

1ビットデジタルRF無線装置の開発

前 嶋 貴*・戸 谷 一 幸・朝夷名 巧
立 花 宏 之

Development of 1-Bit Digital Radio Frequency Transmitter — by Takashi Maehata, Kazuyuki Totani, Takumi Asaina and Hiroyuki Tachibana — In wireless communication, there has been an increasing demand for high-speed and high-quality data transmission, particularly since the advent of smartphones. To meet these requirements, multiple-input and multiple-output (MIMO) systems and array antenna systems have been developed. Wireless systems are also increasingly being integrated for improved communication performance, while transmitters are required to remain compact. To this end, we have developed a 1-bit digital radio frequency (DRF) transmitter using a bandpass delta sigma modulator. This modulator directly transmits wireless signals without an RF circuit, and is therefore expected to reduce the size and power consumption of transmitters according to Moore's law. Our prototype 1-bit DRF transmitter achieved a high adjacent channel leakage ratio of about 60 dB.

Keywords: digital radio frequency, bandpass, delta sigma

1. 緒 言

近年の無線通信システムは、増大するトラフィックに対応するため、無線LAN等によるトラフィックの分散やMIMO、アレーアンテナシステムによる大容量化が進められている。さらにスマートフォンの登場によりトラフィックが急速に増加している事を受けて、さらなる高速・大容量化が求められており、複数の無線システム間でスマートに協調動作を行うキャリアアグリゲーション技術等の検討も進められている。このように今後の無線機器は、各種無線方式と各々の無線性能へ柔軟に対応するため、集積化し小型化する事が必須になると考えられる。

このような市場要求に対して、我々は1ビットデジタル無線機器装置の可能性に注目し、バンドパスデルタシグマ変調(BP-DSM⁽¹⁾)方式による無線機器開発に取り組んでいる。この方式は、アナログ回路を使用せず、デジタル回路のみで直接無線信号を出力するため、シリコン半導体の微細化技術の恩恵をそのまま受ける事ができる。そのため、ムーアの法則に従う小型・低消費電力化が期待できると考えている。

一方、デジタル回路のみで無線信号を出力するという特徴は、理想的なデジタル信号(矩形波)を出力する場合に限って得られるものであり、**図1**に示す様に時間波形が滑らかに変化する場合には、高い無線特性を達成する事は困難と考えられていた。無線基地局用途では、高い通話品質の要求から、高い隣接チャネル漏洩電力比(以下ACLR)の規格を満足する事が必須条件となっているため、デジタルの波形がこの方式を実用化の際の技術課題となっていた。

そこで本開発では、**図1**に示す時間波形がACLR特性に与える影響について新たに波形分離法⁽²⁾を導入し、定量化

を実施した。その結果、リングングを含むような時間波形であっても高いACLR特性を得られる条件を見出し、理想値とほぼ同一の性能を実現する事ができた。

この成果によって、通常シリコンデバイスを用い、高い通信品質を有する1ビットデジタル無線装置を実現できる目途が立った。

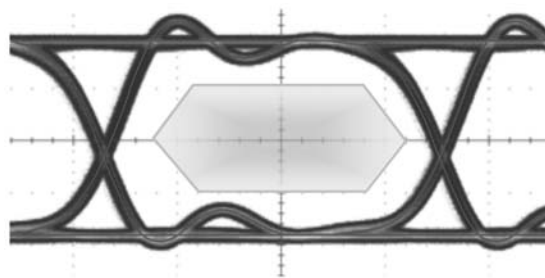


図1 時間波形

1-2 1bitデジタル送信装置の特徴 本開発の1ビットデジタルRF送信装置は、デジタル信号処理によってアナログ高周波回路なしにデジタル部から直接無線信号を出力している。このため、高周波回路において長年の課題であったアナログ回路間での相互干渉がなくなる。これによりチップ内での高集積化が進む事が期待できる。また従来は使用国別に搬送波周波数を変更していた高周波回路につ

いてもソフトウェアレベルでの変更で対応が可能となり、様々な無線送信部の共通化が図られ、量産効果による信号処理部の低コスト化も期待できる。さらにこの方式は、出力するデータを変更する事で、無線特性を変更できる特長を持つため、様々な無線規格へ柔軟に対応する事が期待できる。

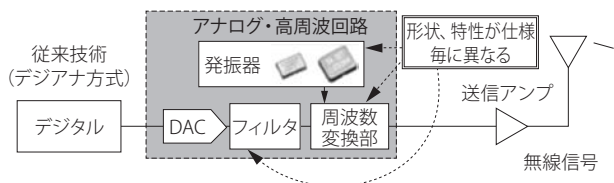


図2 従来型無線器

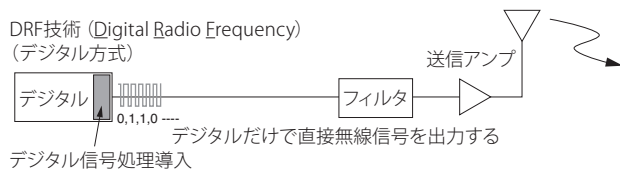


図3 1ビットデジタルRF無線器

図2は従来方式、図3は本提案方式を示している。従来方式では様々なアナログ回路を必要としている。本提案方式では、1ビットの高速デジタルデータ列を出力し、この信号をフィルタに通過させるだけで、従来の無線信号を出力できるため、回路が簡単になる。この時、アンテナから出力される無線信号は、同一の信号（同じ通信品質、同じ通信情報量、同じ搬送波周波数を有する）となるため、受信システムは従来の装置を使用する事ができ、専用置き換える必要はない。

1-3 応用例 今回開発した1ビットデジタル無線信号には、シンプルでかつ従来にない特長がある。その1つは、図3に示した様にデジタルデータとして無線信号を出力できる点である。動作原理等については2章以降に委ねるとして、出力する周波数に依存せずデジタル化する事ができる。

これを使えば、メモリを使って予め信号処理した結果を記録しておき、このデータを読み出す事で簡易な無線装置とする事もできる。この送信装置では、フィルタを追加さえすれば、所望の無線信号を出力する事ができ、軽量、小型、低消費電力の無線装置が実現する。最新のメモリは、大容量かつ5Gb/s近くでの高速読み出しが可能であるため、データを1ビット列にするだけで無線LANの周波数帯を含めて、あらゆる周波数帯での送信が可能である。またメモリの代わりに最新FPGAを用いれば、28Gb/sでの出

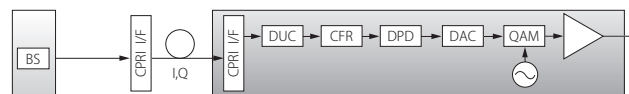
力も可能となり、リアルタイム信号処理も加えて、直接ミリ波の無線信号を出力する事までできる。

さらに出力されるデジタル信号は、光リンクを使えば、従来の同軸ケーブルと比較し大きな減衰を生じる事が無いため、無線信号を長距離伝送する事ができる。このため従来の無線システムにはない、新しい市場が創出される可能性もある。

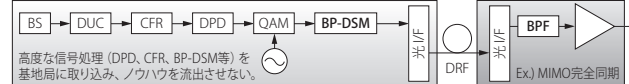
もう一つの特長は、時間波形が矩形波である点である。増幅にスイッチングアンプが使えるため、高効率な増幅器を実現できる可能性がある。

図4は、今回開発した1ビットデジタルRF技術と光リンクを接続する場合の一例を示している。通常、このようなシステムにおいては、ベースバンドのI,Q信号を光ファイバーで伝送し、伝送先の装置で無線信号に変換する構成が用いられている。一方、1ビットデジタルRFでは、無線信号がデジタルデータとして変換され、光ファイバーを介して伝送される。伝送先の装置内にはバンドパスフィルタがあればよい。このため、非常にコンパクトな機器となり、設置場所が小さくできる。また主要な信号処理を伝送元に集約化する事で、主要な信号処理をセキュアの高い場所に収納できると共に、柔軟にシステムをマイグレーションする事も期待できる。

第1世代(現在)



第2世代



第3世代

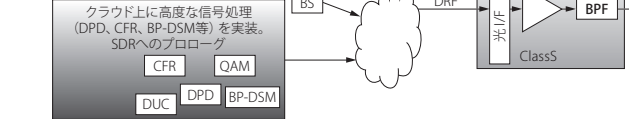


図4 1ビットデジタルRFによる光リンクシステムへの応用

2. 開発技術の概要

2-1 構成 図5は、1ビットデジタルRF全体のブロック図を示している。ベースバンドのI,Q信号を入力信号として、パルス生成部から1ビットのパルス列が出力されて、バンドパスフィルタ (BPF) を通して無線信号を出力している。入力されるベースバンドのI,Q信号は直交変調器により1次変調される。ソフトウェアで任意の変調が可能であるため、あらゆる無線方式と接続して使用する

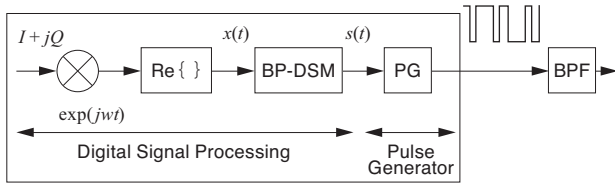


図5 1bit デジタルRFのブロック図

事ができる。次に直交変調された信号はBP-DSMによって2次変調され、1ビットデジタルデータ列に変換される。このデータ列はパルス生成部から矩形波の信号波形として出力される。ON/OFF 信号であるため一般的なデジタル半導体デバイスを使用する事が出来る。

次にBP-DSMについて詳しく説明を行う。図6は、BP-DSMのブロック図を示しており、式(1)は、このブロック図の入出力関係を示している。入力信号X、出力信号Yとして、入力波形が2値化される際に生じる量子化誤差を第2項で表現している。図7は変調波を入力信号とし1ビットのデジタルデータが出力される様子を示す。変調信号に

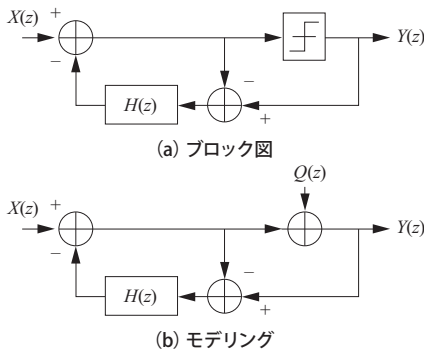


図6 DSM変調器のブロック図とモデル化

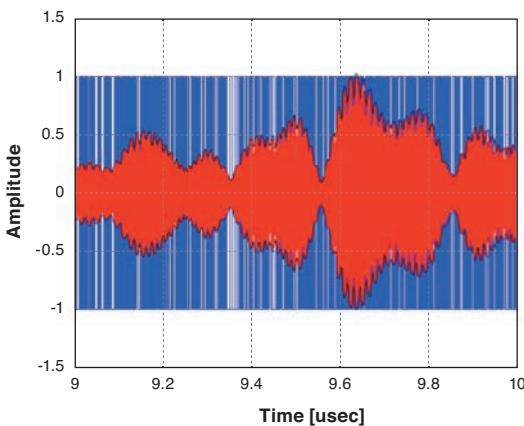


図7 BP-DSMの入出力波形

含まれる振幅と位相情報がデジタル列の粗密となって現れている。

ここで改めて式(1)と量子化雑音の発生ポイントに着目すると、図6(b)のように、2値化時に発生する量子化雑音Qが、Hに接続され、フィードバックを形成している事が分かる。式(1)の第2項は、このフィードバック関係を反映しており、式(1)は次の様に解釈する事ができる。

まず入力信号Xは出力信号Yにそのままの形で出力され、同時に量子化(2値化)時に発生する量子化誤差Qは、フィードバックの影響を反映した第2項の様に加算される。ここで、第2項は、量子化雑音の係数として雑音伝達関数(Noise Transfer Function: NTF)を持っている。このNTFは所望の搬送波周波数にて量子化雑音を抑圧するようバンドストップフィルタを形成できる。これにより入力信号を妨害する事なく、高いSNRを有した信号を出力する事ができる。

$$Y(z) = X(z) + NTF(z) Q(z) \dots\dots\dots (1)$$

$$NTF(z) = 1 - H(z) \dots\dots\dots (2)$$

さらに、NTFの抑圧特性及びその計算負荷は、フィルタの次数によって決定されており、入力信号の周波数には依存しない。つまり、今回開発しているBP-DSMは、出力する電波の搬送波周波数とは無関係に、信号処理負荷が一定という性質を持っている。このため同じ計算量で様々な周波数を出力する事ができる。これは、アナログ部品が周波数別の部品を選択して使用する状況と大きく異なる特長である。

図8は、NFTの設計事例として、逆チェビシェフ特性を持つバンドストップフィルタを設計した事例であり、図7の1ビットデータ列への変換に対応したものとなる。1ビットデータ列であるにも関わらず、デジタルフィルタ特性により ACLR 特性として 60dBc が得られている。

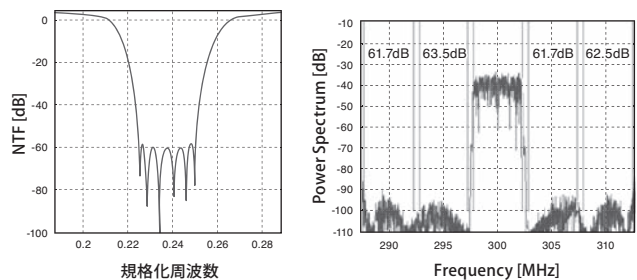


図8 設計事例

2-2 時間波形の解析 図1は、式(1)による信号処理を実施し、1ビット化された信号を出力した時間波形を

示している。通常、有線系のデジタル通信の場合、アイパターンの中央部のH/Lによって、データ伝送を行っている。

一方、1ビットデジタルRFはパルス波形全体の形がアナログ性能と関係しており、デジタル通信よりも厳しい波形管理が必要となる。これまでの研究では、デジタル波形の理論値である矩形波に近づける試みが報告されている。

本開発では、この時間波形と ACLR 特性の関係解析を進め、その結果、時間軸に対する波形の対称性が、ACLR特性と強い関係にあることを突き止めた。

この対称性については、図1と図7を比較し理解する事ができる。まず、これまでに開発されてきた無線変調方式は、全てSin波をベースとして開発されている。このため、図7に示す様にどんなに激しい変化を伴う変調波形でも、時間軸を対称軸として、時間波形は上下で線対称となっている。一方、図1に示す時間波形は、矩形に近づける事がベースとなっているため、時間軸を対称軸として上下で線対称なる事を重視していない。そこでこの非線対称成分が、従来の変調方式には含まれていない成分である事から、何らかの歪となって現れると考えた。

図9は、図1のアイパターンを基に出力した場合の実測結果である。図8と比較して設計値の60dBから大きく劣化している事が分かる。ここで図1の時間波形をベースに、計算機上で周波数スペクトラムを再計算したものがAであり、さらに非対称成分を取り除いたものがBである。これらの結果から、非対称成分がACLR特性の劣化と大きく関係している事が明らかである。

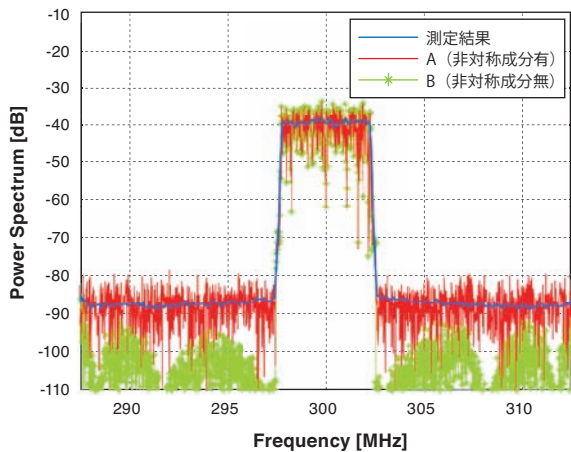


図9 非対称成分を含む時間波形

さらに、一般的なアイパターンによる影響を調べるため図10にモデル化を行った。このモデル化では、波形の種類に加えて、遷移時間（立ち上がり、立ち下り）を条件として計算を行なっている。

ここで、時間波形として exp (x) の場合に注目すると、

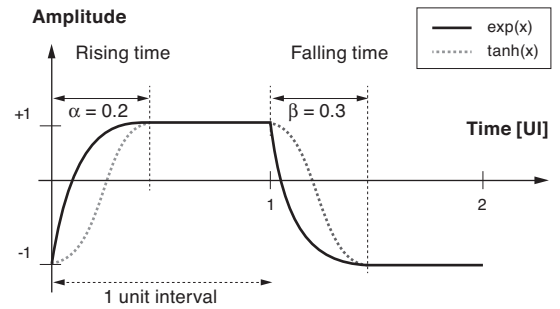


図10 アイパターンのモデル化

立ち上がり波形及び立ち下り波形は、充放電時の様な波形となっている。遷移波形は直線的に遷移していないが、時間軸を対称軸として線対称な遷移となっている事が分かる。ここに線対称、非線対称の基本的な考えが反映されている。

表1は、線対称と非線対称の場合について、波形の種類と遷移時間を変更した場合の結果について示している。まず線対象の場合については、遷移時間に依らず、常に高いACLRが得られる事が分かる。次に非線対称の場合については、ACLRが大きく劣化している事と、前述した通り非対称成分を取り除くと高いACLRへ回復する事が分かる。これらの事より高いACLRを得る条件は非線対称成分を抑える事であり、遷移時間については任意でよい事が分かった。

この事実は、1ビットデジタルRFに必要な時間波形が時間軸を対称軸として線対称な時間波形であれば、滑らかに変化する波形でも特性は劣化しない事を示している。矩形波に近づける必要が無いため、飛躍的に特性改善の選択肢が広がる事を意味している。

この成果に基づき、対称性を重視した試作機開発に取り組んだ。

表1 計算結果

Waveform	Setting Parameters Transition time [UI]		Result ACLR [dB]				
	Category	Rising time	Falling time	Sout		Sout Removed asymmetry	
		α	β	ACLR1	ACLR2	ACLR1'	ACLR2'
Ideal		0	0	61.7	60.9		
exp (x)	Symm.	0.2	0.2	61.7	60.9		
		0.4	0.4	61.7	60.9		
tanh (x)		0.2	0.2	61.7	60.9		
		0.4	0.4	61.7	60.9		
exp (x)	Asymm.	0.2	0.4	44.1	44.1	61.7	60.9
		0.4	0.2	43.9	44.1	61.7	60.9
tanh (x)		0.2	0.4	30.2	30.3	61.7	60.9
		0.4	0.2	30.2	30.3	61.7	60.9

3. 開発事例

図11に1ビットデジタル送信試作基板を示す。この送信基板は、FPGAから1ビットパルス列を出力し、各種パラメータはネットワークを介して設定する事ができる。今回は、表2に示す条件の基で予めオフラインで計算した1ビットデータ列をダウンロードし、このパルス列を出力させた。

表2に示す各種諸元を用いてACLRが最大となるようにパラメータの最適化を図った結果、図12に示す送信スペクトラムを測定する事ができた。

これにより、ほぼ設計値通りのACLR特性が得られる事が確認できた。この特性は、3GPPや電波法の規制値をクリアし、無線基地局用途としても実用のレベルに達したと自負している。

また、メモリによる無線器構成が可能である事も確認した。

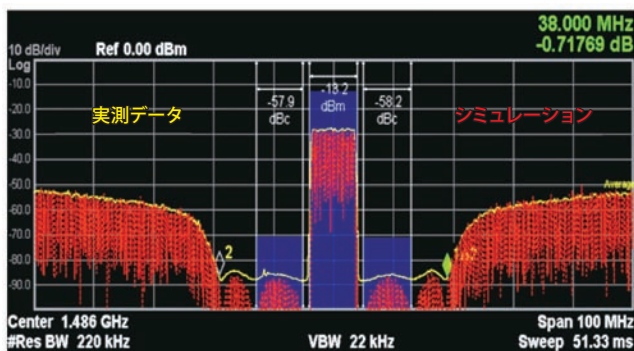


図12 送信スペクトラム

4. 結 言

1ビットデジタルRFにより、ACLR特性が58dBの性能を達成する事ができた。この技術は様々なアナログシステムを変革していくためのツールである。今後はさらに新分野とのコラボレーションを検討し、より幅広くこの技術が市場で活用してもらえるよう開発を進めたいと考える。

参 考 文 献

- (1) R. Schreier and M. Snelgrove, "Bandpass delta-sigma modulation," Electron. Lett., vol. 25 (Nov. 1989)
- (2) Takashi Maehata, Suguru Kameda and Noriharu Suematsu, "High ACLR 1-bit direct radio frequency converter using symmetric waveform," Proceedings of the 42st European Microwave Conference (Oct. 2012)
- (3) Altera, Understanding the Pre-Emphasis and Linear Equalization Features in Stratix IV GX Devices, an602 (November 2010)

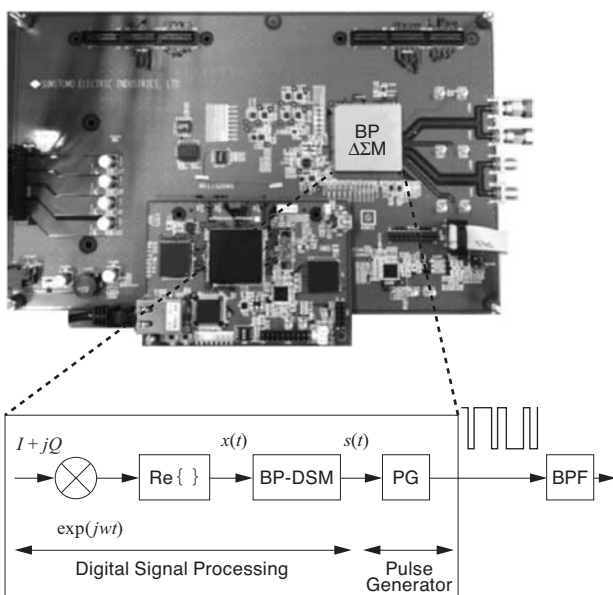


図11 1ビットデジタル送信試作基板

表2 本試作仕様一覧

パラメータ	値
テスト信号	OFDM
搬送波周波数	1.48 GHz
帯域幅	7 MHz
ΔΣ変換方式	BP-DSM CRFB 6 orders
出力レート	3.9 GB/s
オーバーサンプリング率	約100倍
出力電圧	0.5 Vp-p
プリエンファシス	3 taps ⁽³⁾
サイズ	160 × 260 mm

執 筆 者

前島 貴*: 情報通信研究所 主席



戸谷 一幸 : 情報通信研究所 主席

朝夷名 巧 : 情報通信研究所 プロジェクトリーダー

立花 宏之 : 住友電工システムソリューション(株) 機器開発部 主席

*主執筆者