

氏名	まえ はた たかし		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成30年3月27日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 通信工学専攻		
学位論文題目	1ビットバンドパス $\Delta\Sigma$ RF変調器の低歪み・マルチバンド化に関する研究		
指導教員	東北大学教授 末松 憲治		
論文審査委員	主査 東北大学教授 末松 憲治	東北大学教授 中沢 正隆	
	東北大学教授 陳 強	東北大学准教授 亀田 卓	

論文内容要旨

無線システムでは、増大するトラフィックに対応するため高速、大容量化に向けた様々な取り組みが行われており、小セル化、Massive MIMO 送信機、キャリアアグリゲーションといった技術導入が進められている。これらの送信機能は、無線アンテナユニットに実装されベースバンドユニットと連携した無線システムを構成することで運用されており、この無線アンテナユニットの高機能化とそれに伴う大型化がシステムを実現する上で重要な問題となる。本論文は、この大型化の問題について、Massive MIMO 送信器の集積化、マルチバンド送信器の集積化、ベースバンドユニットへの機能集約化による小型化について、RF 信号をデジタル化する、いわゆるデジタル RF 技術を導入することで、この問題を解決をすることを目的としている。

Massive MIMO 送信器やマルチバンド送信器に関する集積化は、半導体の微細化技術を応用した集積化が必要であり、同時に微細化に伴う低電圧化の対策が求められる。また集積化が進行することで信号線間の距離が縮まり、想定外の飛び込みや干渉が発生するためその対策も必要となる。特に無線アンテナユニットの周波数変換部は、入力信号と局部発振器の正弦波をアナログ乗算し、非線形処理によって周波数変換の機能を実現しているため、多数の送信機間で発生する想定外の飛び込みや干渉に弱く、歪の発生源となる。この対策として、周波数変換部のアナログ乗算機能についてデジタル乗算へ変更することで想定外の飛び込みや干渉を回避することができる。この結果、周波数変換部の出力は、RF 信号をデジタル化したデジタル RF 出力となる。また同時に低電圧化対策として、振幅方向から時間方向で信号電力比対雑音電力比を確保することについて考慮すれば、周波数変換部の出力は、1ビットデジタル RF 出力となる。本論文は、この1ビットデジタル RF 技術として1ビットバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器を採用した。

従来の1ビットバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器は、単一の送信器にシングルバンドで送信する研究が進められており、1ビットデジタル信号の出力波形の歪み、その際に発生する歪成分の補償として増幅器の飽和モデルの適用が検討されている。しかしながらその補償能力は補償帯域幅、補償量共に極めて限られていた。一方、次世代の無線通信システムでは、複数の送信器からマルチバンド信号を出力することが求められている。そこで本論文では、

低歪み送信信号の実現とマルチバンド機能の実現に取り組み、さらに実用化を視野にデジタル信号の光ファイバー伝送を想定した伝送路符号化機能の実現、と3つの技術課題に取り組んだ。この高機能化された1ビットBP-DSM技術により、1ビットデジタルの形式で複数のRF信号を出力でき、さらに伝送路符号化機能を開発したことで、光ファイバ内を1ビットデジタル化されたRF信号を伝送できることを実現した。さらに従来は無線アンテナユニット内に配置していた周波数変換機能をベースバンドユニットへ集約化でき、無線アンテナユニットは、増幅器とアンテナの最小構成となり、大幅な小型化を可能とした。また、今回採用した1-bit BP-DSM技術は、伝送速度を一定のまま、出力する搬送波周波数を自由に変更することができるため、光インタフェースを変更することなく、搬送波周波数の変更、搬送波周波数の追加、変調帯域幅の変化が容易に実施でき、今後の無線システムの発展に対し柔軟に対応できる。以下、各章の概要について記す。

2章は、1ビットBP-DSMのデジタル出力信号を用いて直接無線信号を出力する際に発生する波形歪について波形分離処理を導入し、波形歪と隣接チャネル漏洩電力の関係について定式化を行った。また、この波形分離により出力する時間波形が、時間軸に対し非線対称な時間波形となる場合でも、波形に含まれる非対称成分(歪の要因)を分離、除去することで、設計通りの高い隣接チャネル漏洩電力比を達成できることを確認した。

3章は、1ビットBP-DSMのデジタル出力波形に含まれるこの非対称成分による歪成分について、歪補償の立場から歪発生過程について考察を行い、通信帯域内に発生する歪について着目し、そのレプリカを生成して歪と相殺することで歪補償を実施した。検証では、立ち上がり時間、立ち下り時間、それらの組み合わせた全ての場合において、歪補償後は設計値通りの高い隣接チャネル漏洩電力比を達成できることを確認した。また、歪のレプリカについては、データ速度を増加させることなく生成できることを示した。

4章は、1ビットBP-DSMのマルチバンド機能として複数の無線信号を周波数多重し1ビットデジタルデータとして出力することを行った。この実現に当たり、ループフィルタとして2次巡回型フィルタを並列接続する構成を導入した。この構成では、送信するバンド数に応じて適応的にフィルタを分割・結合を行うことができ、帯域別にフィルタ特性の最適化を図った。この変調器の演算量負荷は、各変調信号の帯域幅にのみ依存し、キャリア間の周波数間隔に依存せず、搬送波周波数を自由に変更することができることを示した。

この方式の実証として2波同時送信の事例では、出力速度10Gb/sを用いて、3.5GHz、2.1GHzにおいて、変調帯域幅40MHzのLTE信号を出力し、隣接チャネル漏洩電力比-49dBc、-50dBcを達成した。さらに、出力速度10Gb/sを一定としたまま、ループフィルタの係数を変更し3波同時送信も実証した。その結果、中心周波数3.5GHz、2.1GHzに加えて3波目として0.8GHzが同時送信可能となり、また各帯域における隣接チャネル漏洩電力比も-45dBcを達成することを示した。この3波同時送信の事例では、総変調帯域幅が120MHzとなり、LTE-Aにおいて規格されているキャリアアグリゲーション100MHzを上回る結果となっている。

5章は、4章のマルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調のデジタル出力波形に含まれるこの非対称成分による発生する歪について、3章の歪補償機能を拡張して各帯域別に独立した歪補償を行った。検証では、立ち上がり時間と立ち

下り時間について、0~0.5 [UI]の範囲で変化をさせて歪補償を実施し、その全ての組み合わせにおいて、検証条件に依らず、常に設計値まで隣接チャネル漏洩電力比を実現できることを確認した。

6章は、光ファイバを用いてデジタル伝送可能な1ビット BP-DSM を実現するため、伝送路符号化方式に対する周波数領域での特性に着目し、低周波帯域における量子化ノイズを低減することでこの伝送路符号化の効果を實現した。この機能は、マルチバンド DSM を応用して實現することができ、低周波帯域における量子化ノイズの抑圧量と帯域幅を最適化することにより、従来の伝送路符号化 8B10B と同程度の DC バランスとランレングスを實現した。

7章は、本論文の結論と今後の展望について示した。上述した通り、次世代の高速通信を実現するために必要な、小セル化、Massive MIMO、キャリアアグリゲーションによる無線アンテナユニットの大型化に関する問題解決に対し、デジタル RF 技術の導入（1ビット BP-DSM）を行い、無線アンテナユニットの小型化を実施した。

今後の展望では、本論文で取り扱ったデジタル RF 変調技術の高周波化について記載した。デジタル RF 変調技術は、オーバサンプリング技術をベースとして構成されておりサンプリング速度の半分の周波数までしか高周波を出力することができない。しかしながら第5世代無線通信システム以降の通信システムにおいては、現在よりもさらに広帯域かつ高周波で出力することが考えられている。そこでこれらに対応する方法として、デジタル RF 信号の出力波形が矩形波であることを活用して、その高周波成分を利用する方法が考えられる。通常デジタル RF 信号は NRZ で出力されており、高調波成分は、Sinc 関数に従って抑圧されている。そこで、使用したい高調波成分を強調するには、このパルス幅を 50% (RZ 符号)、25% と圧縮する毎に高周波成分が強調される。これの効果によって高周波成分を活用出来る様になる。

最後に、デジタル RF 信号と誤り訂正機能の融合の可能性について触れておく。デジタル RF 信号は、オーバサンプリングベースとして構成されており、入力信号に対して 50 から 100 倍近くの冗長性を持っている。第6章では、この冗長性を活用して伝送路符号化の機能を實現し、ランレングス、DC バランスの制御を行った。このランレングスは、仮に5ビットを想定した場合には、連続5ビット以上の0又は1が継続しないことを意味するため、5ビットを1つの状態と考えれば32状態を持った状態遷移表やトレリス線図を作成することができる。従ってビタビ復号のアルゴリズム等を用いることでデジタルデータ列に発生する誤りを検出、訂正することが可能となる。符号理論の視点からは、オーバサンプリング率は符号化率 R は $1/\text{オーバサンプリング率}$ と等しく、 $1/50 \sim 1/100$ と極めて低い符号化率となるため、符号化利得は少なくとも $10\log(1/R)$ は 17 dB から 20 dB あり、非常に大きくなることを期待でき、光ファイバ伝送時には、長延化技術の1つとなる。

今後、このような機能が実装されることで誤り訂正機能、直交変調機能、周波数変換機能等の送信系の全体最適化が進み、現在の設計方針が各機能毎の部分最適解であった視点からより自由かつ高度な、多様性のあるデジタル RF 無線の世界が広がることが考えられる。

論文審査結果の要旨

高速・大容量無線通信システムの実現を目指し、Massive MIMO (multi-input multi-output) やキャリアアグリゲーションの開発が進められており、マルチバンド送信機を一つの無線局に多数配置することが求められている。本論文は、無線信号をバンドパス $\square\square$ 変調 (BP-DSM) を用いて1ビットデジタルデータへ変換し、デジタル部より直接、高周波信号として出力することで、無線機の小型化を図った研究をまとめたものであり、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、デジタル部より出力する時間波形が矩形波から歪む場合に生じる波形歪みと隣接チャネル漏洩電力の劣化量の関係について述べている。時間波形の立ち上がり波形と立ち下がり波形の対称性に着目し、この対称性からのずれ分を波形分離して抽出し除去することで、設計通りの高い隣接チャネル漏洩電力比を達成できることを明らかにした。この非対称成分による歪みの影響を定量化した成果は、簡便かつ安価にBP-DSMを実現する上で、極めて重要な知見である。

第3章では、第2章で分離した非対称成分のレプリカを生成し歪補償を実施した。デジタルデータの変化に同期した1ビット出力をフラクショナルフィルタに入力することでレプリカが生成できることを示した。その結果、従来の7倍に当たる140 MHzの広帯域歪補償を実現し、歪補償後は設計値通りの高い隣接チャネル漏洩電力比を達成できることを実証した。この成果は、実用上極めて高く評価される。

第4章では、1ビットBP-DSMのマルチバンド化を行い複数の無線信号を周波数多重し1ビットデジタルデータとして出力できることを実証した。BP-DSM内部のデジタルフィルタの係数を最適化することで、信号処理負荷を変えずに各変調信号の帯域幅とマルチバンド数を自由に変更できることを世界で初めて実証した。この成果は先駆的な研究成果として高く評価される。

第5章では、第4章で開発したマルチバンドBP-DSMの変調器出力のマルチバンド歪補償について述べている。第3章での歪補償機能をマルチバンド対応に拡張することで、帯域毎に独立に歪補償を行った。歪補償信号は1ビットデジタルデータ内に多重することで外部回路を用いずに歪補償を実現した。これは、マルチバンド送信機を実現する上で極めて有用な成果である。

第6章では、光ファイバを用いてデジタル伝送可能な1ビットBP-DSMを実現するため、伝送路符号化方式に対する周波数領域での特性に着目し、低周波帯域における量子化ノイズを低減させることでこの伝送路符号化の高性能化を図った。この機能は、マルチバンドBP-DSMを応用して実現でき、低周波帯域と通信帯域における量子化ノイズをデュアルバンドで抑圧することにより、従来の高速シリアル伝送路符号化方式である8b/10bと同程度のDCバランスとランレングスを実現した。この成果は実用的であり高く評価される。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、1ビットBP-DSMについて低歪み化とマルチバンド化ならびに光ファイバ伝送を想定した低雑音伝送路符号化を実現し、無線機の小型化に関して高い有効性を示したもので、無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。