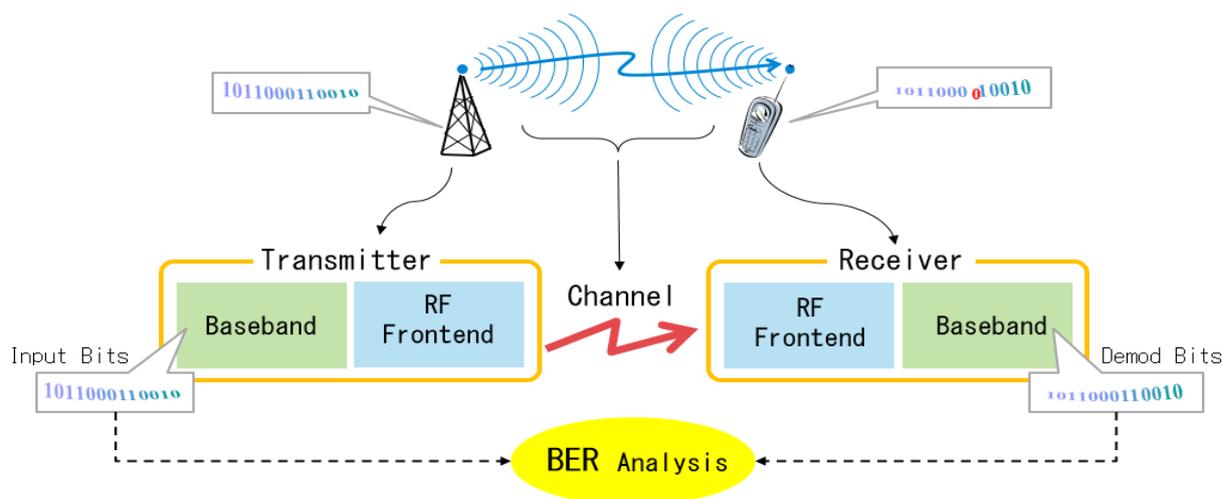
坂口 亮†

Akira SAKAGUCHI†

†キーサイト・テクノロジー合同会社

概要

急ピッチで研究・開発が進められている第5世代移動通信システムを筆頭に、近年無線通信の技術革新は目覚ましく、それに伴って無線機器の設計や開発は複雑化・多様化への対応を迫られる。コーディングや変調方式などのベースバンド部の仕様設計は勿論、RFフロントエンド部に使用される部品の性能やマルチアンテナによる送受信のアーキテクチャなど、検討が必要になる項目は増える反面、狙ったタイミングで市場に製品を投入するためには検証にかけられる時間は少なく、従来通りのやり方では追いつかなくなる恐れがある。そこで本セッションでは、設計・開発の効率化を図るために、ベースバンド部とRF部を含む通信システムの物理層全体を検証できる、システムシミュレータの活用方法を紹介する。



物理層無線通信システムの概念図

Abstract

As typified by 5G, recent technological innovation of wireless communication is remarkable. Accordingly, the design and development of the wireless equipment has become complicated and diversified. The number of items that need to be considered is increasing, but the available time is limited because of business circumstances. In this session, we introduce a system simulator that can verify the whole physical layer of the system including baseband and RF. By this, design and development efficiency is expected to be improved.

1. はじめに

無線通信機器に使用される高周波デバイスの回路設計に、回路シミュレータが使用されるのはごく普通のことになってきている。一方で、送信機や受信機全体の設計をする際にシステムシミュレータを積極的に利用する向きは未だ少ない。しかしながら、従来通り「ベースバンド、RF それぞれの担当者に仕様を渡せばその通りの物が出来てくるから大丈夫」と高を括ってよいものだろうか。昨今の通信方式の高度化・複雑化に伴い、システム（ここでは物理層のベースバンドと RF から成るシステムを指す）に使用される部品点数が増加したり、アーキテクチャが複雑化するなど、システム開発の成功を阻害する要素は増える一方である。そこで本稿では、無線通信機器のシステム設計・開発にシステムシミュレータを利用することのメリットを述べる。これまでシステムシミュレータに馴染みの無い方々にもそれを利用するモチベーションを持ってもらえれば幸いである。

2. ビヘイビアモデル

システムシミュレーションでは、システムに含まれる送信機や受信機に使用されるアンプ、フィルタ、ミキサといった各種デバイスをモデル化する必要があるが、その際に“ビヘイビアモデル”と呼ばれるモデルを用いる。ビヘイビアモデルは、デバイスの内部（回路）構造などは考慮せず、単純に入力に対する出力の特性を、数式や数値により再現しようとするものである。

詳細な回路モデルはデバイスの特性を精度良く再現するが、回路規模が大きくなるとシミュレーションに要する時間が非常に長くなるため、システム全体の解析には不向きである。対してビヘイビアモデルは、各デバイスの特性をどれだけ再現できるかはモデルが採用している数式の妥当性やパラメータの設定に依存するが、大規模なシステムであっても高速にシミュレーションできるのが最大の利点となる。本稿でのシミュレーション例は全て SystemVue を使用した。SystemVue も全てビヘイビアモデルを使ったシステムシミュレータの一つである。

3. ベースバンド部のシミュレーション

送信機のベースバンド部は、誤り訂正やインターリーブなどデータを符号化する部分と、データから波形を生成する（データから変調シンボルを生成、シンボルを多重化、ベースバンドフィルタによる波形成形など）部分から構成される。受信機の場合はこれらの逆のプロセスとなる。

ベースバンド部のシステムシミュレーションでは、

時系列のデータの変化や変調波形そのものを正しく取り扱うため、時間ドメインのシミュレーションが適している。今回使用したシミュレータのベースバンドシミュレーションも、時間ドメインのシミュレーションエンジンを採用している。

効率の良い設計・開発のためには、自身の開発要素以外のことに時間を割かないのが肝要である。即ち、既存の符号化アルゴリズムや変調などがシミュレータ上にモデルとして搭載されている場合、それを使用すればわざわざそういったモデルを基本的なパーツの組み合わせで自作し、検証しなくて済む。例えば畳込みや LDPC 等の符号化／復号化を行うモデルや、パラメータを設定すれば OFDM 波形が生成できるモデルなどである。

更には規格で詳細が規定されている無線システムであれば、それに準じた送信機・受信機のモデルがシミュレータのライブラリ（オプション）として提供されていることが多いため、それをそのまま利用することで、シミュレーションにおけるベースバンド部の基礎の構築は大幅に短縮できる。例えば、LTE の送信機のベースバンド部を担当している場合を例として挙げると、シミュレータに LTE の送信機モデルがあれば、それを使って規格に準じた波形を生成できるため、とりあえず波形成形をするためのベースバンドフィルタのみ設計してしまえば、後段の RF 部の検証に必要な信号波形はすぐに使える状態になる。ここで重要なのは、こういったモデルが規格通りに作られており、ユーザがそのモデル自身の正しさを自分で検証する必要がないことである。それにより、ユーザは自身の開発要素のみに専念することができる。

規格準拠のモデルが用意されていない場合、それに相当するモデルをユーザが自作することになる。データ符号化の部分は、送信機の検証（多くの場合スペクトラムや EVM などの指標で評価される）ではあまり重要でないが、受信性能の検証、ひいてはシステム全体のスループットを評価する上では非常に重要となる。

図 1 は単純な QPSK システムのノイズに対する BER 特性を、符号化無しの場合と畳込み符号化した場合とで比較したシミュレーション結果である。畳込み符号化による誤り訂正によって、システムの性能が大きく向上していることが分かる。

誤り訂正など符号化の種類や設定は、変調方式などと合わせて方式検討を行う上で慎重に選ぶ必要がある。

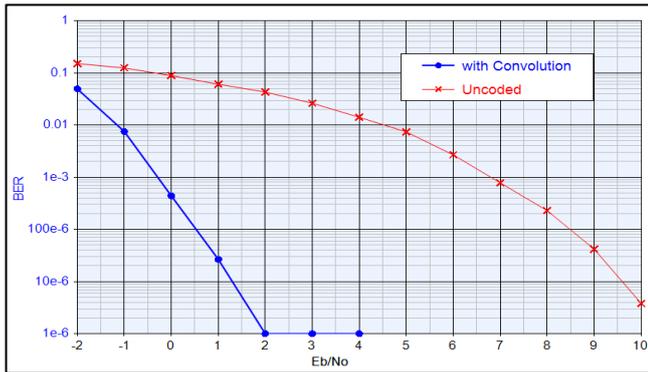


図1 QPSK システムの Eb/No 対 BER 特性

波形の生成部分に関しても同様に、様々なモデルがシミュレータ上に搭載されているので、それらを組み合わせて多くの変調波形は生成可能である。例えば先の例のような QPSK 変調波形を生成したい場合、シンボル化、アップサンプル、ベースバンドフィルタ適用といったモデルを使うことで簡単に実現できる。更には時間波形やスペクトラムに加えて、EVM を確認する機能もあれば、図 2 のような表示をさせることで ACPR と EVM のバランスを見ながら、ベースバンドフィルタのパラメータを調整する、といった作業が簡単に実行できる。

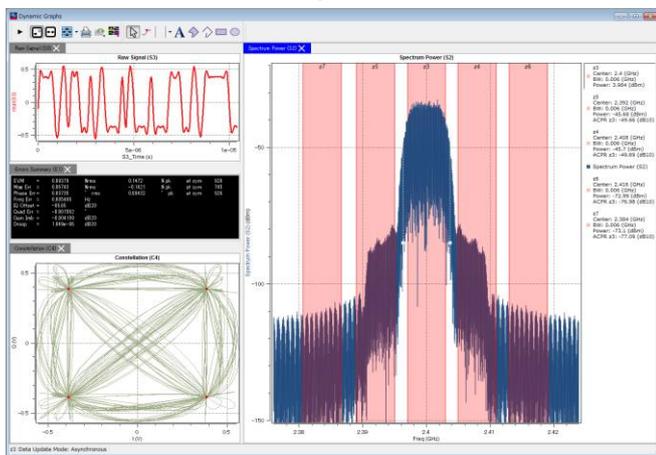


図2 EVM、ACPR などの同時観測

4. RF 部のシミュレーション

RF フロントエンド部のシステムシミュレーションでは、非線形デバイスから生じる高調波やスプリアスの影響などを広い周波数範囲に渡って検証・把握する必要があるため、周波数ドメインのシミュレーションが適している。今回使用したシミュレータの RF シミュレーション用エンジンは、アンプやフィルタといった各モデルのノードごとに、信号成分や高調波やノイズといった各成分が、インピーダンスの整合性も考慮して順方向・逆方向にそれぞれどう伝搬するかを周波数ドメインで計算する。

送信機や受信機の RF フロントエンドを設計する場合、回路の各段において利得などの諸特性がどう変化するかを確認しながら、全体の回路構成を検討する必要がある。このような、回路の各段に対する特性値をプロットしたものをレベルダイアグラムと呼ぶ。レベルダイアグラムの作成にスプレッドシートを利用する方法もあるが、回路構成の変更や非線形デバイスへの対応が難しかったり、作成者以外のメンバが修正・メンテナンスするのが難しい、といったことが問題になりがちである。そこで、レベルダイアグラムの作成にもシステムシミュレータの利用を推奨する。図 3 はある送信機 RF 部の Cascaded Gain と Cascaded Noise Figure のレベルダイアグラムをシステムシミュレータで表示させたものである。この他にも様々な指標を同じグラフ上に表示させることができる。このシミュレータではグラフの横軸にあるデバイスのアイコンから、各デバイスのパラメータが直接編集できるので、グラフを見ながらパラメータを調整して、システム性能を最適化できる。



図3 送信機の Gain と NF のレベルダイアグラム

RF 部の性能が要求仕様を満たし、かつ過剰なマージンを持たないように設計するためには、使用するモデルは可能な限り正確な（実デバイスの特性に合致する）ものが良い。例えば、RF 部に使用されるデバイスの内のいくつかは既存のもので、実際に測定できるのであれば、その結果を直接取り込むのが現実的である。測定結果が S パラメータとして入手可能であれば、該当するモデルを S パラメータのファイルに置き換えることができる。S パラメータはデバイスのポート間の通過及び反射特性を表せるビヘイビアモデルの一種で、ネットワークアナライザで測定したものをファイル化できる他、回路シミュレータで生成することもできる。同様に、X パラメータ（S パラメータに非線形特性や入力電力依存性も含めたもの）のファイルを使用することで、アンプ等の非線形デバイスも現実に即したモデルに置き換えできる。このようにして、可能な限り早いタイミング

で、シミュレーションに使用するモデルの正確性を高めていくことが、より効率のよい設計・開発につながる。

この他に RF 部の設計・開発で重要になるのがスプリアス対策である。ミリ波の使用などで周波数変換が多段になるとそれだけスプリアスも発生し易くなり、対策の難易度も上がる。スプリアスが発生する周波数やレベルだけでなく、発生箇所や伝搬経路を特定する機能を持つシミュレータを使えば、原因となるデバイスをすぐに特定して対策を講じることができる。

5. システム全体のシミュレーション

3、4 のようにしてベースバンド部と RF 部両方のシミュレーションができるようになったら、いよいよこれらを組み合わせる。今回のシミュレータでは、ベースバンド部のフローに RF 部を取り込む形でシステム全体のシミュレーションを実現している。

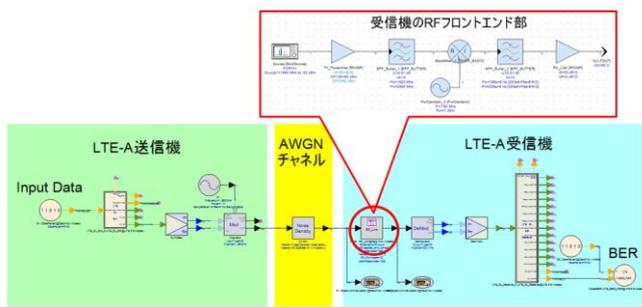


図4 ベースバンド部とRF部を統合

送信機の初段で設定したビット列と、受信機の最終段から取り出されたビット列とを比較することで、end-to-end のシステム検証（RF フロントエンド部の特性も考慮した BER の検証）が可能となる。

6. 実測定への展開

実際の機器の試作が開始され、ハードウェアが完成すると、測定器を用いた実測で性能を検証するのが通常である。送信機の性能を測るにはシグナルアナライザ、受信機の性能を測るにはベクトル信号発生器などを使用することが多いが、これまでのシミュレーションで検証に使用した信号波形や解析アルゴリズムと異なる試験系で実測を行うと、問題が発生した際の原因特定や、修正後の結果予測が難しくなることが懸念される。そこで、実測定にもシステムシミュレータを利用することで、これまでのシミュレーションと実測定とが一連の検証となり、測定結果をシミュレーション条件の修正に反映させ易くなる。具体的には、シミュレータ上の送信機部分から取

り出した波形データをベクトル信号発生器にダウンロードして使用したり、アナライザでデジタル化した波形をシミュレータに取り込み、シミュレータ上の受信機で解析する。

このような手法を用いることで、試作ハードウェア検証時のトラブルシュートも効率良く行うことができ、開発を更に加速させることができるだろう。

7. 大規模アレイのシミュレーション

現在、5G 向けに大規模なフェーズドアレイを用いたシステムの研究・開発が盛んである。フェーズドアレイを構成するアンテナ、アンプ、位相シフタ等の各デバイス特性がシステム性能に及ぼす影響は大きいですが、個々のデバイス特性からそれを押し量ることは難しく、やはりシステムシミュレーションによる検証はかかせない。最近は大規模なフェーズドアレイによるビームフォーミングのシミュレーション機能を追加されたシミュレータも増えて来ている。下図は 8x8 (64) エレメントの正方アレイでビームフォーミングした際のアンテナパターンと、アレイの各ブランチにあるアンプが歪むことで AM-PM 変換が起こり、ビーム形状（アンテナパターン）が崩れている場合のパターンをシミュレーションし、3D プロットしたものである。

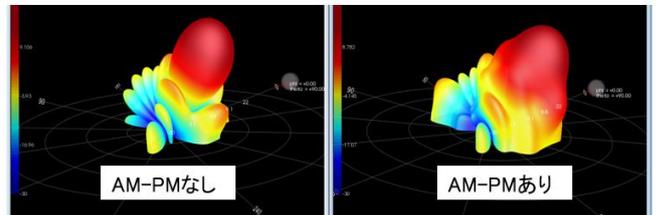


図5 アンプの歪みによるビームパターン変化

計算されたパターンからメイン/サイドローブやスルルのレベル及び角度を取得することは勿論、こういったアレイを送受信システムに組み込んでシステム特性を見ることで、デバイスがシステム性能に与える影響を早期に予測することができる。

8. まとめ

以上で見てきたように、システムシミュレータを活用することで、ベースバンド部とRF部の両方を考慮したシステム解析が早期に実現でき、無線通信システム的设计・開発を効率良く進められることが期待される。