

広帯域無線の実現を可能にする RFコンバータ

著者：Daniel E. Fague、Steven Rose
Analog Devices, Inc.

概要

RFコンバータとは、無線周波数の範囲で信号を直接合成することを可能にするICのことです。この種の製品は、従来の無線設計を一変させるレベルにまで成熟してきています。具体的には、2GHz、3GHzといった高い瞬時帯域幅の信号をデジタル変換して合成できるようになってきました。そのような製品を使用すれば、真の広帯域無線を実現することができます。また、無線システムの構築に必要なハードウェアの量を劇的に減らし、従来の無線設計ではまず不可能だったレベルで、ソフトウェアによる再構成（リコンフィギュレーション）が行えるようにもなりました。本稿では、新たな種類のデータ・アキュイジション・システムや広帯域無線の実現を可能にするRFコンバータ技術の進歩について説明します。また、ソフトウェアによる構成が可能という性質が切り拓く可能性について解説を加えます。

はじめに

無線システムを設計する際には、1つの制約に直面することになります。それは、最大限の品質で信号帯域幅を確保することと消費電力の間でトレードオフを行わなければならないということです。設計者がこれにどのように対処するかによって、システムのサイズと重量が決まります。その結果、建造物、塔、ポール、地下車両、バック、ポケット、耳、メガネなど、システムをどこに配置できるかが明確になります。その位置に応じて、利用できる電力量も変化します。例えば、建造物や塔であれば、ポケットの中にあるスマートフォンや耳の中にあるBluetooth®対応のヘッドセットよりも多くの電力を利用できるでしょう。あらゆるケースに共通する根本的な事実として、消費電力が少なく、スループットが高いほど、無線システムは小型かつ軽量になります。この事実は重大な意味合いを持ちます。通信向けのエレクトロニクス業界では、長年にわたり、このことがイノベーションを促す原動力となっているのです。

半導体メーカーは、より多くの機能と高い性能を実現するICをより小さな外形寸法で実現しています。そうしたICを採用する装置は、小型化、高機能化、軽量化を達成することができます。場合によっては、それらすべてが同時に実現されることもあるでしょう。小型、軽量、高機能という改善が図られた装置は、何らかの制約によってそれまでは配置できなかった場所に配置できるようになります。例えば、小型化が実現された結果、装置を塔に設置できるようになれば、建造物に必要な敷地面積を縮小することができます。また、無線ユニットが十分に

軽量化されれば、塔に設置していた無線ユニットをポールに設置できるようになるでしょう。更に、それまでは重さに対応するために車両に積載しなければならなかった装置を、バックに収容できるようにもなります。

今日の環境には、建造物、塔、ポール、車両を必要とする既存の設備があふれています。世界中の人々を互いにつなぐという要求に駆り立てられ、技術者は、その時点で利用可能なコンポーネントを使って装置を設計するという課題に対応します。その結果、頻繁に通信データが行き交う今日のような環境が構築されました。その環境の中では、モバイル・ネットワーク、無線LAN、アドホックな短距離無線ネットワークなどのうちいずれかを使い、ほぼどこにいても自由に会話を楽しみ、テキスト、IM、写真などのデータを送受信し、ダウンロード／アップロード／閲覧を行うことができます。そうしたネットワークは、いずれも有線の広帯域ネットワークに接続されます。有線の広帯域ネットワークにおいて、データは同軸ケーブルや光ファイバを介して伝送されます。

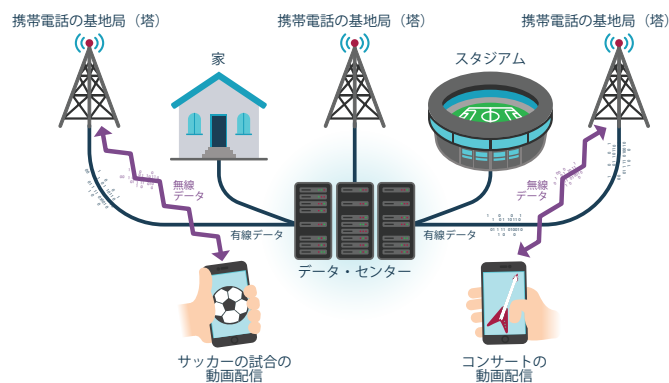


図1. 今日の通信環境。RFコンバータにより、ゲームや動画配信のような通信量の多いデータ・サービス向けの広帯域無線を実現します。

高度な動画配信

いくつかの調査結果でも示されているように^{1, 2}、今後10年間、データに対する需要は増加し続けると予想されます。より広い帯域幅を必要とする、よりリッチなデータ・コンテンツに対する需要は尽きることがないように見受けられます。例えば、ケーブル・テレビやFTTH（Fiber to the Home）のプロバイダは、

より高速な接続とより多くのHD（高精細）テレビ・チャンネルを提供することによって、家庭向けブロードバンド・サービスの競争を続けています。UHDや4Kといった超高精細のテレビに移行するには、HDテレビの2倍以上のキャパシティと、現在よりも広いチャンネル帯域幅が必要です。

また、VR（仮想現実）、ゲーム、複数次元の自由度を備えた180°ビューやパノラマ・ビューといった3D効果など、UHD/4Kテレビがもたらす没入型の動画には、ユーザー当たり最大1Gbpsの帯域幅が必要になります²。UHD/4Kテレビの場合、シンプルな放送や配信でもデータに対する要件は厳しいものになりますが、それをはるかに上回る要件が課せられるということです。オンライン・ゲームでは、遅延時間が非常に重要です。そのため、ネットワークでは対称的なデータ帯域幅が必要になり、はるかに広い帯域幅のアップストリーム伝送機能の開発が求められます。このようなニーズに応えるために、装置メーカーは自社の設計を改善し、対称的で広帯域幅の伝送を実現しています。

リッチな動画コンテンツの提供を更に進化させるには、今日のRFコンバータの高度な機能が不可欠です。256QAM、1024QAM、4K QAMといった高次の変調方式を使用できるようにするためには、スプリアスフリーの卓越した性能を備え、高いダイナミック・レンジの信号を生成可能なRFコンバータが必要になります。高次の変調方式は、各チャンネルの周波数効率を高めるために必要になります。配備済みの同軸ケーブルや分配増幅器は、帯域幅が1.2GHz~1.7GHzに限定されるからです。ヘッドエンドの伝送装置の性能が高くなれば、配備済みの装置の寿命が延伸され、設備投資向けの予算に余裕が生まれます。それだけでなく、MSO（Multiple Service Operator）が自社の装置や伝送システムをアップグレードする際、それに充てられる期間を長くとることができます。

マルチバンド、マルチモードのテスト

スマートフォンはますます多くの機能を搭載し、従来の携帯電話とは似ても似つかぬものになりました。多くの機能は無線に関連しており、今日の携帯端末は5~7種、あるいはそれ以上の無線機能を内蔵しています。スマートフォンを製造する際には、それぞれのテストを行わなければなりません。そうしたマルチモードの通信機能に対応することが、テスト用の装置のメーカーにとって新たな課題になっています。無線の種類が増えると共にテストの数は増加するのにもかかわらず、テストのコストを抑えるためにスピードの改善が求められます。携帯端末が内蔵する無線機能ごとに異なるテスト用ハードウェアを構築するというのは、テスト装置のサイズとコストの面から非現実的です。モバイル・サービス向けに更に帯域が開放される（または開放が提案されている）こともあり³、携帯端末に盛り込まれるより多くの無線機能をテストしなければならないようになります。

この課題には、RFコンバータによって適切に対処することができます。RFコンバータは、トランスミッタとレシーバーの両方に対して、従来の無線機能では達成できなかった柔軟性をもたらします。広帯域に対応するRFコンバータは、あらゆる帯域の信号を同時にキャプチャして直接合成する機能を備えています。そのため、RFコンバータを使用すれば、携帯端末が備える複数の無線機能の同時テストが可能になります。RFに対応するD/Aコンバータ（RF DAC）やA/Dコンバータ（RF ADC）と共に集積されたチャネライザにより、複数の無線信号が効率的に処理されます。例えば、図2に示した「AD9172」の場合、1つのDACに対して3個のチャネライザが用意されています。そのため、3つの異なる帯域信号を直接合成して結合することが可能です。チャネライザを通過後の信号は、値制御型発振器

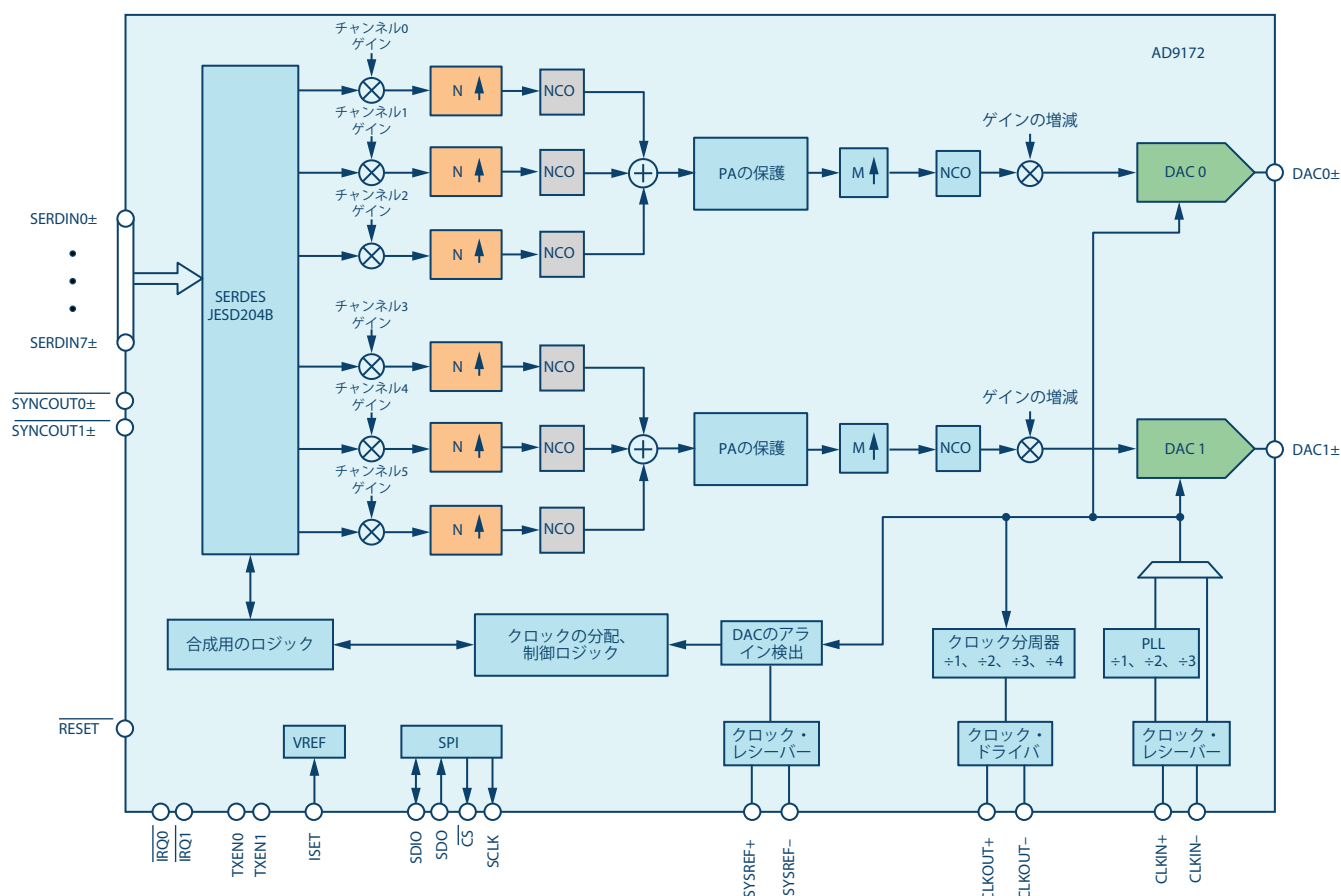


図2. チャネライザを搭載するRF DAC（AD9172）

(NCO : Numerical Controlled Oscillator) によってデジタル的にアップコンバートされてから、RF DACによってRF信号に変換されます。

航空宇宙／防衛向けのテスト装置などの分野では、パルス・レーダーや軍事通信システムを対象とする広帯域対応のテスト・ソリューションに対するニーズが高まっています。テストが必要なレーダー、ELINT (Electronic Intelligence)、電子戦 (Electronic Warfare) 装置、通信装置の数や種類の増加に伴い、テスト装置のメーカーは、豊富な機能を備えた柔軟性の高い計測器を構築する必要に迫られています⁴。例えば、任意波形発生器は、広範な出力周波数と帯域幅にわたって、直線周波数変調信号、パルス信号、位相コヒーレント信号、変調信号など、様々な信号を生成できるものでなければなりません。計測装置についても、励起器やトランスミッタをテストする際にそうした信号を受信できるものでなければなりません。RFコンバータを使用すれば、RF周波数における直接合成と測定が行えるので、そうしたアプリケーションに適切に対応できます。RFコンバータを使用することにより、アップ・コンバージョンやダウン・コンバージョンが不要になる場合もあれば、変換が1回で済むようになる場合もあります。このことは、ハードウェアの簡素化につながります。つまり、サイズ、重量、消費電力を削減可能です。チャネライザ、インターポレータ、NCO、コンバイナなどのデジタル機能を追加することで、低消費電力のCMOS技術による効率的な信号処理を実現することができます。

ソフトウェア無線

RFコンバータは、ソフトウェア無線を実現するための重要な要素になり得ます。数GHzの範囲にある無線信号を直接合成したりキャプチャしたりする機能により、アップ・コンバージョン段、ダウン・コンバージョン段を排除することができます。それらをデジタル的に実装し、無線アーキテクチャを簡素化することが可能だということです。アナログ・コンバージョン段とそれに付随するミキサ、LO (局部発振) シンセサイザ、フィルタを取り除けば、無線システムのSWaP (サイズ、重量、消費電力) を削減できます。その結果、無線システムをより多くの場所に配置したり、より小さな電源で動作させたりすることが可能になります。RFコンバータを活用することで、人手によって持ち運んだり、小型地上車両に積載したり、航空機／ヘリコプタ／無人航空機 (UAV) などの様々な飛行物体に搭載したりすることが可能なレベルまで、無線システムを小型化／軽量化することができます。

RFコンバータを使って構築した無線ハードウェアは、プラットフォーム間の通信を改善するだけでなく、多くの機能によってマルチモードとマルチバンドに対応することができます。今日のRFコンバータは、既に低いレーダー帯域に対応しています。近い将来にはより高い帯域にも対応する見込みなので、単一の装置をレーダーと戦術通信リンクの両方に利用するという概念を、現実のものにすることができます。そのような装置は、現場での修理、アップグレード、調達の手続き、コストといった面で、明らかなメリットをもたらします。

レーダーで使用する周波数信号を直接合成したりキャプチャしたりすることが可能なRFコンバータは、フェーズド・アレイを利用するレーダー・システムに対しても理想的な製品です。直接合成とキャプチャの機能によって従来の無線ハードウェアのかかなりの部分が不要になり、個々のシグナル・チェーンはかなり小型化／軽量化されます。そのため、多くの無線機能をよ

り小さなスペースに収めることが可能になります。船舶への搭載に適したアレイや、地上に配備されるフェーズド・アレイ、シグナル・インテリジェンス活動のための小型アレイ／ユニットを、小さなSWaPで実装することができます。

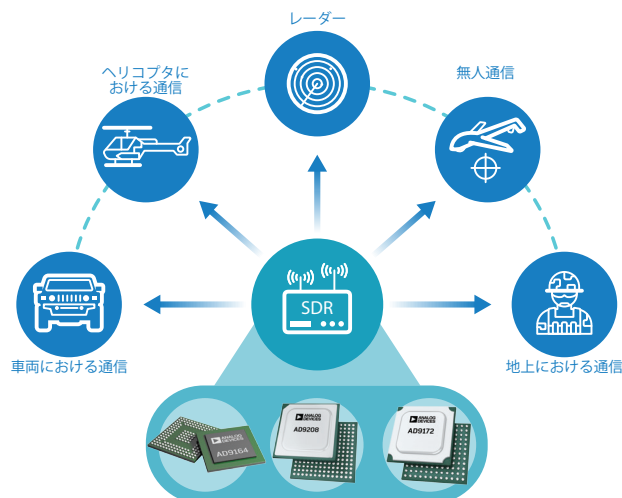


図3. ソフトウェア無線の用途。RFコンバータによって実現されるソフトウェア無線により、プラットフォーム間のコネクテッド通信が可能になります。

RFコンバータを支える技術

RFコンバータは、技術の進化に支えられて実現されています。その進化の1つは、とどまることなく続くCMOSプロセスの微細化です。基本的なCMOSトランジスタのゲート長／形状が小さくなるにつれ、論理ゲートはより高速かつ小型で低消費電力になります⁶。そのため、デジタル信号処理用の膨大な回路を、理にかなった消費電力と占有面積で、RFコンバータと共にチップ上に集積することができます。効率的で柔軟性の高い無線機能を実現するには、ソフトウェアでプログラム可能なデジタル・チャネライザ、変調器、フィルタを搭載することが不可欠です。そうした効率的なDSPにより、RFコンバータのアナログ処理における不備を、デジタル処理によって補正することも可能になります。アナログ回路の面から言えば、新しいプロセス・ノードに移行するたびに、単位面積当たりのマッチング特性が向上した、より高速なトランジスタが得られます。このような進化が、より高速かつ高精度のRFコンバータを支えています。

ただ、プロセス技術の進化だけでは十分ではありません。アーキテクチャ上のいくつかの主要な進化も重要な意味を持っています。RF DACに最適なのは、電流ステアリング型のアーキテクチャです。この種のDACの性能は、その構成要素である電流源のマッチング特性に依存します。キャリアレーション前の電流源のマッチング特性は、電流源の面積の二乗平方根に比例します⁷。単位面積当たりのマッチング特性は、プロセス・ノードと共に向上します。しかし、最先端のプロセス・ノードでも、分解能の高いDACを十分に構成できるほど小さいランダム・ミスマッチを実現するには、電流源のサイズをかなり大きくする必要があります。電流源を大きなサイズで設計すると、DAC全体としてもサイズが大きくなります。それよりも重大な問題は、その大きな電流源の寄生容量によって、DACの高周波性能が低下することです。電流源のサイズを大きくするよりも格段に魅力的な解決策は、小さな電流源に対してキャリアレーションを施し、必要なレベルのマッチング特性を達成することです。そうすれば、電流源によって追加される寄生容量を抑え、高周波

性能を損なうことなく望ましい直線性を得ることができます。適切な方法を採用すれば、温度に左右されない非常に安定したキャリブレーションを実現できます。そうすれば、キャリブレーションは1回で済みます。安定したキャリブレーションを1回だけ行えばよいということは、バックグラウンドで定期的にキャリブレーションを実行する必要がないということを意味します。それにより、消費電力を抑制できます。また、バックグラウンドでキャリブレーションを実行することによって、スプリアス積が生成される可能性が軽減されます⁸。

非常に高速に動作する場合に望ましい性能を達成するためには、もう1つ重要なアーキテクチャがあります。それは、電流源の制御に使用するスイッチのアーキテクチャです。図4に示した従来のデュアルスイッチ構造の場合、非常に高速に動作させると、複数の欠点が顕在化します^{9, 10}。デュアルスイッチが同じ状態に維持される期間は、データに応じて、1クロック・サイクルの場合もあれば、複数クロック・サイクルにまたがる場合もあります。つまり、テール・ノードがセトリングするまでの時間は、データに依存するということになります。クロック・レートが低く、このノードが1クロック・サイクル以内にセトリングするのであれば問題はありません。しかし、クロック・レートが非常に高く、1クロック・サイクルで完全にセトリングしない場合には、データに依存するセトリング時間によって、DACの出力に歪みが生じるということになります。それに対し、図5に示したクワッドスイッチのアーキテクチャであれば、データに対応する信号はすべてゼロに戻ります。この場合、テール・ノードの電圧は入力データには依存しないので、上記の問題は軽減されます。また、クワッドスイッチを使用すれば、DACのデータをクロックの両方のエッジで更新することが可能です。これを利用することにより、クロック周波数を2倍にすることなく、DACのサンプル・レートを実質的に2倍に高めることができます¹¹。

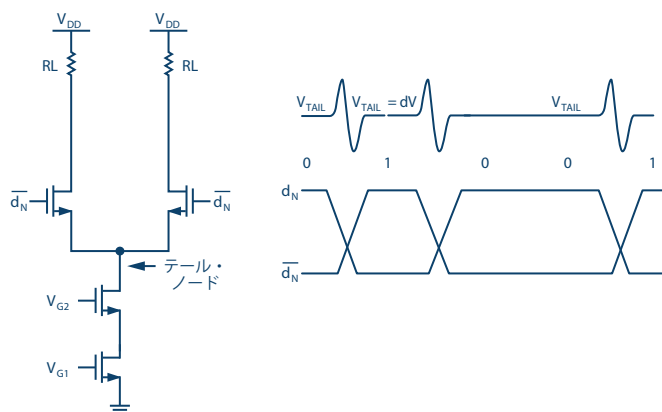


図4. デュアルスイッチ構成のDACのセル

電流源のキャリブレーション向けに適切に設計されたアルゴリズム、クワッドスイッチ構成の電流ステアリング・セル、今日の微細なCMOSプロセスを組み合わせれば、卓越したダイナミック・レンジで非常に高速なサンプリングを実現可能なDACを設計することができます。それにより、広範な周波数にわたっ

て高い質で信号の合成を行うことが可能になります。このように広い帯域に対応するDACとDSPを組み合わせることで、本稿の前半で挙げた多様なアプリケーション向けに構成することが可能で、柔軟性と性能に優れた無線トランスミッターを実現できます。

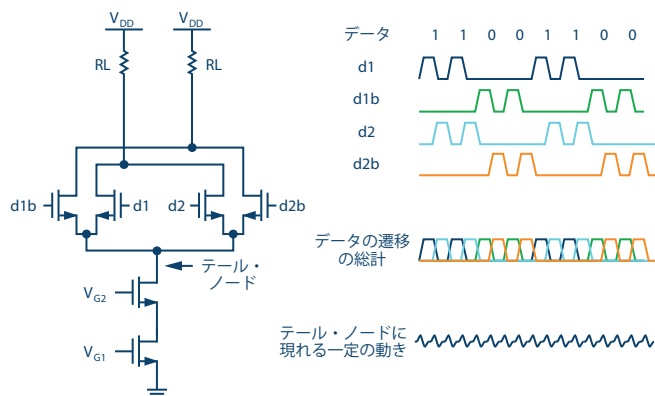


図5. クワッドスイッチ構成のDACのセル

将来の無線

今日のRFコンバータは、既に無線アーキテクチャの設計に急進的な変化をもたらしています。ただ、将来的にはさらなる変化が創出されると期待されています。プロセス技術が引き続き進化し、RFコンバータの設計が更に最適化されるにつれて、無線システムの消費電力はますます低減され、サイズはますます縮小していきます。このような効果をもたらす技術の進化は、大規模MIMO (Multi Input Multi Output) をはじめとする5G (第5世代移動通信システム) の基地局アプリケーションや、大規模フェーズド・アレイ・レーダー、ビームフォーミング・アプリケーションなど、次世代の無線システムがまさに実現しようとしている絶好のタイミングで現れています。ディープ・サブミクロンに対応するリソグラフィ技術により、更に大量のデジタル回路をRFコンバータのダイ上に配置できるようになります。例えば、デジタル・プリディストーション (DPD)¹³やクレスト・ファクタ・リダクション (CFR: Crest Factor Reduction) など、演算を多用する重要な機能を集積できるようになるということです。そのことは、パワー・アンプの効率の向上やシステム全体の消費電力の大幅な削減につながります。また、そのような集積を進めるということは、消費電力の多いFPGAの負担を軽減し、消費電力の少ない専用ロジックにその機能を移行できるということを意味します。その他の可能性としては、RFコンバータとそのデジタル・エンジンを、RF/マイクロ波/ミリ波に対応するアナログ回路と共に集積し、サイズを更に縮小して無線設計を簡素化することが考えられます。あるいは、ビットからアンテナまでのシステム・レベルのアプローチを無線設計に適用することなども想定されます。RFコンバータがもたらす可能性は非常に大きなものです。RFコンバータは、まさに「Ahead of What's Possible™ (想像を超える可能性)」を体現する技術であると言えます。

まとめ

- ¹ 「5G Radio Access (5Gの無線アクセス)」 Ericsson、2016年4月
- ² 「Consumer Survey Report on Typical Future Mobile Applications (将来の標準的なモバイル・アプリケーションに関する消費者調査レポート)」 Huawei Wireless X Labs
- ³ 「Notice of Inquiry FCC 17-104 (情報提供要請 FCC 17-104)」 Federal Communications Commission、2017年8月
- ⁴ John Hansen 「Radar, Electronic Warfare, and Electronic Intelligence Testing (レーダー、電子戦、ELINTのテスト)」 Agilent Technologies、2012年8月
- ⁵ Henry S. Kenyon 「New Radios, Waveforms Move Military Communications into the Sky (軍事通信を空中へ移行する新たな無線信号)」 Signal、2013年10月
- ⁶ William Holt 「Moore's Law: A Path Going Forward (ムーアの法則：今後の道すじ)」 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference、IEEE、2016年
- ⁷ A.C.J. Duimajier、Anton Welbers、Marcel Pelgrom 「Matching Properties of MOS Transistors (MOSトランジスタのマッチング特性)」 IEEE Journal of Solid-State Circuits、IEEE、Vol. 24、No. 5、1989年10月
- ⁸ Haiyan Zhu、Wenhua Yang、Gil Engel、Yong-Bin Kim 「A Two-Parameter Calibration Technique Tracking Temperature variations for Current Source Mismatch (2つのパラメータによるキャリブレーション手法、電流源のミスマッチに対する温度変動の影響をトラッキング)」 IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs、IEEE、Vol. 64、No. 4、2017年4月
- ⁹ 「Constant Switching for Signal Processing (信号処理に適した一定のスウィッチング)」 U.S. Patent US6842132 B2、2005年1月
- ¹⁰ Sungkyung Park、Gyudong Kim、Sin-Chong Park、Wonchan Kim 「A Digital-to-Analog Converter Based on Differential-Quad Switching (差動型クワッドスイッチをベースとするDAC)」 IEEE Journal of Solid-State Circuits、IEEE、Vol. 37、No. 10、2002年10月
- ¹¹ Gil Engel、Shawn Kuo、Steve Rose 「A 14-Bit 3 GHz/6 GHz Current-Steering RF DAC in 0.18 μ m CMOS with 66 dB ACLR at 2.9 GHz (3GHz/6GHzに対応する14ビットの電流ステアリング型RF DAC、2.9GHzで66dBのACLRを達成した0.18 μ mのCMOS品)」 2012 IEEE International Solid-State Circuits Conference、IEEE、2012年
- ¹² Daniel Fague 「ソフトウェア無線の可能性を広げる新たなRF DAC」 Analog Dialogue AD50-07、2016年7月
- ¹³ Patrick Pratt、Frank Kearney 「超広帯域に対応するデジタル・プリディストーション、この技術をケーブル・システムに実装するメリットと課題を解き明かす」 Analog Dialogue AD51-07、2017年7月

著者について

Daniel E. Fague (daniel.fague@analog.com) は、アナログ・デバイセズの高速プロダクト・グループでシステム・アプリケーション・エンジニアリング・ディレクタを務めています。1989年にゴンザガ大学で電気工学の学士号、1991年にカリフォルニア大学デービス校で電気工学の修士号を取得しています。1995年に入社し、ワイヤレス・ハンドセット・グループにおいて、GSM、EDGE、CDMA、Bluetooth用のダイレクト・コンバージョン無線を含む無線ハンドセットのアーキテクチャ設計を担当しました。アナログ・デバイセズに入社する前は、National SemiconductorでDECTやPHS向けの無線アーキテクチャの設計に5年間携わっていました。2011年に高速プロダクト・グループに属してからは、主にRFコンバータの開発に取り組んでいます。7件の特許を保有し、これまでに30本以上の記事や論文を発表しています。

Steven C. Rose (steven.rose@analog.com) は、アナログ・デバイセズの高速プロダクト・グループに所属するスタッフ設計技術者です。1999年にミシガン大学で電気工学の学士号、2002年にカリフォルニア大学バークレー校で電気工学の修士号を取得しています。2002年にアナログ・デバイセズに入社し、高速プロダクト・グループでケーブル・テレビ用の受信機に使用するRFビルディング・ブロックの設計に従事していました。2009年以降は、RF DACの設計を担当しています。

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 愛知県名古屋市西区牛島町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。

TA16522-0-3/18

www.analog.com/jp



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™