

5G、計測器、ADEFで利用可能な 広帯域対応のレシーバー

著者: Brad Brannon、Steve Dorn、Vandita Pai Raikar
Analog Devices, Inc.

はじめに

はるか昔から、無線に携わる設計者にとっては、利用可能な帯域幅に限界があることが大きな課題でした。当初は、高い周波数に対応できる検出器を実現できないことから、数百kHz以上の周波数には価値がないと考えられていました。その後、Branly氏、Fessenden氏、Marconi氏など、多くの先駆者がこの問題に取り組んできました。そして、Armstrong氏やLevy氏により、ようやくヘテロダイン方式が完成しました。当時の技術で実現可能な検出器によって適切に処理できる周波数までダウンコンバートを実施することにより、高い周波数領域にも利用価値が生まれたのです。しかし、スーパーヘテロダイン方式によって更に高い周波数が使用できるようになっても、やはり、帯域幅は制約事項として存在し続けました。

近年まで、数十MHz以上の周波数を処理の対象にすることは困難でした。それに向けたソリューションの多くは、無線技術に大規模な並列化を適用した高価なものでした。それらを簡素化し、できるだけ多くの帯域幅を同時に処理できる方法が長い間望まれてきました。その種の技術は、半導体プロセスやモノリシック型A/Dコンバータ（ADC）のアーキテクチャが成熟することによって、この数十年の間に徐々に進化を遂げています。1990年代の初頭には、十分な技術は開発されていません

でした。そうした初期の段階から現在までの間に、ADCによるダイレクトRFサンプリングの能力は大きく向上しました。約20MHzだったナイキスト帯域幅は、「AD9213」のような製品では5GHz以上にまで達しました。

広い瞬時帯域幅に対応するAD9213は、計測器グレードのレシーバーだけでなく、ダイレクトRFサンプリングを使用する無線システム、SIGINT（Signals Intelligence）、レーダーなどの分野でも、新たな可能性を切り開く存在になっています。

AD9213をはじめ、最新のADCの中には、GSPS（ギガサンプル/秒）のレベルのサンプル・レートに対応するものがあります。それらの製品には、全体的な性能に関する1つの課題が存在します。その課題は、事実上のサンプル・レートを高めるために、複数のADCコアを並列に動作させることから生じます。そうしたインターリーブ動作においては、各コアの動作タイミングとアライメントを慎重に調整する必要があります。それでも、各コア間の小さな誤差によって、多くのスペクトル・アーチファクトが生成されてしまうのです^{1, 2, 3}。また、一般的な直線性誤差（歪み）を防ぐために、ADCはアナログ入力信号を正確にトラッキングし、サンプリングとデジタル変換を適切に実施する必要があります。インターリーブと帯域幅という2つの課題により、広い帯域幅に対応する高精度のADCの設計は非常に難易度が高くなります。

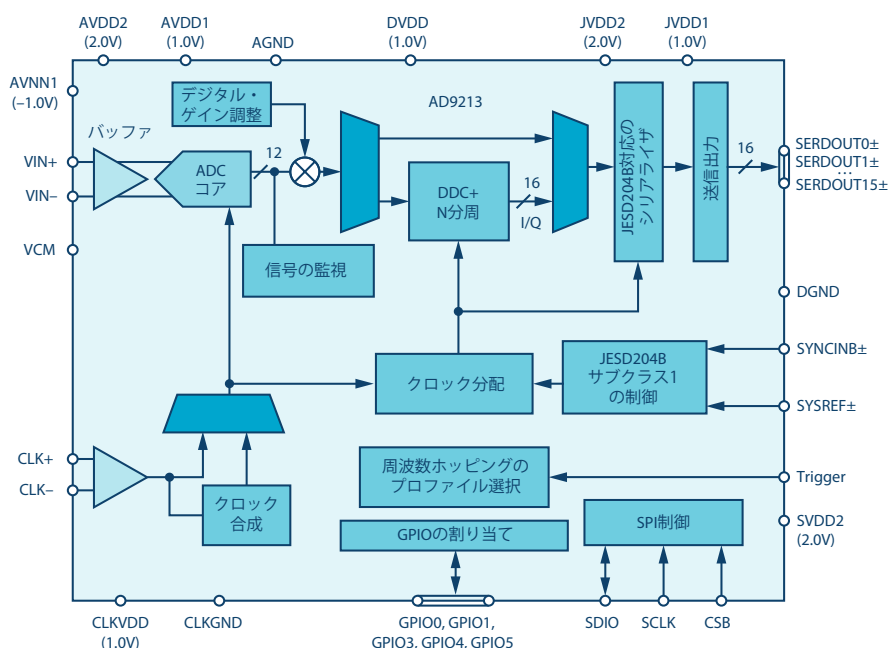


図1. 10.25GSPS、12ビットのRF対応ADC「AD9213」

しかし、そうしたADCが存在しなければ、高度な無線システムや計測システムなどは実現できないことになります。

AD9213はこのような課題に対応する製品です。ディザとキャリアブレイションの機能を搭載しており、あらゆる条件の信号に対して優れた直線性を発揮することができます。また、高い周波数における動作と性能が両立されています。4GHzの連続波入力に対するNSD（ノイズ・スペクトル密度）は約-152dBFS/Hz、SFDRは2次／3次高調波を含めて標準で65dBc以上です。これであれば、5G（第5世代移動通信システム）に関する計測に本当の意味で対応できるレシーバー性能を達成できます。

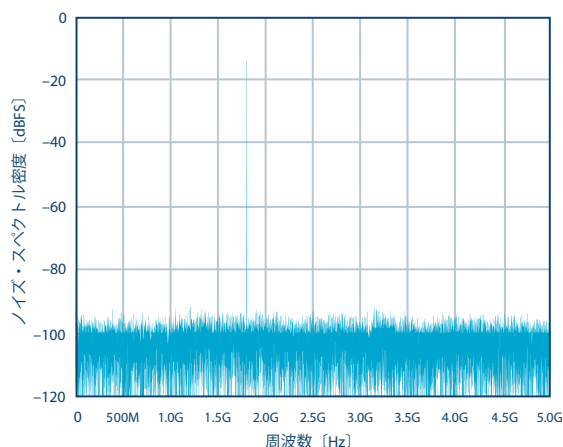


図2. シングルトーンに対する性能

AD9213では、卓越した高周波性能が得られることに加え、低次高調波はリニア・デバイスに期待される特性に近い形を示します。つまり、高調波の発生をシンプルな多項式で予測できます。これは、ADCとしては珍しい性質だと言えます⁴。信号が大きい場合にも小さい場合にも高い性能を確保することにつながるため、この性質は重要な意味を持ちます。

図3は入力レベルを掃引しながら歪みを測定した結果です。2次／3次高調波は、入力レベルに基づいて、想定どおりの応答を示します。一旦ノイズ・フロア以下に歪みの測定値が収まれば、それよりも低い入力レベルの範囲で、再び歪みが大きなレベルで現れることはありません。これは重要なことです。このことから、それらの支配的なスプリアスが帯域外に位置するように、周波数に関するプランニングを行えるからです。なお、4次以上のスプリアスは大きいものではありません。ヘテロダイン方式では、干渉を防ぐために、無線用のミキサーに伴って生じるスプリアスに対して、慎重なプランニングを行う必要があります。ダイレクトRFサンプリングについても同じことが言えます。

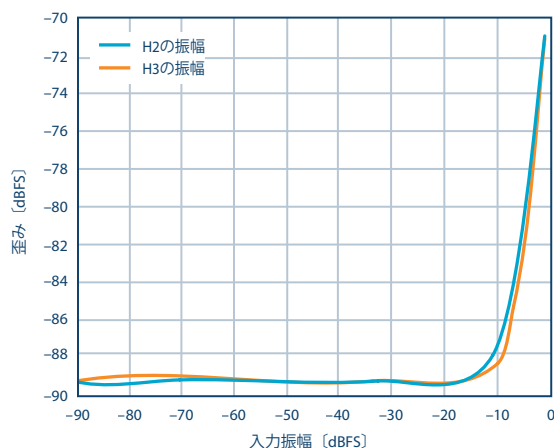


図3. AD9213の2次／3次高調波の特性

ダイレクトRFサンプリングのメリット

RFサンプリングは、他の無線アーキテクチャに代わる興味深い手法です。従来は、ADCの消費電力が、無線設計に求められる性能レベルよりも多すぎるという問題がありました。これまでの研究では、「AD9371」が採用しているようなゼロIFアーキテクチャが、低コストで低消費電力のソリューションとして常に高く評価されてきました。その証拠に、すべてのスマートフォンやBluetooth®対応機器、あるいはそれらに類似するデバイスは、ここ数年の間にゼロIFアーキテクチャを採用するようになりました。それらのシステムには、帯域幅の面で制約があります。ただ、必ずしも性能の面で限界が存在するというわけではありません。任意の狭い帯域幅を使用するシステムに対しては、ゼロIFアーキテクチャがほぼ間違いなく適切なソリューションとなります。一方、計測器、レーダー、広帯域対応の通信システムなど、任意の広い帯域幅を使用するアプリケーションにおいては、長い間、ダイレクトRFサンプリングの実用化が待ち望まれていました。それらのアプリケーションでは、システムの帯域幅を広げるためのトレードオフとして、他のアーキテクチャよりもコストがかかったり電力効率が犠牲になったりすることを、ある程度許容しても構わないと考えられています。

上記のとおり、RFサンプリング・アーキテクチャを選択する場合には、できるだけ広い帯域幅に対応し、全体的な無線性能を確保するように設計が行われます。AD9213などのADCは、10GSPSを超える非常に高いサンプル・レートと8GHzを超えるサンプル帯域幅に対応します。そのため、この種のADCを使用すれば、多様なアプリケーションでダイレクトRFサンプリングを利用することが可能になります。

多くの無線サービスでは、1バンド（帯域）に75MHz未満の周波数帯が割り当てられます。10GSPSのADCの場合、実際に使用される周波数帯はナイキスト帯域幅の2%未満です。複数の研究により、ダイレクトRFサンプリングの電力効率は、ゼロIFアーキテクチャの電力効率の約1/2になるという結果が示されています。RFサンプリングを利用すれば、無線アプリケーションの全体的な効率を高めるために、一度に複数のバンドを対象としてサンプリングを実施することが可能です。

図4に示すように、帯域幅に対する要件が厳しくなければ、IFサンプリングやゼロIFなどの従来型アーキテクチャを採用した方が、ダイレクトRFサンプリングを採用するよりも消費電力はるかに少なくなります。帯域幅が、最新のゼロIFまたはIFサンプリングによって実現できる帯域幅の2倍近くまでになった場合に、初めてダイレクトRFサンプリングの威力が発揮されます。言い換えれば、帯域幅が制限されたシステムの場合、ゼロIFまたはIFサンプリングと比べて、ダイレクトRFサンプリングは2倍以上の電力を消費し、約2倍のコストがかかります。

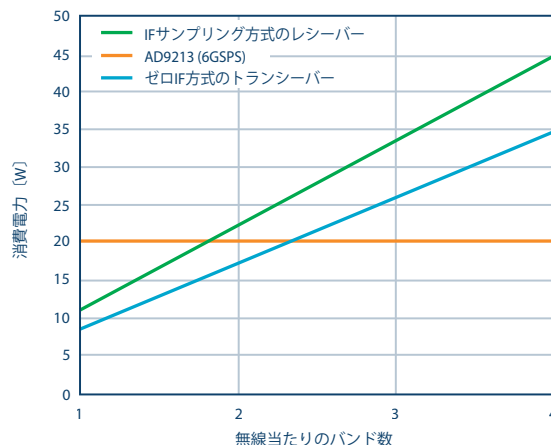


図4. 消費電力と相対帯域幅の関係。
4本の受信パスに対するアーキテクチャ別の値を示しました。

この30年間で、商用デバイスのNSDは、1年ごとに約1dB、各種学術論文のデータではそれよりもやや速いペースで向上してきました⁵。この期間に重点が置かれたのは、帯域幅やS/N比、高調波歪みといったAC性能の向上についてです。しかし、ここ数年でADCの性能は、ほとんどのアプリケーションにおいて十分に高いと言えるレベルに達しました。現在では、重点項目が、AC性能から消費電力やチップの面積（コスト）へとシフトしつつあります。

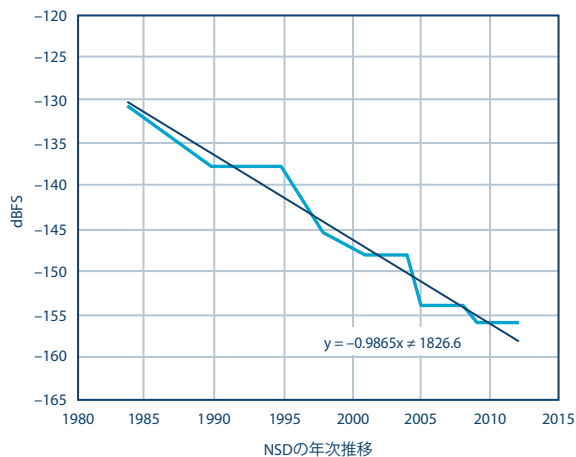


図5. 高速ADCのNSD。

約30年間にわたる性能向上の推移を示しました。

図6は、サンプル・レートを横軸に、性能指数（FOM：Figure of Merit）を縦軸にとったグラフです。時の流れと共に、ますます高速なADCが開発されています。時系列のある時点において、最前線の技術を適用したデバイスは、サンプル・レートの面で最先端になる傾向にあります。これまで、そうしたデバイスは消費電力や性能指数の面でも優れていました。最前線の技術によって、あるサンプル・レートが達成されると、続いてはそのサンプル・レートを維持しつつ性能指数を改善した新しいデバイスが開発されます。それは、最前線のアーキテクチャを採用した場合の消費電力の削減、ダイ・サイズの縮小、コストの低減につながります。Murrmann教授の最新のデータ・セットによると、AD9213は技術的な最前線のすぐ内側に位置しています。このクラスのADCは、今後、更なる低消費電力化などのメリットを提供するようになるはずだということです。

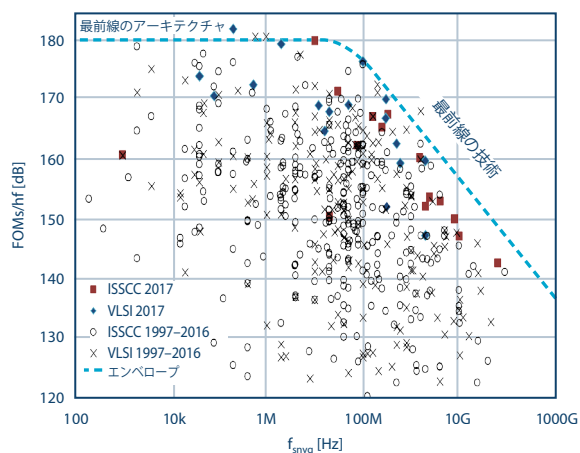


図6. 性能指数とサンプル・レートの関係

前述した傾向は、興味深い変化をもたらします。フロントエンドのRF電力は、アンテナのコネクタからADCの入力へと電力を伝送する物理的な特性に依存します。そのため、デジタル機能にムーアの法則がもたらすような継続的な進化は望めません。このような背景から、今後数世代のADCの消費電力は引き続き低下していきますが、消費電力に最も寄与するものはアンプになります。アンプの消費電力は、今後も現在のレベルで維持される見込みなので、インターフェース部を含むADCの寄与分は大幅に低下していきます。

図7に示したのは、基本的なダイレクトRFサンプリングのアーキテクチャです。一連のアンプと適切なフィルタを使って構成されています。周波数変換段は存在せず、アンプだけによって、ADC内のノイズに対処できるレベルまで信号を増幅します。また、広範な周波数に対応するRFフィルタにより、ADCによって生じる望ましくない折返し成分を排除します。

フィルタリングについては、2つの方法が存在します。1つは、フィルタの帯域幅を最大にして、折返しを防ぐことです。一般に、ナイキスト帯域幅の最大80%に対応する広帯域フィルタを構成することで、第1ナイキスト・ゾーンまたは第2ナイキスト・ゾーンを良好な性能でカバーすることができます。ほとんどの場合、折返しのことを考慮してナイキスト・ゾーンをまたぐ通過帯域を設ける必要はありません。ただ、明確な定義が存在する状況では、その方法が適切であるケースもあり得ます。

もう1つのフィルタリング方法は、ADCに対して複数の通過帯域を設けることです。GPSレベルのADCがもたらす主要なメリットは、サンプル・レートが高いため、アナログ信号に対する非常に柔軟な周波数プランニングが可能になることです。マルチバンドに対応する無線システムの場合、標準的なSAW（弾性表面波）フィルタを個々のRF対応アンプに付加し、各バンドを個別に処理します。その上で、処理結果を合算した信号をADCに入力してサンプリングを実施するということが行えます。同じ周波数に折返しが生じることがないなら、各バンドをそれぞれ個別のナイキスト・ゾーンに割り当てられる可能性があります。バンドごとに個別のアンプを用意すれば、バンドごとにゲインを最適化することができます。つまり、バンド間の感度の低下を抑制して性能を最大限に高めることが可能です。ただし、先述したとおり、RF電力は非常に大きい場合があるので、マルチバンドへの対応を図る上では、他の選択肢が適切である可能性があります。

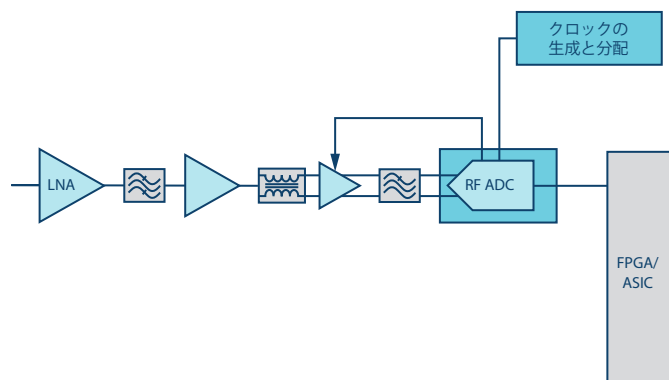


図7. ダイレクトRFサンプリングの基本的なアーキテクチャ

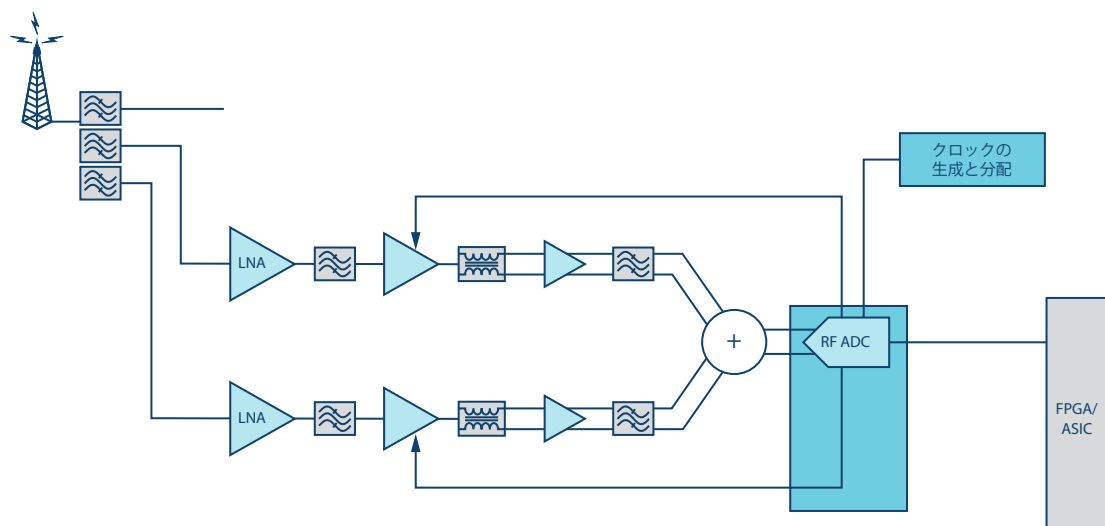


図8. マルチバンドに対応するシステムの例

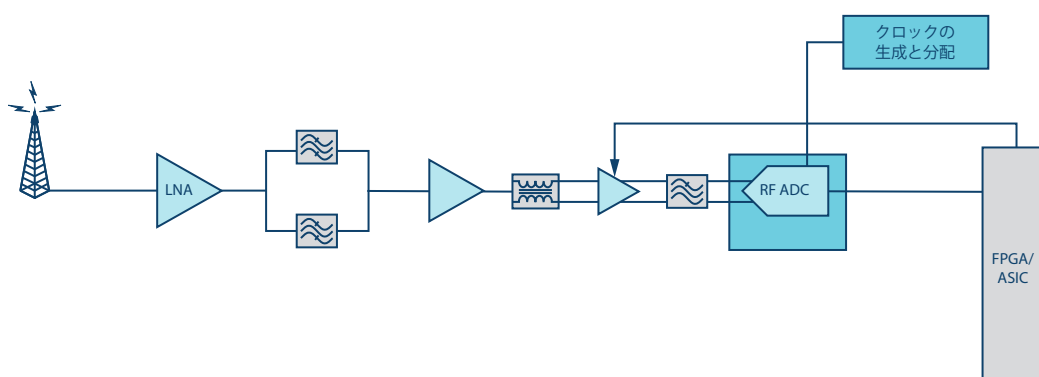


図9. マルチバンドに対応するRFサンプリング・システムの構成

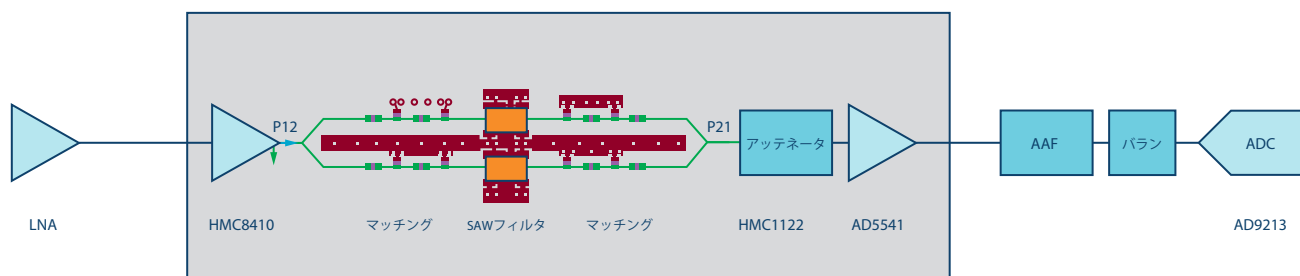


図10. 2個のSAWフィルタを使用した実装

複数のバンドに対して個別にフィルタリングを適用しつつ、単一のRFアンプ・チェーンで増幅を実施できる場合があります。この構成には、単一のゲイン・パスを共有することによって、RFチェーンの消費電力が最適化されるというメリットがあります。ただし、2つのバンドの性能にはトレードオフの関係が生じます。つまり、一方のバンドの信号が大きく、ゲインを調整する必要がある場合には、他方のバンドの性能に影響が及ぶということです。とはいえ、必要となる相対的なダイナミック・レンジから考えて、その影響は許容できるケースは少なくありません。図9に、その回路構成をブロック・レベルで示しました。このアプリケーションは、携帯電話の帯域を対象としたものですが、スペクトル・アナライザやサンプリング・オシロスコープなど、広帯域に対応する計測器といったアプリケーションにも容易に適用することができます。

図10は、上記の方法の具体的な実装例を示したものです。この回路において、SAWフィルタの入力部と出力部のマッチング回路は、一方のバンドの共振が他方の回路でオープン・サーキットとして見えるように慎重に設計されています。マッチング回路には、伝送線と集中定数素子が含まれることに注意してください。それらにより、2つのパスの間の相互作用が最小限に抑えられます。

このマッチング回路を慎重に設計することにより、かなり良好な性能を引き出すことができます。順方向の伝送特性は、図11に示すようなものになります。個々のSAWフィルタの特性が、他方に影響を与えることなく維持されています。この回路において、バンド1とバンド3は並列に存在します。他のバンドまたは周波数範囲を選択することも可能です。その場合にも、この方法は有効に機能します。

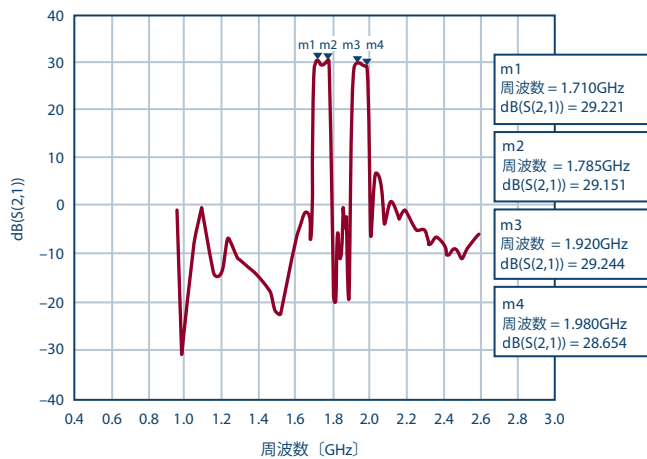


図 11. デュアルバンド向け SAW フィルタ回路の S21 特性

信号レベルのプランニングにおいては、複数の問題に注意する必要があります。ADCを使用する設計において、最初に従わなければならない規則の1つは、ADCの前段で信号を十分に増幅し、フロントエンドのノイズよりもADCのノイズが小さくなるようにすることです。ADCの性能が向上するにつれて、ADCからのノイズは本質的にガウス分布を示さなくなってきました。このことは、ADCを含むシステム全体の性能に多くの問題を引き起こす可能性があります⁴。図12は、フロントエンドのノイズとADCの入力換算ノイズの差と、トータルのノイズの影響の関係を表したものです。この図から、フロントエンドのノイズをADCのノイズよりも10dB以上高くすることが一般的な指針になります。そうすれば、トータルのノイズに対するADCの寄与分は0.4dB未満となります。これであれば、システムに期待される性能を確保できます。

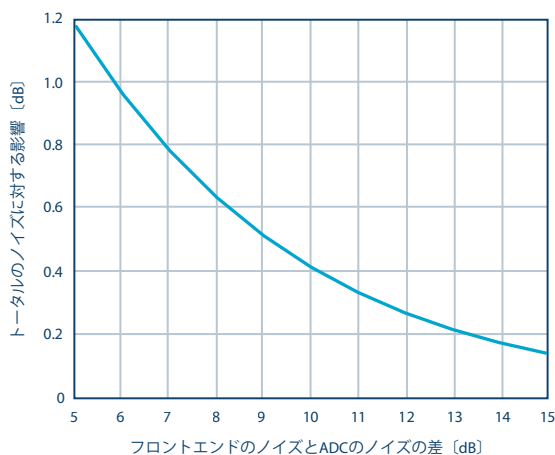


図12. ノイズの差と、全体への寄与分の関係

AD9213のデータシートを見ると、NSDの標準値は約-152dBFS/Hzとなっています。フルスケールの公称値は7dBmなので、-145dBm/Hzということになります。このことから、フロントエンドの熱ノイズのターゲットは-135dBm/Hzとなり、ゲインとノイズ指数(NF)の合計は少なくとも39dBとなります。図10のように実装した場合、回路のゲインは43dB、NFは3dBで、フロントエンドのノイズはトータルで-128dBm/Hzでした。入力信号がゼロの状態で、ゲインが最大の場合の両者の差は約19dBです。入力信号の振幅が増加すると、ADCのノイズ・フロアは、使用しているクロック源のジッタに起因して数dB増加します。

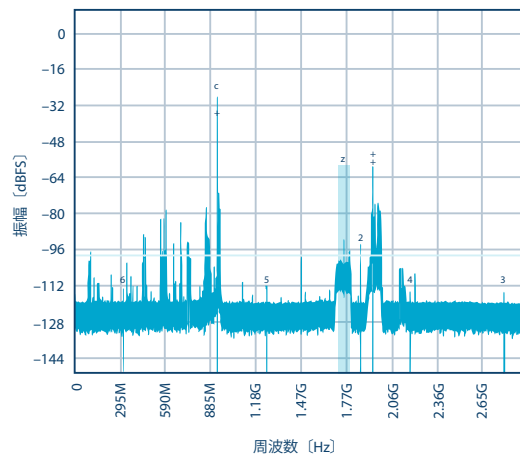


図13. OTAでの測定結果

図13は、実際に無線回路を完成させて、OTA (Over-The-Air) で測定を行った結果です。実装した回路は、帯域幅が2GHzを超える非常に広帯域の無線システムです。フィルタ回路は最小限に抑えているので、多くの信号を観測できます。図の左半分には、大電力のFMやテレビ放送を含む約900MHzまでのスペクトルが示されています。それを超えると、振幅の大きい信号が存在しない周波数範囲がしばらく続きます。その後、2個のSAWフィルタの通過帯域に当たる1.8GHz (UMTSのバンド3) と2.1GHz (UMTSのバンド1) の周波数帯に到達します。水色の影を付けている部分がバンド3です。想定どおり、どちらのバンドにおいても、フロントエンドの過剰なノイズがフィルタを通過することで、ノイズ・フロアが上昇しています。この測定は米国で行ったので、バンド3で検出された信号はほとんどありません。一方、バンド1では、バンド2のダウン・リンクの一部が現れています。それを超える範囲では、アンチエイリアシング (折返し誤差防止) フィルタによって残りの信号が除去され、ノイズ・フロアは低く抑えられます。

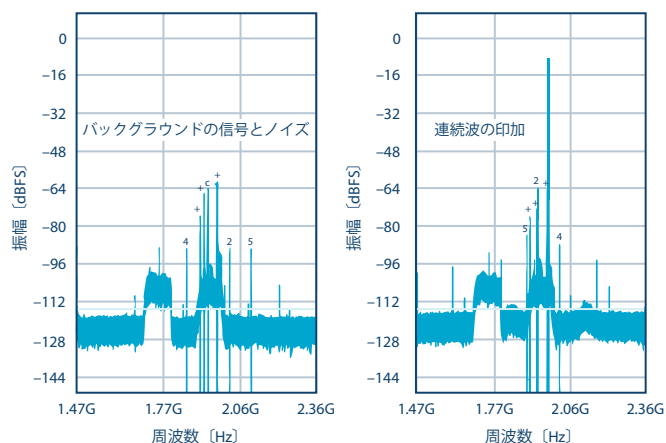


図14. 連続波信号を印加する前後の状態の比較

並列に配置されたSAWフィルタでカバーされる2つの帯域を拡大表示すると、もう少し詳しい情報が得られます。図14の左側は、バックグラウンド・ノイズを示したものです。一方、右側は、フルスケールに近い連続波信号を印加した結果です。2つの通過帯域ではなく広帯域のノイズ・フロアに注目すると、大きな連続波信号を印加した右側では、ノイズ・フロアが少し上昇していることがわかります。これは、クロックのジッタがアナログ信号に畳み込まれることに起因します⁶。

次に、2つの通過帯域のノイズ・フロアを比較してみるとノイズ・フロアの上昇は生じていません。これは、大きな信号が印加されたときに、フロントエンドからの熱ノイズに、ADCのノイズ・フロアの上昇が埋もれるためです。未処理のデータをよく見てみると、通過帯域のノイズ・フロアが約0.3dB上昇していることがわかります。図12から、これは11dBのノイズの差に相当します。

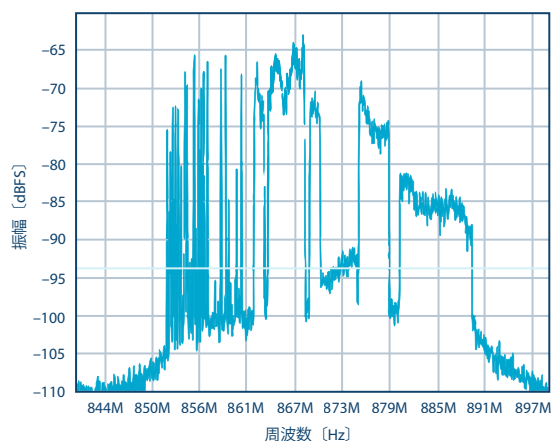


図15. 米国におけるバンド5の状態

まとめ

ヘテロダイン方式の多様な無線設計が、引き続き市場を占有しています。そうしたなか、広帯域に対応するADC技術は、かつては周波数変換が主流だったアプリケーションにRFサンプリングを適用できるレベルにまで成熟しています。本稿で紹介したように、ダイレクト・サンプリングを採用する広帯域システムにも、新たな選択肢が提示されています。AD9213などの製品は、2GHzをはるかに超える周波数を対象として、高い忠実度でデジタル変換できる可能性をもたらします。そのため、オシロスコープ、アナライザ、マルチバンド対応の広帯域無線システムなど、広い瞬時帯域幅を必要とするアプリケーションにとって、理想的な選択肢になります。かつて、GHzレベルのRF周波数に対応するのは不可能だという見方もありました。しかし、AD9213はその限界を打破しました。そして、今後の世代では、更に性能が向上することが期待されます。ADC製品は、今後も性能と効率の限界を更に押し広げる形で進化と成熟を続けます。それらの製品も、GHzレベルの広帯域システムに対する理想的な選択肢になるでしょう。

関連資料

- ¹ Gabriele Manganaro, David H. Robertson 「[インターリーブADCの謎を解く](#)」 Analog Dialogue 49-07
- ² Jonathan Harris 「[The ABCs of Interleaved ADCs \(インターリーブADCの基礎\)](#)」 EDN Network 2013年
- ³ Jonathan Harris 「[Further into the Alphabet with Interleaved ADCs \(インターリーブADCの詳細\)](#)」 EDN Network 2013年
- ⁴ Brad Bannon, アプリケーション・ノート AN-410 「[Aperture Uncertainty and ADC System Performance \(ディザ使用によるコンバータ非直線性の改善\)](#)」 Analog Devices 1995年
- ⁵ B. Murmann 「[ADC Performance Survey 1997-2016 \(ADCの性能調査 1997年～2016年\)](#)」 オンライン: <http://web.stanford.edu/~murmann/adcsurvey.html>
- ⁶ Brad Brannon, Alan Barlow, アプリケーション・ノート AN-501 「[アパーチャ不確定性とADCシステム性能](#)」 Analog Devices 2006年

著者について

Brad Brannon (brad.brannon@analog.com) は、ノースカロライナ州立大学を卒業後、32年間にわたってアナログ・デバイセズに勤務しています。アナログ・デバイセズでは、設計、テスト、アプリケーション、システム・エンジニアリングを担当してきました。ADC/DACのクロッキング、無線設計、ADCのテストなど、様々なテーマで多数の記事やアプリケーション・ノートを執筆しています。現在は、4G/5Gの受信アーキテクチャのシステム・エンジニアリングを担当しています。

Steve Dorn (steve.dorn@analog.com) は、35年以上にわたり、マイクロ波やRFに対応する製品に携わってきました。2016年にアナログ・デバイセズに入社し、ワイヤレス・システム・グループに加わりました。アナログ・デバイセズに入社する前は、Skyworks Solutions、RF Micro Devices、Maury Microwave、Motorolaに在籍していました。そのなかで、設計の検証、パワー・アンプのロード・プル測定、RF信号のプロベリング、RF向けのプリント基板設計、製品の特性評価といった経験を積んできました。

Vandita Pai Raikar (vandita.raikar@analog.com) は、アナログ・デバイセズの通信事業部門 ワイヤレス・システム・グループに所属するシステム・エンジニアです。4G/5G対応の通信プラットフォームの開発に向け、業界のトレンドと顧客との対話で得た情報に基づき、RF/マイクロ波用のアンテナやコンポーネントの設計に従事しています。RF/電磁気学を専門としており、電気工学の修士号を取得しています。RFエンジニアリングとアンテナ設計に関する経験を有しています。

このプロジェクトのためにハードウェアを開発してくれたKenny Man氏に感謝します。同氏の貢献なくして、本稿を執筆することはできませんでした。

オンライン・サポート・コミュニティ



アナログ・デバイセズのオンライン・サポート・コミュニティに参加すれば、各種の分野を専門とする技術者との連携を図ることができます。難易度の高い設計上の問題について問い合わせを行ったり、FAQ を参照したり、ディスカッションに参加したりすることが可能です。

ez.analog.com にアクセス

* 英語版技術記事は [こちら](#) よりご覧いただけます。

アナログ・デバイセズ株式会社

本社 〒105-6891 東京都港区海岸1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル10F
大阪営業所 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原3-5-36 新大阪トラストタワー10F
名古屋営業所 〒451-6040 愛知県名古屋市中区牛島町6-1 名古屋ルーセントタワー40F

©2018 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
本紙記載の商標および登録商標は、
各社の所有に属します。
Ahead of What's Possible は
アナログ・デバイセズの商標です。

TA20401-0-6-18

www.analog.com/jp



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™