

情報通信分野の信号処理技術

Signal Processing Technology in the Information and Communication Field

前畠 貴

Takashi Maehata

90年代以降、通信技術は急速に進化し、特に放送のデジタル化が通信と放送の融合を加速させた。これにより携帯端末での放送・動画再生が一般化し、通信需要は爆発的に拡大した。当社は通信システムの携帯基地局向け大出力電力増幅器において、GaN-HEMTと高度な信号処理技術を駆使し、高効率化を実現することでビジネスを展開してきた。本報告では、この通信システムの根幹を支えるデジタル／アナログ信号処理技術に焦点を当て、現行標準であるOFDMシステムを中核に据え、通信システム・増幅器・GaN-HEMTモデルの技術展開と今後の展望を述べる。

Since the 1990s, communication technology has rapidly advanced, and specifically, the digitization of broadcasting has greatly accelerated the convergence of communication and broadcasting. This evolution has popularized broadcasting and video playback on mobile terminals, leading to a tremendous increase in wireless communication demand. Our company has been developing our business by utilizing GaN-HEMT and advanced signal processing technology to achieve high efficiency in high-power amplifiers for mobile base stations in communication systems. This paper focuses on the digital and analog signal processing technologies that form the basis of these communication systems, highlighting the currently widely used Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) system. It also describes the technological development of communication systems, amplifiers, and GaN-HEMT model, along with future prospects.

キーワード：信号処理、OFDM、デジタルRF、GaN-HEMT、増幅器

1. 緒 言

90年代から、テキスト、音楽、動画、映画、高精細動画と次々に新サービスが展開し、有線・無線分野に関わらず通信の需要が拡大した。このサービスを下支えした通信サービスが、ADSL、VDSL、PLC、FTTH、WiFi、3G、4G、5G携帯電話であり、今もその進化が続いている^{(1)、(2)}。図1に、各年代と伝送速度の関係を示す。当社は、有線系においてxDSL、FTTH等のシステム系、無線系では増幅器デバイス等の部品系の製品化を図り、スマイルカーブにおける両端でのビジネスを展開してきた。

一方、技術に目を向けると、FTTHを除く全ての通信システムが、OFDM伝送方式を採用している。この商用化されたOFDM技術分野において、当社は幅広くビジネス展開を行うトップリーダー企業である。

これまでビジネスを通じて商用化、小型・低コスト化を実現する中で、OFDM技術に精通し、アナログとデジタルの両面から信号処理技術に取り組み、瞬時電力抑制技術、歪補償技術、誤り訂正技術などデジタルによる信号処理技術と、基地局増幅器の負荷変調に代表されるデジタルとアナログによる信号処理技術を用いた増幅器の高効率化技術の蓄積、さらにはGaN-HEMT^{*1}の技術革新によって今日に至る。

以下、OFDM技術を中核に据え、通信システム・増幅器・GaN-HEMTモデルの技術展開と今後の展望を述べる。2章にてデジタル信号処理、3章にてアナログ信号処理としての側面から負荷変調について記述する。

2. 通信システム

2-1 携帯電話システム

図2に、90年代から現在までの第3世代からの携帯電話システムの変遷を示す。第3世代まで無線装置は一体型無線基地局が主流であり、その後、無線部が分離され、その装置間をデジタルの光伝送技術で接続する形態となった。また、図3に示すように、機能が分離したことにより無線部が小型化しアンテナ直下に配置できるようになり、アンテナと増幅器までのケーブル損が削減され、放熱機構の少ない高効率化な増幅器が必要となった。また、無線部が小型化したことで、さらなる通信量の増大対策としてキャリアアグリゲーションやマッシュMIMOの開発が進み、無線出

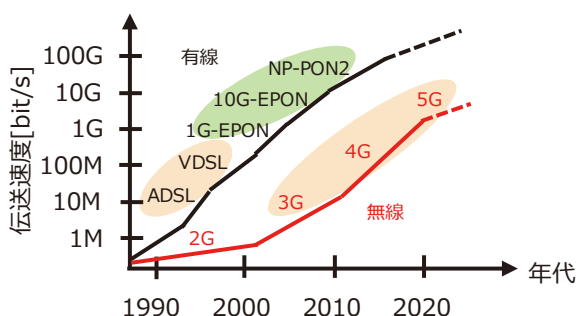


図1 各年代別と伝送速度の推移

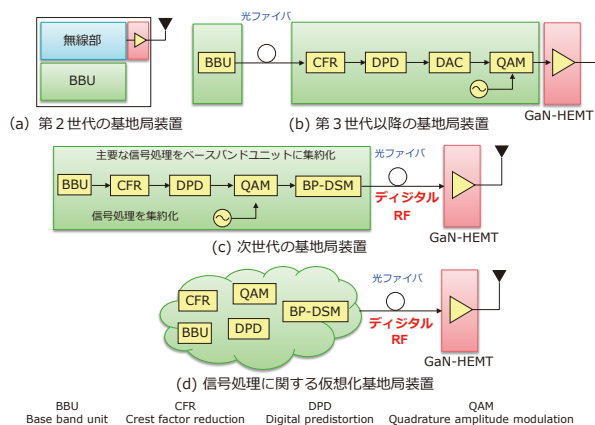


図2 携帯電話システムのシステム俯瞰図

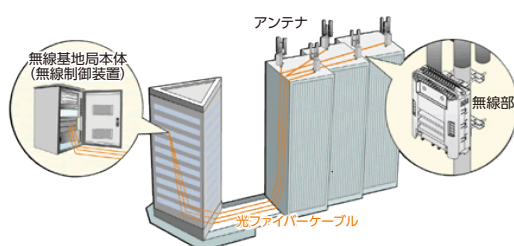


図3 無線部の配置例

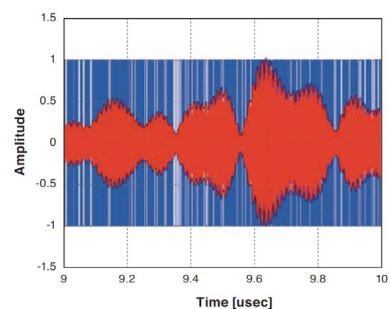
力の大出力化と小出力化の2極化した市場が形成された。当社は、化合物半導体の特徴を活かし、GaN-HEMTにより主として大出力の市場でビジネスを展開している。

図2には、さらに無線部の小型化を加速する技術展開の予想図⁽³⁾を示しており、無線部からデジタル信号処理部を分離して、増幅部のみとした。基地局部にデジタル機能が集約されたことで、今後クラウド化やAI基地局内でGPUによる演算処理となることが容易に想像される。

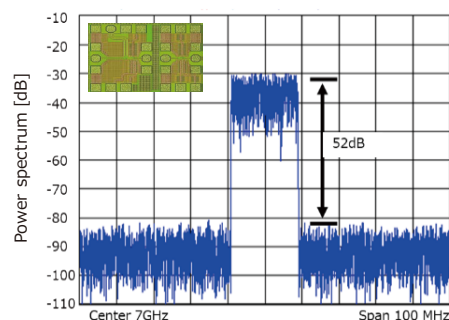
一方、基地局と増幅部を接続するデジタルの光ファイバは、2値化したデジタルデータとして無線信号を伝送する機能が必要となる。当社では、この1つの実現方法としてデジタルRF技術の開発に取り組み、2024年3月にデジタル信号処理に関する論文賞を受賞すると共に、同年6月には国プロを活用した1-bit DAC IC開発を行い、無線信号の2値化を実証した。図4 (a) にOFDMを用いた変調波形が1-bit デジタルデータに変換される様子、(b) に1-bit DAC (GF社 45nm CMOS 0.4 × 0.7mm² 16Gb/s) による出力送信スペクトラムを示しており、1ビット信号にも関わらず非常に高い隣接チャネル漏洩電力比を実現した。現在6Gに向けた変調信号にも対応すべく広帯域・高SNRの開発を進めている。

2-2 通信と放送の融合

2000年～2010年には、世界中の放送業界でデジタル化が行われた。日本では、2003年にOFDM方式を用いた



(a) 変調波とデジタルデータの関係



(b) 出力スペクトラム

図4 デジタルRFの出力波形

地上波デジタル放送が開始され、2011年の地上アナログ放送が停波した。地上波放送のデジタル化により、通信と放送の融合が加速し、2005年のYouTube開設、2007年のスマートフォンの登場により、携帯電話で放送・動画を再生することが日常化し、通信の需要が一気に拡大した。

2-3 誤り訂正符号

動画に関する高速・高画質再生の要望が高まったことから、無線通信として高速化が必須となり、2008年1024QAMを用いた1G/bpsのOFDMシステムを開発した。また高画質対策として通信路で発生するビット誤りを訂正する誤り訂正符号が必要となり、2009年に10Gb/sの低密度パリティ検査符号 (LDPC) のコーデック⁽⁴⁾を開発し放送局へ試作器を納品した。2010年には衛星通信向けとして、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) とADCが不要となるLDPCのコーデック検討⁽⁵⁾を行った。その後、2011年にエンコード140Gb/s、デコード500Gb/s⁽⁶⁾の開発を行った。現在、LDPC技術は地上波デジタル放送、4Gの携帯電話の用途別に標準化が進み利用されている。

一方で、有線系での高速・高画質化への要望は、無線系よりも非常に高く、市場が急激に立ち上がり、画像圧縮技術の進化と通信路で発生するパケット欠損を再送以外の方法で訂正する消失訂正符号が必要となり、LDPC符号を改良したRaptor符号が開発された。2002年に当社は、この符号を搭載したIP-STB⁽¹⁾を開発し、トライアルサービスを開始している。

2-4 OFDM伝送方式

図5にOFDM伝送方式の概要を示す。一定の周波数間隔で配置した周波数（サブキャリア $f_1, f_2, \dots, f_n$ ）上に送信データを入力し、アンテナから電波（時間波形）を送信する。周波数成分から時間波形を効率よく生成する信号処理として逆フーリエ変換が用いられる。一方、受信機では、時間波形から周波数成分を抽出するためにフーリエ変換が用いられる。これらの信号処理手法により送信側から受信側にデータ伝送が行われる。

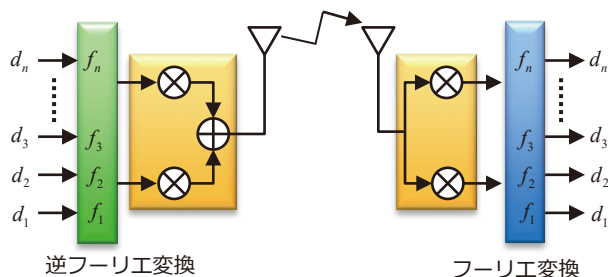
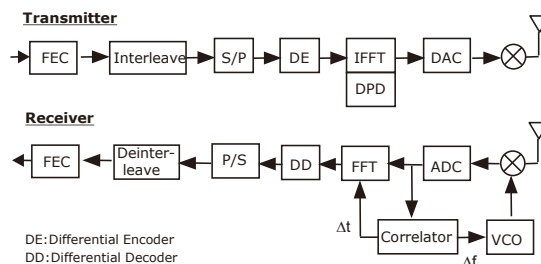


図5 OFDM伝送システムの概要

図6に、1997年に当社が開発したOFDMを用いた路車間通信システムの試作機を示す。(a)にOFDMシステムのブロック図、(b)にFPGAによる信号処理基板、(c)に路車間通信システムを示す。(b)に示した基板は、FPGAの再構成機能を活用して制御局、基地局、移動局全機能を1枚の基板に集約化した。当時の路車間通信システムでは、高速道路にて高速走行を行いながら、路側機と複数の車両と同時通信を行うことが必要とされていた。このため通信ゾーンの高速切り替え機能（ソフトハンドオーバー）としてSFN^{※2}によるOFDMのサブキャリア切り替え方式を採用し各種同期処理を不要とした。その結果、180km/hのテスト走行にて通信実験を行い、その際、高速移動に伴う受信電力の落ち込み対策としてインターリーブとリードソロモン符号による誤り訂正機能を導入することでエラーフリーを達成した。この開発を通じてOFDM伝送方式の全機能⁽⁷⁾を取得した。表1に路車間通信システム諸元を示す。当時、3G携帯電話と同程度の伝送速度2Mb/sを実現した。また、この約10年後、OFDM伝送方式による4G携帯電話の登場により上記専用通信システムは不要となり、図1に示す高速通信の機能により、高速走行中でも様々なアプリの利用が可能となった。

2-5 デジタルRF

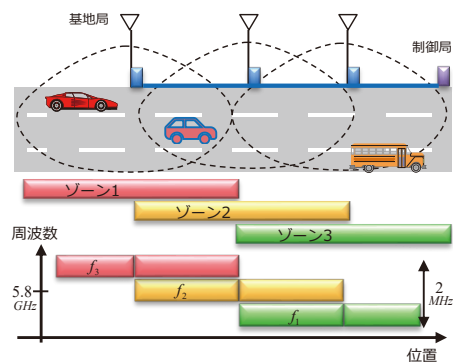
図7に、1ビットバンドパスデルタシグマ変調の信号処理⁽⁸⁾の概要を示す。送信信号I、Qが直交変調と1ビットバンドパスデルタシグマ変調を介して2値化され出力される。この2値化されたデジタルデータは、図4(a)に示すように変調波を内包した信号であり、アナログバンドパスフ



(a) OFDMシステムブロック図



(b) 信号処理基板



(c) 通信ゾーンとソフトハンドオーバー

図6 OFDMによる路車間通信システム

表1 路車間通信システム諸元

Modulation	DQPSK-OFDM	
Transmission frequency	5.8GHz	
Transmission rate	2.048Mbps	
Number of sub-carriers	12	24
Frequency spacing between sub-carriers	93.3kHz	44.7kHz
FFT symbol duration t_s	10.7μsec	22.4μsec
Guard interval duration	$3/32 \cdot t_s$	$3/64 \cdot t_s$

ルタを用いて、帯域外の周波数成分を除去することで、従来の変調波形が再生でき、増幅部とアンテナを通して高周波の無線信号として送信される。この送信信号は、アナログ高周波回路によって出力された信号と同一である。つまり、デジタルRF技術は、アナログ高周波回路を利用することなくその機能をデジタル信号処理で実現し、アナログ無線器をフルデジタル化するための技術である。

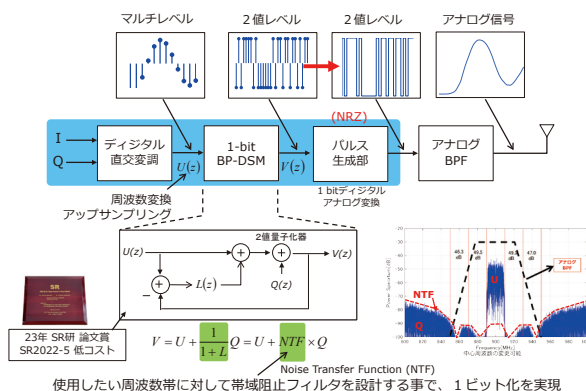


図7 デジタルRFのブロック図

一般にアナログ高周波回路は、周波数別に設計が必要で、かつ周波数別に回路構成が異なるため、常に高周波関連の人材育成と設備投資が必要である。このため、Scrap&Build型の投資効率の悪い開発領域である。一方、デジタルRF技術は、並列処理によるスケーリング則による高周波対応が可能なBuild up型の投資効率が良い開発領域となる。

今後、地上系／非地上系ネットワークで想定されている地上、海、空における様々な無線通信ネットワークにおいてシームレスに接続する通信サービスが望まれており、既存の地上基地局、衛星通信、高高度プラットフォーム(HAPS)、無人航空機(ドローン)など、様々な分野の無線プラットフォームが融合することが想定され、変調方式や周波数に依存性の少ないデジタルRF技術が汎用型無線器となることが期待される。

3. デバイス

3-1 アウトフェーシング増幅器

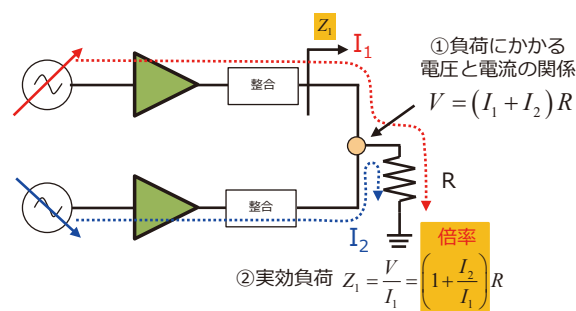
本節では、デジタルとアナログ信号処理技術を用いる代表例として、基地局における高効率増幅器の負荷変調技術と増幅器の大信号モデル技術について報告する。特にアナログ信号処理の側面から負荷制御に着目し報告する。

急激な通信需要の高まりによって、大出力かつ高効率の基地局増幅器が求められている。特に無線部の小型化と低コスト化の視点から、複数の周波数帯に対応可能なGaN-HEMTを用いた広帯域増幅器に対する強い市場要求があり、当社はこの分野へ世界でトップクラスのGaN-HEMTの供給を行っている。基地局増幅器では、複数端末と同時通信し、また端末までの距離減衰を補償する送信電力制御を行い、さらに大きな電力変動を伴うOFDM信号を高効率に増幅しなければならない。具体的には、この電力変動は最大電力から約1/10の電力まで高効率に増幅することが求められている。このような利用背景から基地局では、単一増幅器でこの電力範囲を高効率動作させることが不可能であるため、2台の増幅器を用いた負荷変調を用いた増幅

方式が利用される。

図8に負荷変調の一例としてアウトフェーシング増幅器を示す。2台の増幅器の出力電力の電力と位相を制御することで、各増幅器の出力負荷を変更し、大きく出力電力を変化させつつ、高い効率を実現する。この出力負荷を変更する負荷変調は、電力、位相、電流や電圧といったアナログ(連続量)による信号処理技術である。

図8では、具体例として2入力信号源を持ち、 I_1 、 I_2 の比率と位相差により実効負荷 Z を負荷 R の倍率として変更し、図9のようにRF出力を変更する。実効負荷を変更することで出力電力に応じた最適負荷を使用することができ、低出力でも高効率を実現できる。実際の回路には、図10の



I_1, I_2 の比率と位相差により R の倍率変更： $R \sim 8R$

図8 アウトフェーシング増幅器の構成

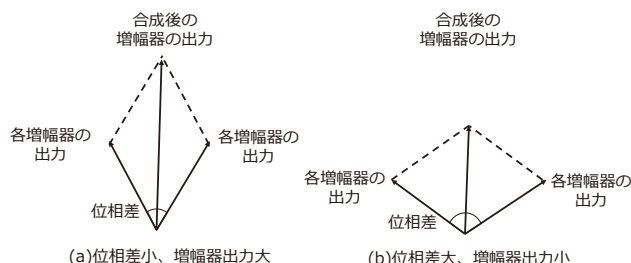


図9 アウトフェーシング増幅器による出力変化

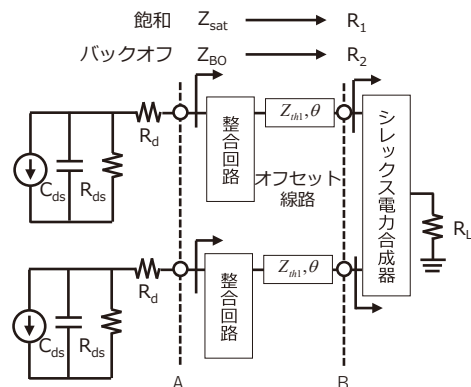


図10 アウトフェーシング増幅器回路図

ように増幅器に対して出力整合回路を配置し、シレックス電力合成器にて2つの回路が電力合成される構成となる。シレックス電力合成器は入力位相差によって生じるリアクタンスを補償する2種のリアクタンス補償 ($\pm jB$) とインピーダンス変換器から構成されている。

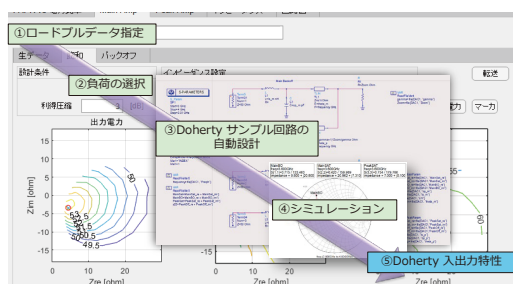
アウトフェーシング増幅器は、2台の増幅器が干渉しつつ負荷変調を行うため設計と調整が一般的に非常に難解であるが、バックオフでの最適負荷と飽和電力での最適負荷に関する連立方程式に関する解析解⁽⁹⁾を導出することで制御が可能である。負荷の軌跡という視点で改めて解釈すると、その始点と終点を制御する技術と位置づけられる。

図11に自動設計ツール、図12に設計事例を示す。このツールでは上述したアウトフェーシング増幅器に加えて、別の負荷変調方式であるドハティ増幅器についても、飽和

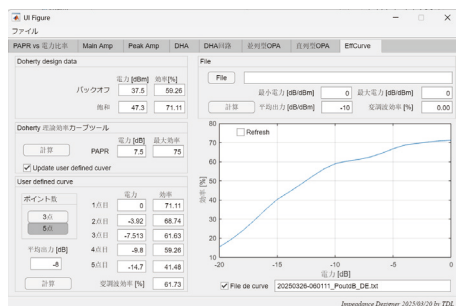
電力とバックオフ電力の最適負荷を入力することで、各種高周波回路の整合回路やシレックス合成器などを簡単なGUI操作によって自動生成ができる。この自動設計による設計期間の短縮によって、増幅器設計の本来業務である高効率、広帯域、低歪化への集中が可能となる。自動設計による設計期間の短縮と本来業務への集中は、市場を活性化する上で重要な取り組みであり、積極的に社外連携^{(10)、(11)}を進めている。

3-2 LMBA

図13に最新の負荷変調増幅器の開発事例として、広帯域LMBA⁽¹²⁾の効率特性を示す。アウトフェーシング増幅器、ドハティ増幅器と同様に、飽和電力とバックオフ電力での最適負荷を選択し、高効率特性を実現した。またこの設計事例では広帯域特性 (3.4-4.2GHz) を実現するため、負荷の始点と終点に加えて、その間の軌跡を含めた最適化を行い、基本波と高調波での負荷を考慮した共振周波数を設定し、負荷の周波数伝達関数を決定した。この関数と右手左手系複合線路の解析⁽¹³⁾をすることで、次世代増幅器に求められるLMBA増幅器の広帯域化を実現した。



(a) 設計フロー



(b) 変調特性

図11 自動設計ツール

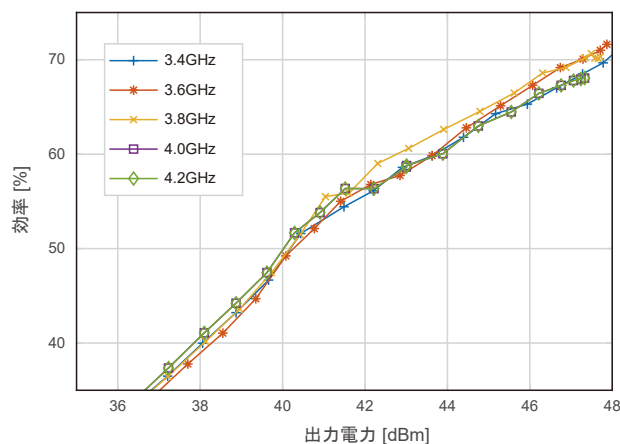


図13 広帯域LMBAの測定結果

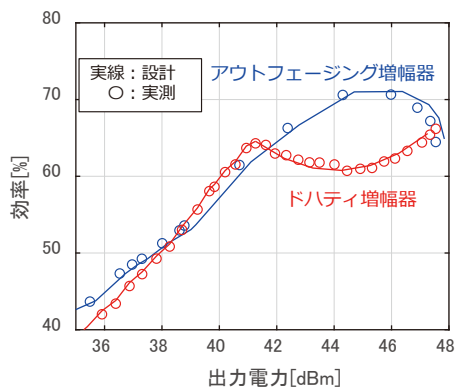


図12 アウトフェーシング増幅器の設計事例

3-3 増幅器の大信号モデル

増幅器における回路設計は、最適負荷を選択し受動回路の解析式を導出することで、ほぼ自動設計することができる。また、高周波領域では、寄生容量を含む電磁界の影響を考慮したレイアウト設計が必要となる。さらに上述したように高効率増幅器の設計では、基本波に加えて高調波を含めた非線形な回路設計が必要であり、増幅器の大信号モデルが必須となる。当社は、トランジスタ構造などの物理諸元を考慮した高精度な大信号モデル開発を進めており、これを利用した様々な増幅器を開発している。この増幅器の大信号モデルは、負荷変調増幅器を開発する上で重要な役割を果たすと共に、市場に最適なGa_N-HEMTを提供する

上でも重要な役割を果たす。さらに、負荷変調が不要な市場に対しても、同様に市場別の大信号モデルを用いて GaN-HEMT の最適化が期待できる。

4. 結 言

今後様々な市場に対応した研究開発が求められる。特に今日の計算能力や大規模言語モデルの登場により、小型かつ高効率な開発が短期間で実現できるようになった。一方で、本論で述べた OFDM や信号処理技術のような基盤技術や大信号モデルを用いた GaN-HEMT の最適化技術は、デジタルやアナログ分野の先端領域において確実に応用が進んでいる。市場環境の変化に柔軟に対応すると共に、未来を見据えて粘り強く開発を続ける必要がある。

5. 今後の展望

本論で記述した OFDM 伝送方式は、次世代の地上系／非地上系ネットワークにおいて、地上、海、空における様々な無線通信ネットワークへの展開が進んでいる。例えば低軌道衛星と携帯電話が直接通信する世界が実現しつつある。

一方で様々な通信環境に適用するには、新しい変調方式も検討されている。現在、衛星やドローンのような高速移動体との伝送速度を改善するため、伝送路特性として重要な遅延スプレッドとドップラースプレッドの制御が検討されている。従来この通信環境由来の二つの物理量はデジタル信号処理で制御不可と考えられていた。しかし、量子力学の不確定性原理の位置と運動量の関係性のように、伝送路特性を確率過程として捉えることで、ハイゼンベルグ変換を用いて最小限まで絞り込む（観測）ことが示されている。

最後に、通信機器でこれら機能を実現するには、フーリエ変換や OFDM 伝送方式を改良し、上記変換と接続することが検討されており、瞬時電力の低減や無線とセンシングの融合も示唆されている。本論で記載した OFDM 伝送方式に関する基盤技術の市場実績は、今後も活用できることが期待される。

6. 謝 辞

本論文で論述したデジタル RF の 1-bitDAC IC 開発について、この成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託事業「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」（JPNP 20017）の結果得られたものです。

用 語 集

※1 GaN-HEMT

High Electron Mobility Transistor : HEMT は、化合物半導体ヘテロ接合で構成される電界効果トランジスタである。高周波性と低雑音性に優れる。

※2 SFN

Single Frequency Network : 単一周波数ネットワーク。複数の場所から同じ周波数でデータを送信し、受信側は所定の時間内であれば、OFDM の場合正常に受信できる。

参 考 文 献

- (1) 西本、[映像通信の進化と当社の役割]、住友電工テクニカルレビュー第 203 号、pp.1-7 (2024 年 3 月)
- (2) 葉玉 他、[高速・低消費電力化を目指す次世代 PON 技術]、(社) 電子情報通信学会誌、Vol.95, No.1 (2012)
- (3) 前畠 他、[1 ビットデジタル RF 無線装置の開発]、SEI テクニカルレビュー第 182 号、pp.91-947 (2013 年 1 月)
- (4) 木下 他、[シミュレーション活用による超 Gbps 伝送基板の設計]、SEI テクニカルレビュー第 176 号、pp.73-79 (2010 年 1 月)
- (5) 豊嶋 他、[対数尤度コヒーレント光受信機 : ADC 不要の高速化アーキテクチャ (リモートセンシング及び一般)]、技術研究報告、vol.110, pp.19-23 (2010)
- (6) 前畠、[Tb/s に迫る超高速 LDPC 復号処理について]、電子情報通信学会大会 (2011 年 2 月)
- (7) T. Maehata et al., "DSRC using OFDM for roadside-vehicle communication system," VTC2000 spring (2000)
- (8) T. Maehata, "Time Division Multiplexing for 1-bit Bandpass Delta-Sigma Modulator," (2024.5.20), Available: <http://doi.org/10.36227/techrxiv.171617299.90995032/v1>
- (9) T. Maehata, "Two-Power-Level Impedance Match for Asymmetric Outphasing Amplifier Using Lossless Reciprocal Network Invariants," (2024.5.), Available: <http://doi.org/10.36227/techrxiv.171468172.20877099/v1>
- (10) Keysight Design Forum 2024 Japan, (2025.04.22), Available: https://online-events.keysight.com/series/day1-rf/landing_page?t=1
- (11) Cadence, [Cadence Microwave Office によるミックスモード・アウトフェーシング増幅器の設計]、(2025.04.22), Available: https://community.cadence.com/cadence_blogs_8/b/rfjapan/posts/cadence-microwave-office
- (12) H. Asami, et al., "A 3.2-4.2 GHz Wideband 47 dBm GaN HEMT Sequential-LMBA with Harmonic Tuned Using CRLH Transmission Line Stub," 2024 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (2024)
- (13) S. Tanaka, et al., "Compact harmonic tuning circuits for class-F amplifiers using negative order resonance modes of CRLH stub lines," 2016 46th European Microwave Conference (EuMC), pp.1063-1066 (2016)

執 筆 者

前畠 貴 : シニアスペシャリスト
伝送デバイス研究所 主幹
工学 (博士)

