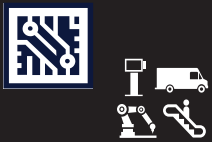


Keysight Technologies

NB-IoTシステムのモデリング シンプルでも簡単とは限りません

デバイスや
モノの



シミュレー
ションが
必要なのは



クラウド
より前



White Paper

概要

この記事では、新しいNB-IoT(狭帯域IoT)システムのモデリングと評価を、統合型マルチドメインシミュレーション環境で行う方法を紹介します。通信システムには複雑なアナログ/デジタルコンポーネントが使用されるため、システム動作を理解するには正確なモデリングが不可欠です。現実的なモデリング例に対して新しいシミュレーション手法を使用して、RFトランシーバー、高度なモデムテクノロジー、理想的でないハードウェアの詳細な解析を行います。

著者： Sangkyo Shin
キーサイト・テクノロジーズ・インク

NB-IoT規格について

新規格の開発

規格の必要性が明らかになると、専門家のグループからなる技術委員会が設立され、予備提案の議論と交渉が行われます。作成された草案は、より広い範囲のメンバーに配布されて、意見が求められ、最終的に承認されます。提案について、適用範囲、主要な定義、内容などのすべての要素が交渉されます。規格の開発を迅速化し、ハードウェア実装のコストを削減するために、新しいテクノロジーの研究ではシミュレーションソフトウェアがますます活用されるようになっていきます。

狭帯域IoT、すなわちIoT(Internet of Things)をターゲットとする、移動体通信をベースにした新しい狭帯域テクノロジーの標準化は、2014年に3GPPの検討項目として始まりました。最初のバージョンは、2016年6月に、グローバル3GPP規格のリリース13の一部として公表されました。この規格は以下を目標としています。

- 屋内カバレッジの向上
- きわめて多数の低スループットデバイスのサポートの強化
- 遅延による影響の低減
- デバイスの消費電力の低減
- 超低コストのデバイス
- LTEエアインタフェースおよびネットワークに基いて最適化されたネットワークアーキテクチャー

NB-IoT仕様はリリース13の後も進化を続ける見込みで、新しい5GのNB-IoT規格ではマルチキャストや位置決めがサポートされる予定です。

物理層仕様

3GPP TS 36.211リリース13、V13.2.0(2016-06)では、狭帯域IoTの物理チャネルおよび変調仕様を規定しています。新しいデバイスカテゴリーのCat-NB1は、数10 kbpsの速度と、200 kHzのチャネル帯域幅をサポートしています。このリリースの前のeMTC(enhanced Machine Type Communications)データレートでは、カテゴリーM1(Cat-M1)の1.4 MHzの帯域幅で最大1 Mbpsの可変レートがサポートされていました。

狭帯域物理アップリンク共有チャネルでは、2種類のサブキャリア間隔(15 kHzと3.75 kHz)を選択できます。3.75 kHzを使用する追加オプションにより、建物の奥の部分など、信号強度が制限される厳しい条件の場所にも到達できるカバレッジが実現されます。データサブキャリアは、バイナリー位相シフトキーイング(BPSK)および4相位相シフトキーイング(QPSK)で変調され、位相回転はそれぞれ $\pi/2$ および $\pi/4$ です。リソースユニットのサブキャリアの数としては1、3、6、12を選択でき、シングルトーンとマルチトーンの両方の伝送がサポートされています。

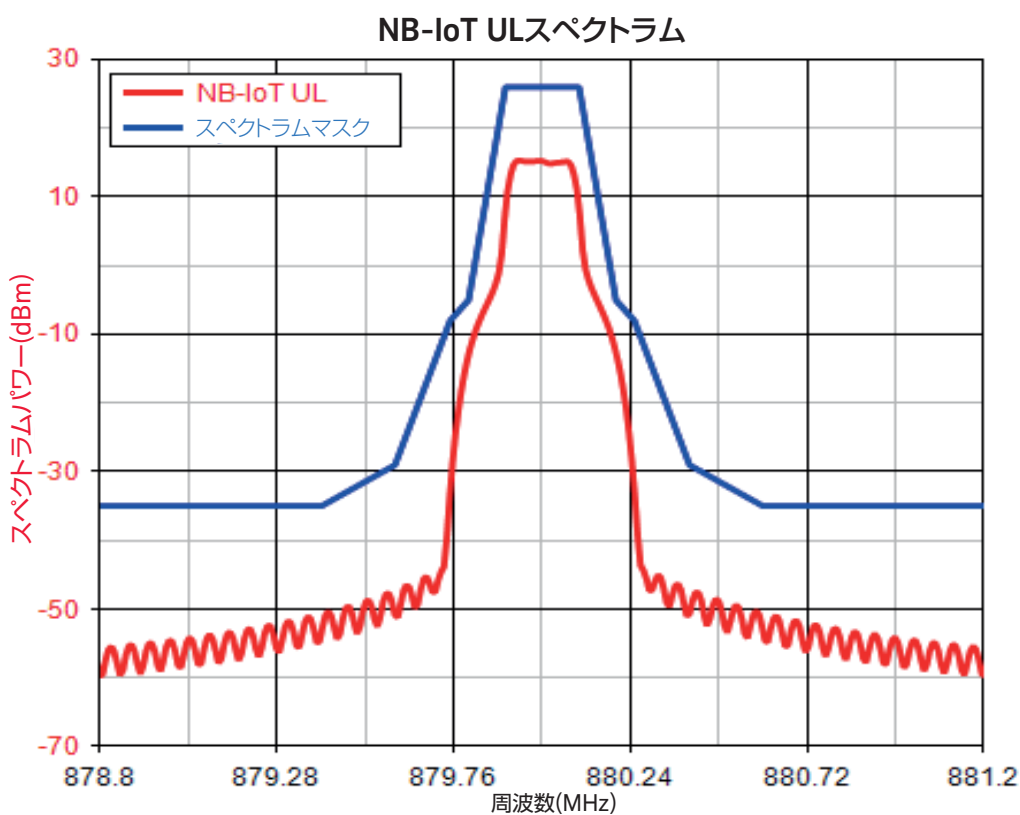


図1. NB-IoT UL伝送信号の例(15 kHzのサブキャリア間隔、NPUSCHフォーマット、1,12サブキャリア、スペクトラムマスク(青))。

狭帯域ダウンリンクの物理リソースブロックには、15 kHz間隔の12個のサブキャリアがあり、伝送帯域幅は180 kHzです。サポートされる変調方式はQPSKのみです。デバイスでのダウンリンク伝送のデコードの複雑さを減らすために、ターボコードは使用されず、代わりにtail-bitingコンボリューショナルコード化方式が使用されています。

無線送信／受信

スペクトラムリソースを効率的に利用するために、NB-IoTでは、3つの異なる動作モード(スタンドアロン、インバンド、ガードバンド)が定義されています。スタンドアロンはGSM搬送波をNB-IoT搬送波で置き換えることが目的ですが、インバンド動作は通常のLTE搬送波内のリソースブロックを利用します。ガードバンド動作は、LTE搬送波のガードバンドを使用します。

LTEサービスプロバイダーにとっては、インバンドオプションが最も効率的なNB-IoTの配備方法です。例えば、IoTトラフィックがない場合は、NB-IoT搬送波用の物理リソースブロック(PRB)を、他の目的に利用することができます。これは、NB-IoTが既存のLTEインフラ内に完全に統合されているからです。これにより、基地局スケジューラは、同じスペクトラムにLTEとNB-IoTのトラフィックを多重化できます。

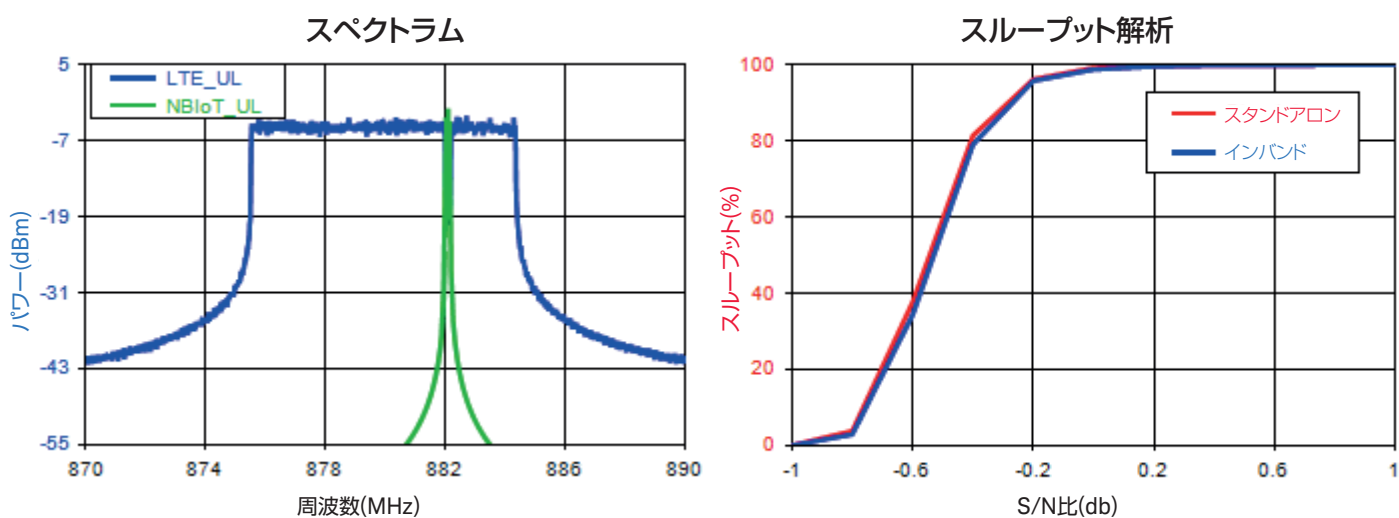


図2. インバンド動作のアップリンクの共存解析。ビクティムとしてLTE(10 MHz)、アグレッサーとしてNB-IoTデバイスが存在します。2つのスペクトラムトレース(左)は、意図的に分けられており、同じプロット内に重ねて表示されています。合計1,000個のLTEサブフレームがスループット解析(右)のために送信されました。

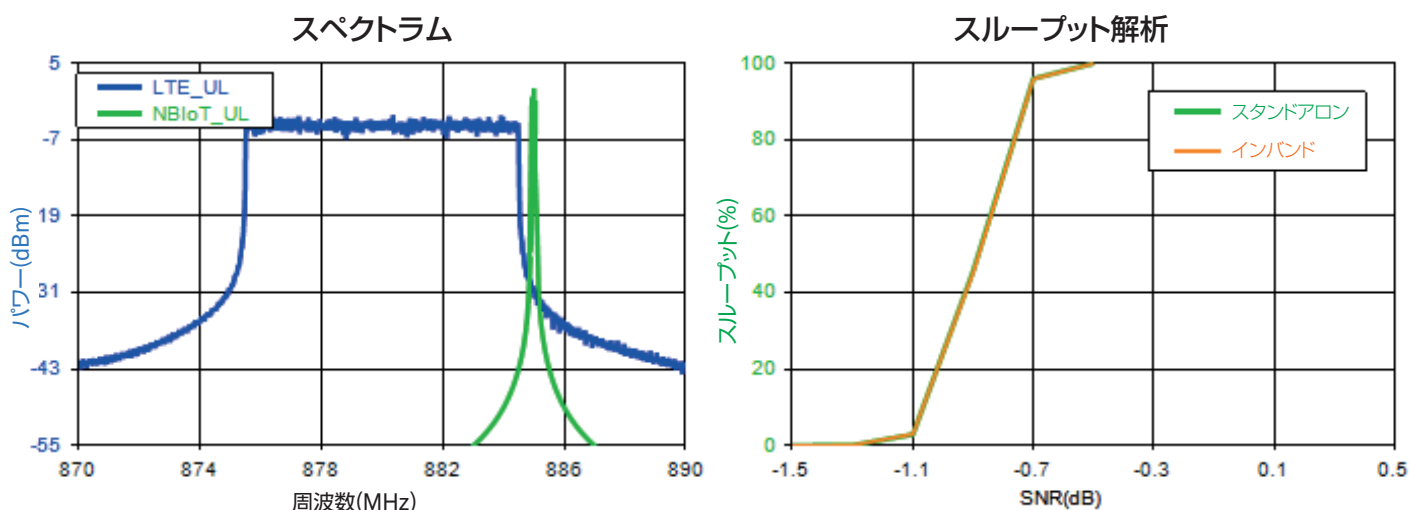


図3. ガードバンド動作のアップリンクの共存解析。ビクティムとしてLTE(10 MHz)、アグレッサーとしてNB-IoTデバイスが存在します。2つのスペクトラムトレース(左)は、意図的に分けられており、同じプロット内に重ねて表示されています。合計1,000個のLTE送信サブフレームがスループット解析(右)のために送信されました。

さまざまな動作シナリオによるNB-IoTとLTEの共存シミュレーションは、3GPPの標準化に深く関わっている企業にはなじみ深いものです。図2と図3に示す例は、インバンド動作モードとガードバンド動作モードで、LTEシステムをビクティム、NB-IoTをアグレッサーとしたシナリオの結果を示しています。NB-IoTのダウンリンクのサブキャリアがLTE PRBと直交し、両方が同じ基地局から送信されることを考慮して、共存の評価はアップリンクの場合でのみ行われました。シミュレーション環境は、キーサイトのSystemVue通信物理層シミュレーションソフトウェアとLTE-Aリファレンスライブラリを使用して構築されました。

シミュレーション結果は、各社のモデリング方法の違いによって異なる可能性があります。違いの原因としては、パワーリーク、変調、フィルタリングなどの要因が考えられます。ただし、前ページの3GPP TR 36.802 V13.0.0シミュレーションの例から得られる基本的な結論は、NB-IoTがLTEと共存できるということです。以下の結果が得られました。

- スループットの低下は5 %未満です。
- NB-IoTは最初の隣接LTE PRBに対して多少の干渉を及ぼしますが、他のPRBに対する干渉は無視できるか許容範囲内です。
- ガードバンド動作のほうがインバンド動作よりも共存性能は多少優れています。

ハードウェアに関する検討事項

デザインの側面

NB-IoT仕様には、デザインに関していくつかの目標があります。例えば、小規模な散在するデータ伝送によるカバレッジエリアの拡大、デバイスのバッテリー寿命の延長、デバイスコストの削減などです。ピーク・データ・レート要件を下げることで、レシーバチェーンで単純な無線/ベースバンドプロセスを使用できます。NB-IoTは半2重動作なので、通常のLTEタイプのデバイスの全2重フィルタを単純なスイッチで置き換えることで発振器の数を減らすことができます。ダウンリンクでターボコードの代わりに簡素化されたコンボリューション・チャンネル・コード化を使用して、ベースバンド・デコード・プロセスの複雑さを低減できます。

開発プロセスでは、低コストと低消費電力というデザイン目標を達成するために、多くの努力が注ぎ込まれています。現時点での主なアーキテクチャー候補に、ゼロIFレシーバと低IFレシーバがあります。これらは、アナログフロントエンドとデジタルベースバンド信号処理を1個のチップに統合したものです。ただし、これらのアーキテクチャーにはそれぞれ構造上の課題があり、検討が必要です。ゼロIFレシーバの場合、LOリークageおよび自己ミキシングから時間変動するDCオフセットが生じ、必要な信号が劣化します。低IFレシーバの場合、ハードウェアの理想からのずれによって、I/Q信号経路の振幅と位相の不整合が生じます。これにより、干渉信号からリークageが生じて必要な信号が劣化します。これらのアーキテクチャーの欠点について理解を深めるために、シミュレーションソフトウェアでシステムモデルを使ってアーキテクチャーを調べてみます。

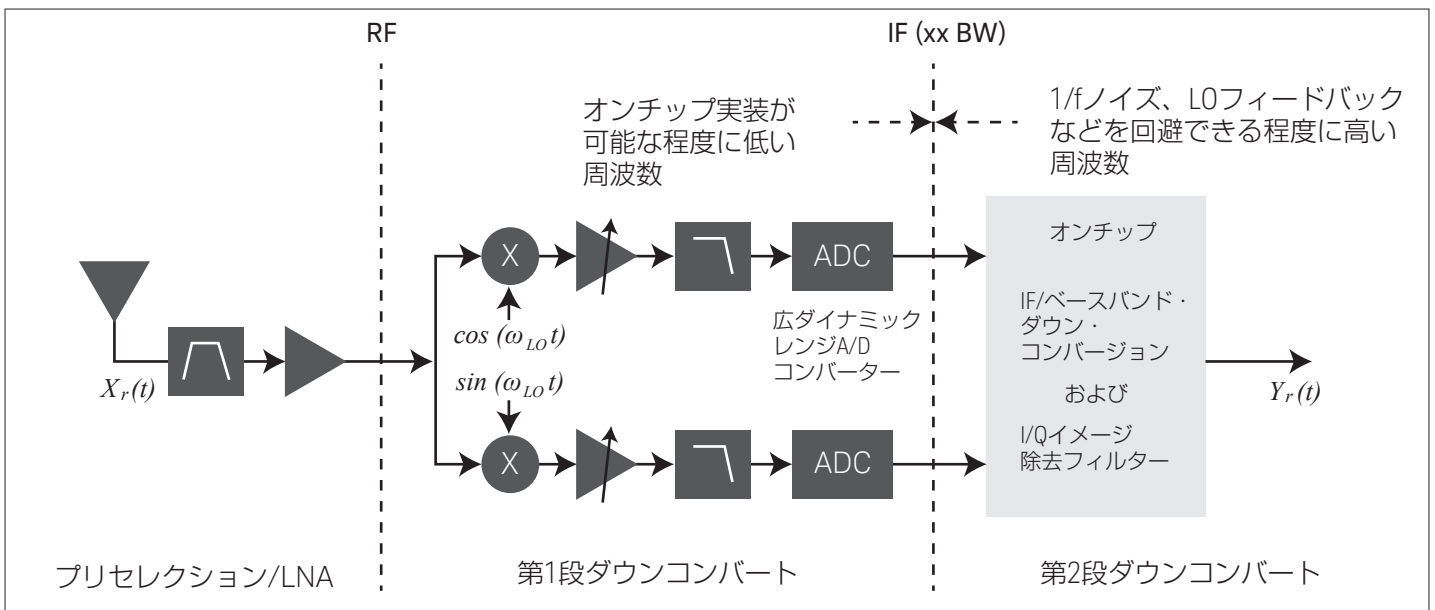


図4. 低IFレシーバアーキテクチャー。

図4に示す一般的な低IFレシーバアーキテクチャーでは、アンテナで受信された無線周波数信号がバンド選択フィルタでフィルタリングされ、低雑音増幅器で増幅されます。RF信号は直交復調器によって低IFのI/Q信号にダウンコンバートされます。この信号は、同相信号と直交位相信号によって表されます。中間周波数(IF)信号は、ローパスフィルタ(LPF)を通過した後、ADCでサンプリングされます。ADCでのサンプリングと変換の後、デジタル化されたIF信号はベースバンドにダウンコンバートされ、デジタルI/Q信号になります。

このアーキテクチャーでは、それ程低くない中間周波数を使用することにより、ゼロIFレシーバで生じやすいDCオフセットと1/fノイズの問題を回避しています。ただし、このためにイメージ応答の問題が再び生じます。イメージ応答の除去はLNAの後で行うことができますが(図4)、そのためには狭帯域のフィルタリングが必要なので、デバイスの複雑さとコストが大幅に上昇します。このイメージ応答の問題に対処するために、I/Qミキシングを使用してその後で低IFレシーバ内でフィルタリング手法を用いる方法があります。

図5は、低IFアーキテクチャーのモデリングの例で、理想的でないハードウェアのさまざまな影響が含まれています。必要な信号と干渉信号は、図の左側に示されているように、どちらも複素エンベロープ・データ・フォーマットで作成されて結合されます。中央にある直交位相復調器ブロックは、I/Qの不整合動作をモデル化したものです。復調された信号は、上と下の経路に分かれ、ローパスフィルターを通過後、デジタルドメイン信号に変換されます。右側では、デジタルドメイン信号に対してI/Q不平衡補正の処理が行われ、エラーベクトル振幅(EVM)が計算されて、補正の前後が比較されます。

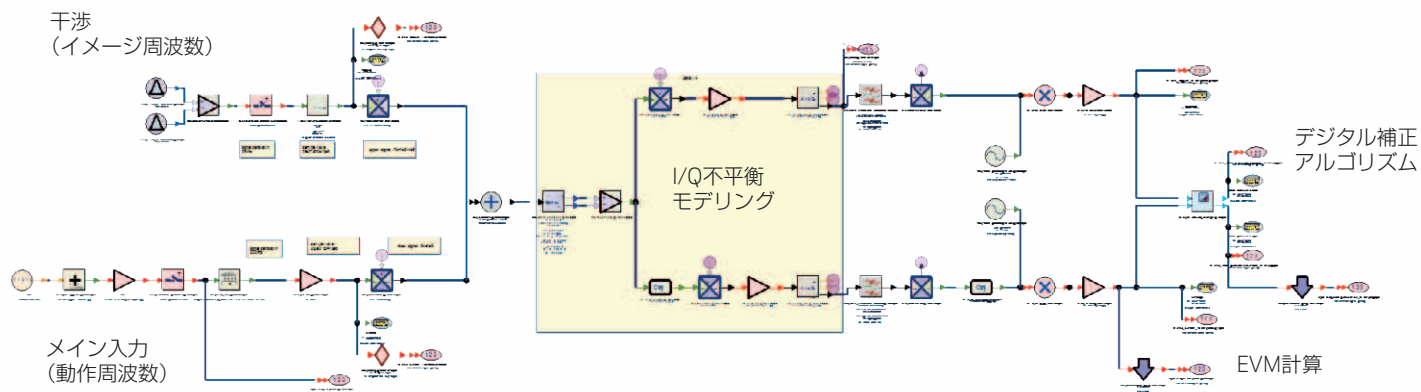


図5. 低IFレシーバーのI/Q不均衡補正のシミュレーションセットアップ。

デバイスの回路レベルデザインを行う前の、このようなエレクトロニック・システム・レベル(ESL)デザインとシミュレーションは極めて重要です。シミュレーション環境では、以下の効率的な機能がサポートされている必要があります。

- アナログ/デジタル信号処理
- タイムドメインと周波数ドメインの動作の組み合わせ
- 適応パラメータ更新による動的シミュレーション
- ハードウェアの不完全性のモデリング
 - 非線形性(PA)
 - 群遅延(フィルター)
 - 位相雑音(発振器)
 - 周波数オフセット
 - I/Q不整合(変調器/復調器)
 - ジッタ
 - アクティブコンポーネントの量子化効果

このケーススタディーでは、キーサイトのSystemVue通信物理層シミュレーションソフトウェアを使用しました。

RFシステム・オン・チップ法

NB-IoTアプリケーションの厳しい予算条件をクリアし、サービスの配備を成功させるには、低コストのシングルチップ製品の開発が必要です。パワーアンプとアンテナスイッチを集積化することにより、フロントエンドのRFコンポーネント数が減り、ルーティングが簡素化されます。また、プリント回路基板(PCB)の必要面積を小さくすることもできます。シングルトーン伝送の採用により、ピーク対アベレージ比(PAPR)が小さいPAが使用可能になります。このような手法を用いてシステムレベルのRFチップにパワー効率の高いオンチップPAを組み込んで、飽和領域の近くで動作させれば、出力パワーを最大化することができます。

集積型オンチップPAと外部PAの選択にはトレードオフがありますが、ここでは、RF/ベースバンドのクロス・ドメイン・シミュレーション手法を使用して、NB-IoTアップリンクにおける非線形PAのEVMによる影響を解析します。図6のシミュレーションセットアップを考えます。ベースバンド信号は、SystemVue LTE-Aライブラリを使用して作成されます。このライブラリは、シングルトーンとマルチトーンの両方の伝送をサポートしています。ベースバンド信号を2つのデジタルフィルターでフィルタリングしたものが変調器に供給され、これによって、搬送波周波数を中心にしたスペクトラムが作成されます。次に、信号は増幅器のビヘイビアモデルによって増幅されます。PAのリニアリティーは、1 dB圧縮ポイント(P1dB)によって設定されます。PAで増幅された信号はレシーバーで復調されて、そのEVMが求められます。EVMとPAのP1dBの関係をシミュレーションで求めることにより、PAの非線形効果が伝送信号の品質に及ぼす影響を評価できます。

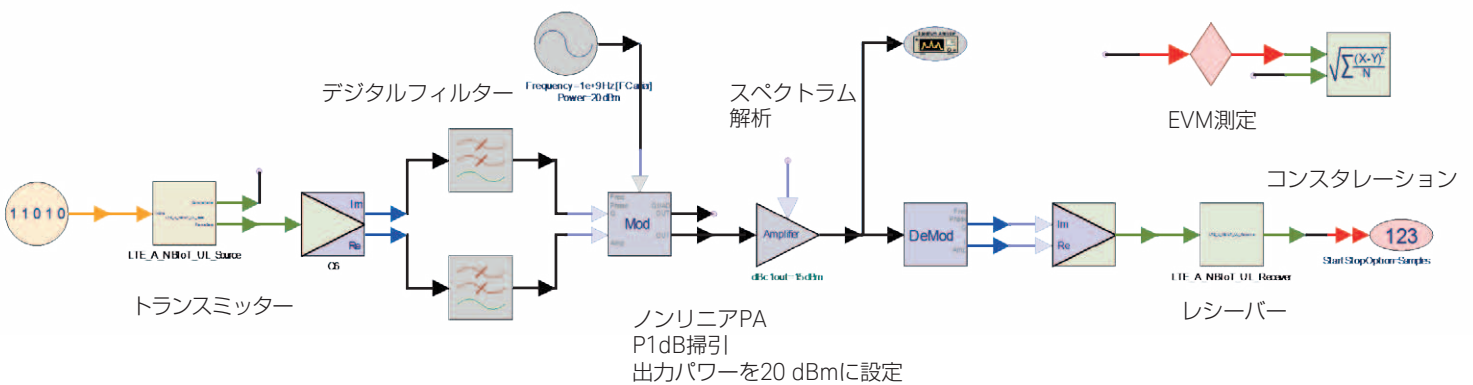


図6. NB-IoTアップリンクのシミュレーションセットアップ。

シングルトーン伝送の場合、EVMの値は非常に小さくなります(サブキャリア間隔が3.75 kHzの場合は0.08 %未満、15 kHzの場合は0.9 %未満)。したがって、シングルトーンのサブキャリア間隔の場合、PAの非線形性がEVMに与える影響は小さいと判断できます。

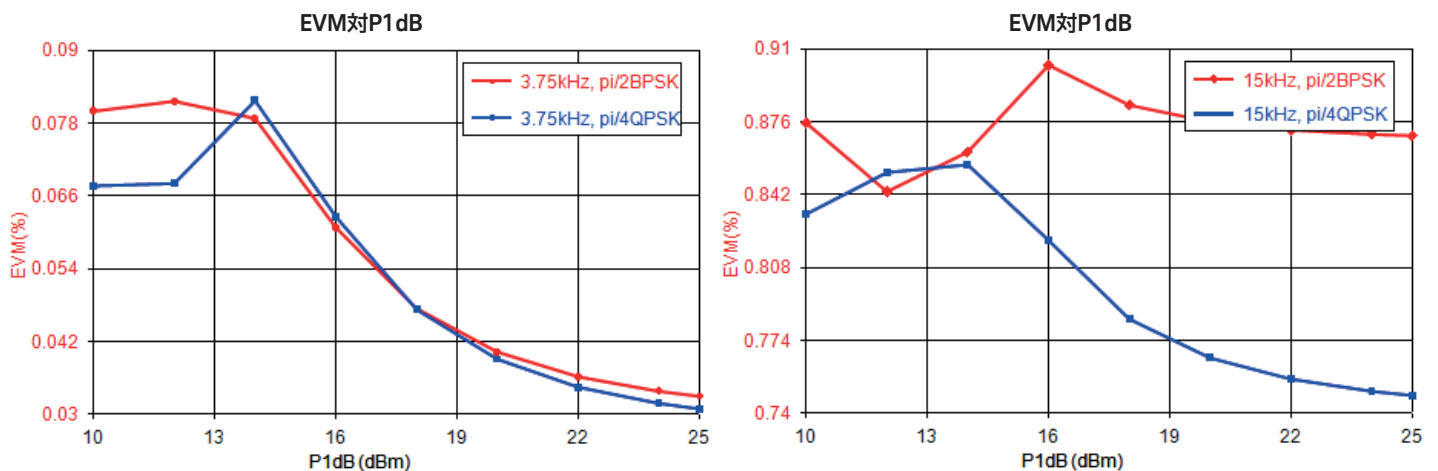


図7. PAがバックオフ動作したときのEVMとP1dBの関係。シングルトーン伝送でサブキャリア間隔が3.75 kHz(左)と15 kHz(右)の場合。200 kHz帯域幅のデジタルフィルターを使用しています。PAの入力パワーは20 dBmで、利得はシミュレーションのために意図的に0 dBに設定されています。

シミュレーションによると、信号のトーン数が3、6、12の場合のPAPRIは、それぞれ4.8 dB、5.7 dB、5.6 dBです。図8からわかるように、PAのP1dBが減少するほど、EVMは大幅に増加します。これより、マルチトーン伝送の場合、PAの非線形性はEVMに悪影響を与えると判断できます。

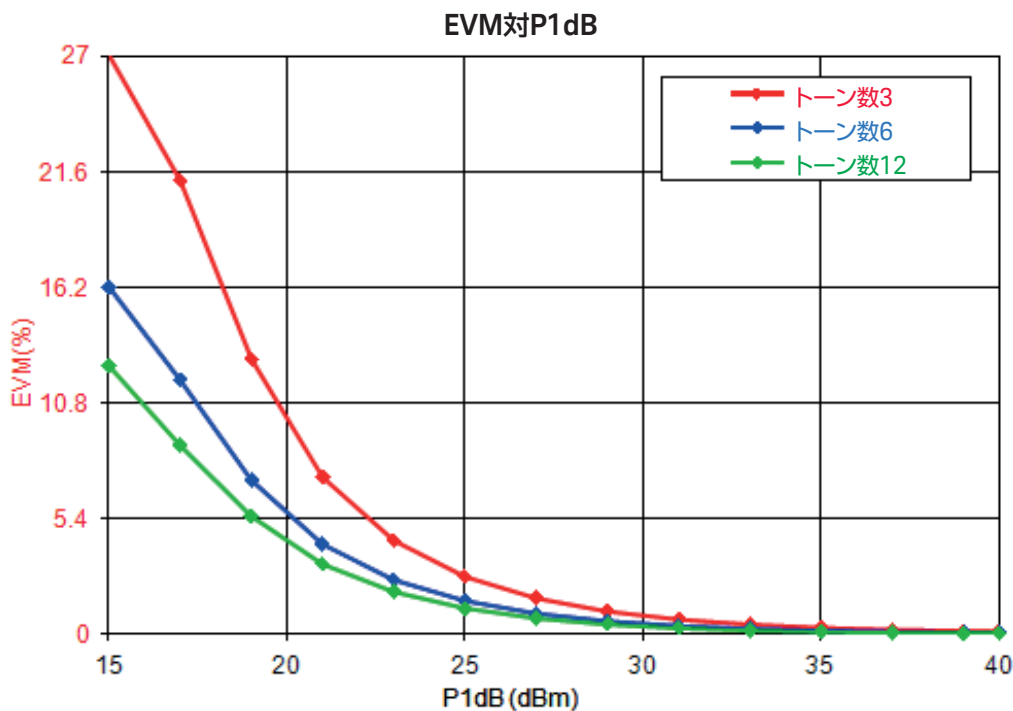


図8. PAがバックオフ動作したときのEVMとP1dBの関係。マルチトーン伝送でサブキャリア間隔が15 kHzの場合。デジタルフィルタはバイパスされています。PAの入力パワーは20 dBmで、利得はシミュレーションのために意図的に0 dBiに設定されています。

このシミュレーションから、シングルトーン伝送の場合はチップ内のPAPR低減回路の一部を省略可能で、チップデザインの複雑さをかなり減らせることがわかります。NB-IoTアプリケーションの主要な性質を考えれば、シングル伝送だけをサポートするデバイスとオンチップ非線形PAの組み合わせが、低消費電力と低コストの点で有利といえます。

まとめ

NB-IoTの最初の仕様は、3GPPリリース13で完成しました。その目的は、低コストのデバイスの実現、カバレッジエリアの拡大、到達距離を維持しながらバッテリー寿命を延ばすことにありました。NB-IoTアプリケーションは性能要件が低く、同じLTEインフラストラクチャーを使用するものの、これらの新製品の開発は容易な作業ではなく、正確なデザイン目標が必要です。

低コストのデバイスを開発するには、さまざまなトランシーバートポロジ、コンポーネント集積化手法、選択したシステム仕様の性能評価を検討する必要があります。プリシリコンプロセスでは、高度なシミュレーションツールを使用して、仮想環境でデバイスをテストする必要があります。これはポストシリコン検証でも同じです。この記事では、キーサイトのSystemVueによるNB-IoTのプリシリコンシミュレーションの例と方法について解説しました。

次世代の専門知識を活用

キーサイトのソフトウェアには、専門知識に裏付けされたノウハウが凝縮されています。キーサイトは初期のデザインから最終製品の出荷に到るまでに必要となるツールを提供し、解析データが有用な情報へ、さらに設計上の知見となることを加速させ、デザインサイクルの効率化に貢献します。

- エレクトロニック・デザイン・オートメーション(EDA)ソフトウェア
- アプリケーションソフトウェア
- プログラミング環境
- ユーティリティソフトウェア
- プロダクティビティソフトウェア



詳細については、以下のウェブサイトをご覧ください。

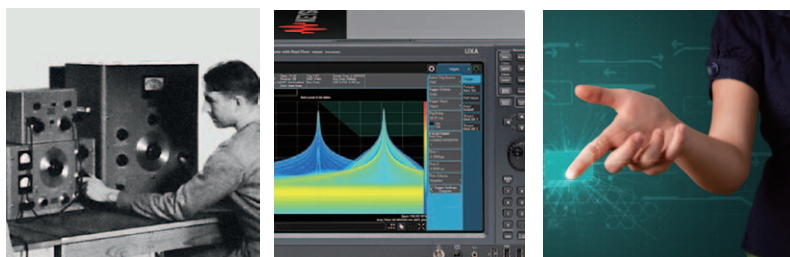
www.keysight.co.jp/find/software

まずは、30日間の無料試用版をお試しください。

www.keysight.co.jp/find/free_trials

進化

キーサイト独自のハードウェア、ソフトウェア、スペシャリストが、お客様の次のブレイクスルーを実現します。キーサイトが未来のテクノロジーを解明します。



ヒューレット・パッカードからアジレント、そしてキーサイトへ

myKeysight

myKeysight

www.keysight.co.jp/find/mykeysight

ご使用製品の管理に必要な情報を即座に手に入れることができます。

キーサイト・テクノロジー合同会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

計測お客様窓口

受付時間 9:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL ☎ 0120-421-345 (042-656-7832)

FAX ☎ 0120-421-678 (042-656-7840)

Email contact_japan@keysight.com

ホームページ www.keysight.co.jp

記載事項は変更になる場合があります。
ご注文の際はご確認ください。