

坪内 和夫

東北大学 電気通信研究所・名誉教授

ディペンダブルワイヤレスシステム・デバイスの開発

§ 1. 研究の概要

1. チーム全体の研究の概要

①本研究の背景、社会や産業に存在する問題と本研究の課題

携帯電話・パソコンとネットワーク・半導体の各技術の歴史と技術動向を図 1-1 に示す。携帯電話・パソコンはネットワークや半導体技術を基盤として発展してきた過程が分かる。携帯電話とパソコンが融合した小型・高機能の情報端末を使って、ネットワーク上にある資源にアクセスすることで「いつでも・どこでも・どんな情報でも」を実現可能な環境が整いつつある。しかし、現状では、例えば自動車や家電機器など、全ての装置に無線機器が搭載されているわけではなく、モビリティがある状態では、まだ安定した通信環境を得るところまでには至っていない。

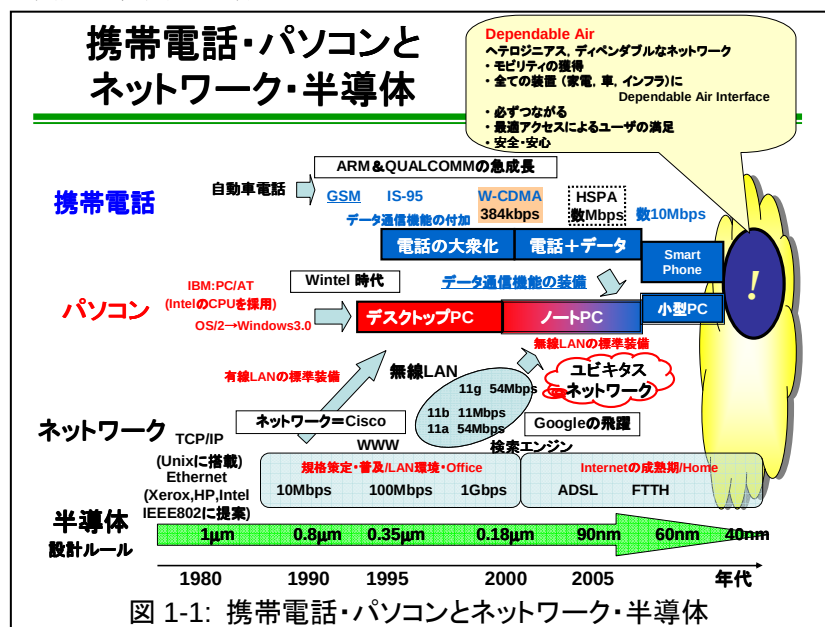


図 1-1: 携帯電話・パソコンとネットワーク・半導体

本プロジェクトにおいて、これまでに我々のグループ内で検討を重ねてきた議論を元に、「ディペンダブル・エア」という概念を提案している（図 1-2）。これまで述べてきた通り、従来の無線規格のいずれか一つのみでは、利用者が満足できるような通信環境を提供することはできない。しかし、複数の無線規格を利用環境に応じてシームレスに切り替えることにより、接続性・高速性の向上を図ることができると考えている。ディペンダブル・エアとは「ヘテロジニアスでかつディペンダブルなネットワーク」と定義できる。具体的には、家電・車・インフラなどのすべての装置に対して無線インターフェース（ディペンダブル・エア・イン

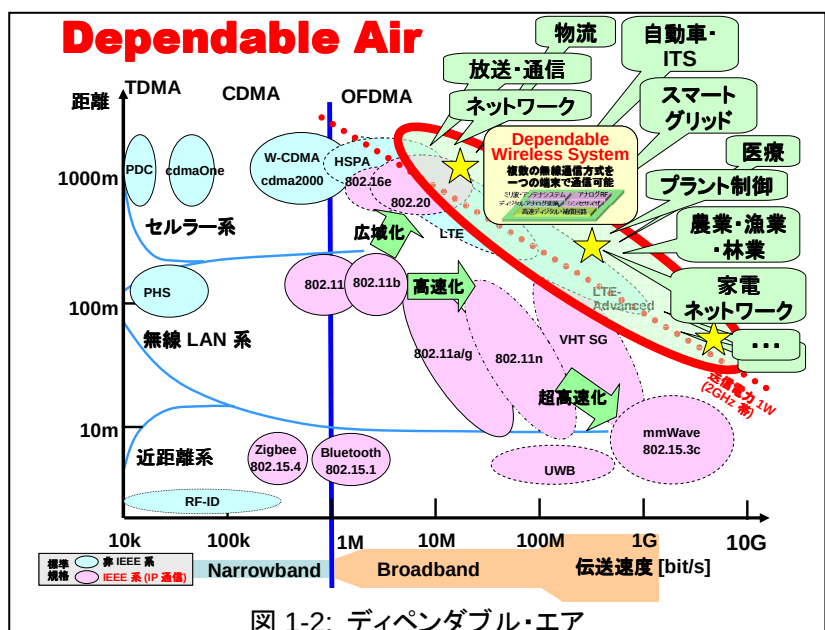


図 1-2: ディペンダブル・エア

ターフェース) を装備することでモビリティを獲得する。各装置は最適なアクセス方式を選択することができることで、安心・安全かつ、必ずネットワークにつながることを実現する。

このディペンダブル・エアによって、これまでの移動通信分野だけにとどまらず、物流、自動車・ITS、医療、農業・漁業・林業など、様々な分野への無線通信ネットワークの普及が期待できる(図 1-3)。

ディペンダビリティについて考えた場合、無線通信技術は有線通信技術と比較しても、そもそもビット誤り率(BER)が低く、傍受されやすいなど、ディペンダビリティが低い分野である。図 1-4 に無線通信におけるディペンダビリティについての考え方を示す。

無線通信におけるディペンダビリティの一つである BER 特性について、従来の無線通信技術では、変復調技術に加え、誤り訂正技術を組み合わせることで、所望の BER 特性を実現してきた。しかし、年代とともに通信速度・スループットの高速化、遅延時間の短縮化、低消費電力化への要求が強くなり、これまでの考え方だけでは不十分となってきた。

そこで、本プロジェクトでは、ディペンダブル・エアを実現するために、まず広帯域化・低雑音化を行い、さらに周波数領域等化技術を用いた伝搬路・RF 回路特性の補償を適用することにより、ディペンダビリティの指標としての BER 特性の改善を目指す。

さらに、ディペンダブル・エアを用いた応用例として、平常時のみならず災害時にも活用可能な高信頼異種統合無線通信ネットワークへの展開も視野に入れて研究開発を進める。

②本研究チームの達成目標

本プロジェクトは、このディペンダブル・エアを実現するための技術である、オールシリコン CMOS を用いたディペンダブルワイヤレスシステムの実現を目標とする。まず図 1-5 に示

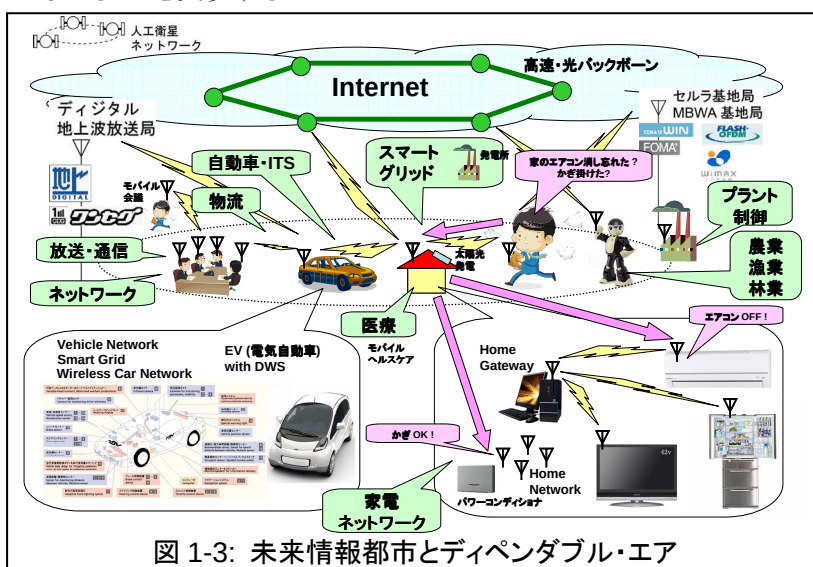


図 1-3: 未来情報都市とディペンダブル・エア

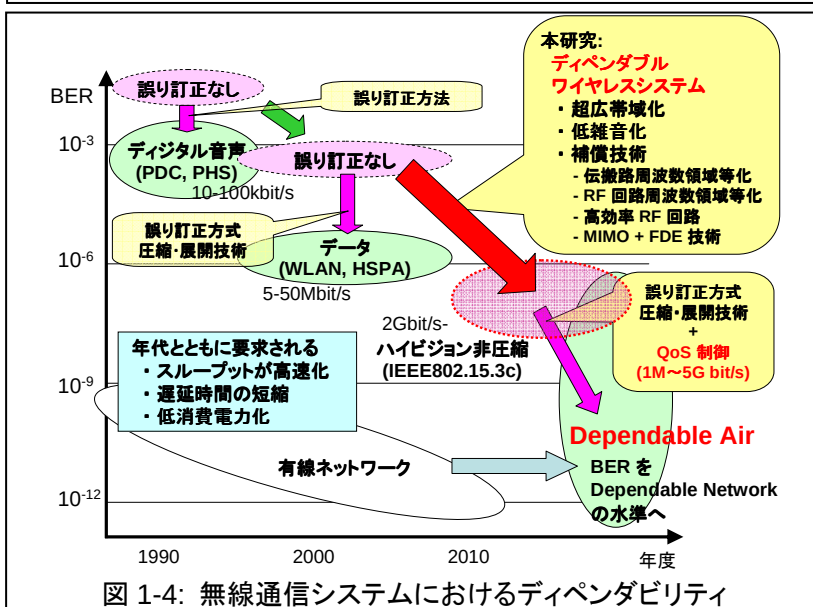


図 1-4: 無線通信システムにおけるディペンダビリティ

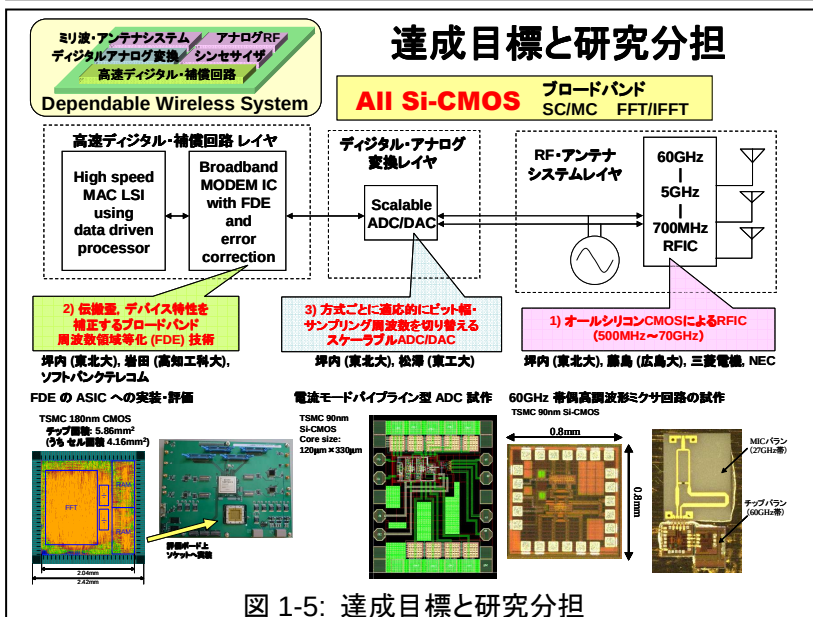


図 1-5: 達成目標と研究分担

す3つの要素技術に関して、研究開発を行う。また、これら要素技術を用いて、応用技術に展開すべく、H23 年度からさらに 3 つの発展テーマについての検討も始めた。

(1) オールシリコン CMOS による RFIC 技術

主に無線通信方式で利用が期待できる 700MHz 帯、5GHz 帯、60GHz 帯について、それぞれの通信規格を満たす帯域幅や伝送速度を実現できるシリコン CMOS 回路で送受信器を実現する。さらに、複数の無線通信規格をひとつの通信端末で実現できるユニバーサル RF 回路を実現する。

(2) 伝搬歪、デバイス特性を補償するブロードバンド周波数領域等化技術

各周波数帯域信号に対して、その伝搬歪やデバイス特性を補償できる周波数領域等化回路の実現を目指す。5GHz 帯や 60GHz 帯の通信方式で用いられている超広帯域信号や RF デバイスに対しても、周波数領域等化を行うことで、BER 特性の改善を目指す。

(3) 方式ごとに適応的なビット幅・サンプリング周波数を切り替えるスケーラブル ADC/DAC

主に利用されている 700MHz 帯、5GHz 帯、60GHz 帯の各無線通信規格において、必要とされているビット幅・サンプリング周波数を切り替えることができ、消費電力などを最適化することができる、スケーラブル ADC および DAC の実現を目指す。まず、それぞれの無線通信規格で適用できる ADC の高性能化を行い、世界最高水準の低消費電力化を目指す。さらに、それらを組み合わせることで、スケーラビリティを有する ADC を実現する。

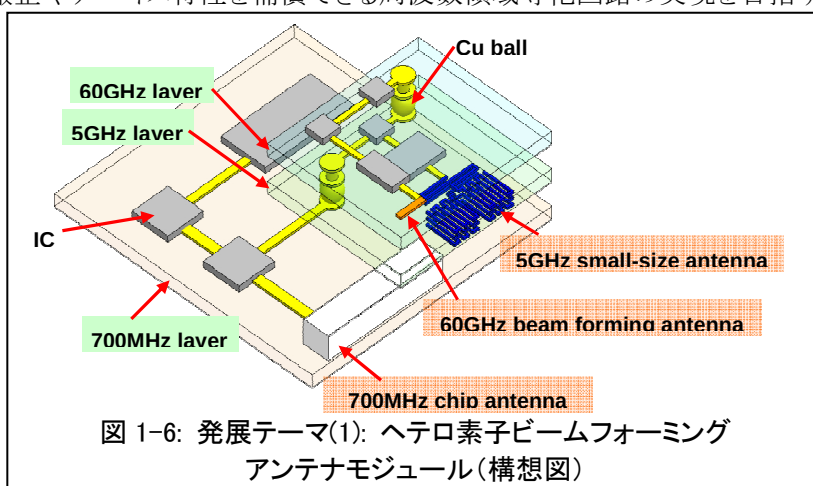


図 1-6: 発展テーマ(1): ヘテロ素子ビームフォーミングアンテナモジュール(構想図)

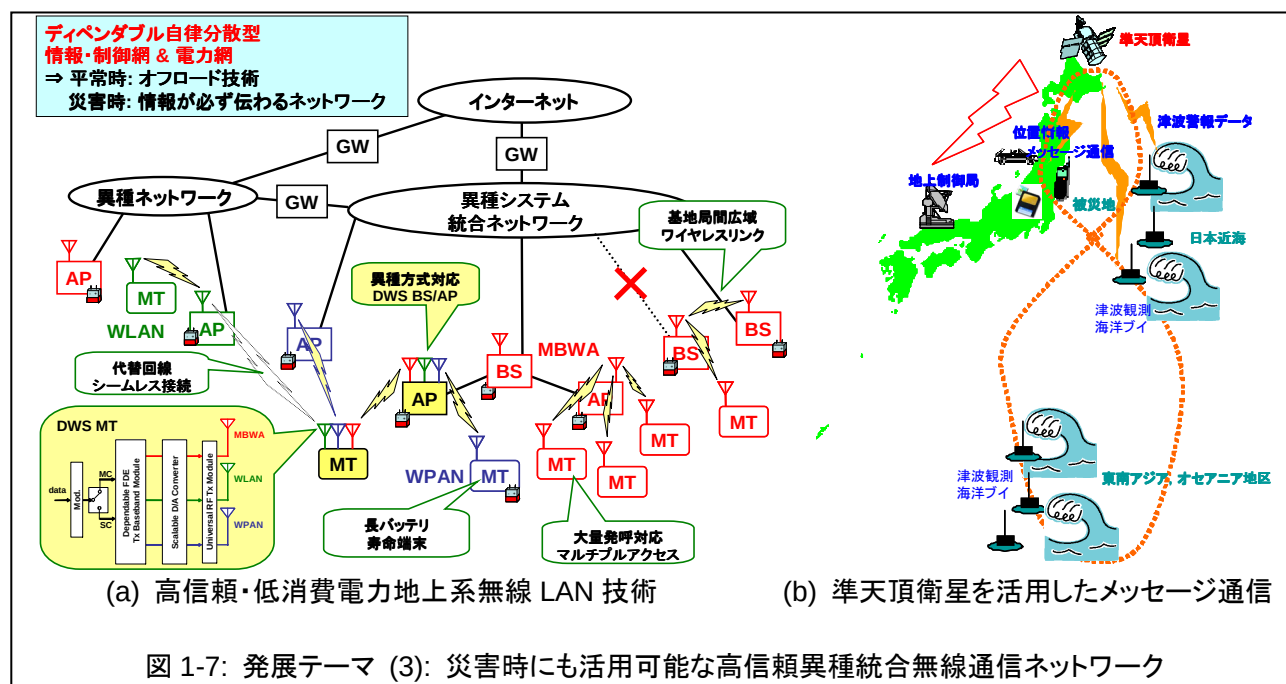
さらに、これらの成果を組み合わせることで、ディペンダブルワイヤレスシステムの実現を目指し、それぞれの要素技術開発の成果とシステム全体の性能・ディペンダビリティ等の向上の関係についての明確化を継続的に行う。

(発展テーマ 1) ディペンダブルワイヤレスシステムのためのヘテロ素子ビームフォーミングアンテナ

これまで 5GHz 帯アンテナの小形化を目指したメアンダラインアンテナや、60GHz 帯三次元システムインパッケージのための小形アンテナの研究開発を行ってきた。これらの研究成果を応用して、複数の無線通信方式に対応でき、かつアンテナ指向性を球面方向すべてに対して 3 次元立体的かつ能動的に制御できるヘテロ素子ビームフォーミングアンテナ技術(図 1-6)の研究を行う。

(発展テーマ 2) ディペンダブルネットワークプロセッサの機能検討

ディペンダブル・エア・インターフェースに必要なディペンダブルネットワークプロセッサを具現化する。ヘテロジニアスなネットワークの融合のためには、まずディペンダブル OS (DeOS) として、複数の移動通信ネット



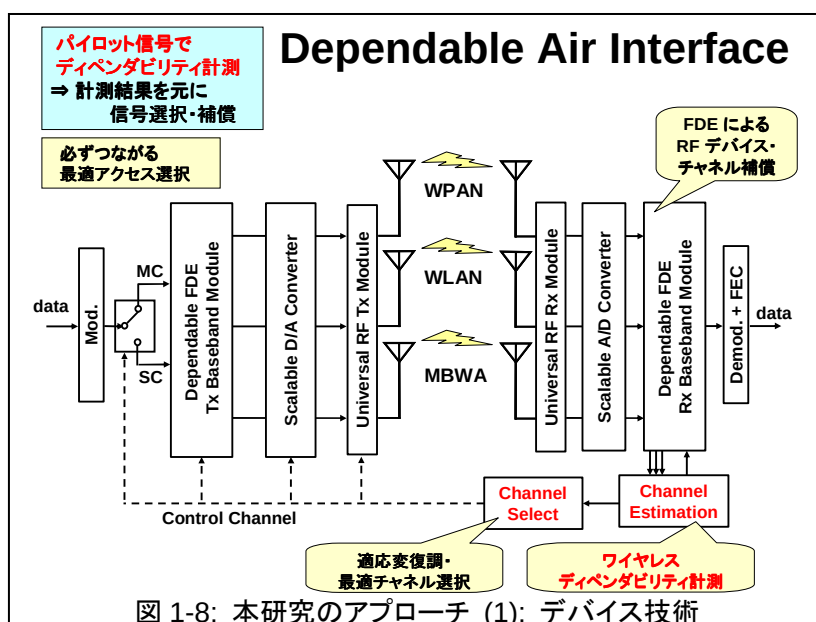
ワークヘシームレスに接続可能である機能を有する OS が必要となる。また、ディペンダブルネットワークプロセッサとして、通信機能に特化して、複数のネットワークに対応可能な専用プロセッサが必要になる。これらを実現するための機能検討や回路検討を行う。

(発展テーマ 3) 災害時にも活用可能な高信頼異種統合無線通信ネットワーク

ディペンダブル・エアおよびその周辺技術を用いることで、平常時・災害時のいかなる状況下においても高信頼性を確保できる異種統合無線通信ネットワーク (図 1-7) を実現する。

東日本大震災時に携帯電話などの無線通信ネットワークの課題として明らかになった (1) 輻輳とその回避のための利用制限による無線通信断、(2) 停電・バッテリー寿命による端末・基地局の通信断あるいは基地局間光ネットワーク障害に対応可能な、大量発呼時にも必ずつながる高信頼・低消費電力地上系無線 LAN 技術を実現するための基礎研究を行う (図 1-7(a))。これらの技術は、平常時には携帯電話帯域の逼迫に対応するためのオフロード技術として活用可能である。

また、震災による地上系無線インフラ喪失により、被災者の安否が、数日以上にわたり不明となった。さらに津波などで流失した車、船なども行方不明となり、震災復興の妨げとなった。これらを解決するために、準天頂衛星を活用して、cm オーダでの高精度な位置 (ロケーション) 情報とともに、ポケベル程度の簡単なデータ/メッセージを衛星経由で双方向通信できる、携帯電話やカーナビにも搭載可能なパーソナル無線端末と無線システムの技術を開発するための基礎研究を行う (図 1-7(b))。



③本研究のアプローチ

図 1-8 は本研究のアプローチをデバイス技術の観点から示した図である。先に示した 3 要素技術を実現することで、複数の無線通信方式の送受信を可能とする変復調回路を実現することができる。特に周波数領域等化技術により、広帯域信号に対する伝搬路・デバイス特性補償を行うことで、個々のデバイスの特性改善だけでは不十分である高性能化を実現することができる。

さらに、周波数領域等化回路の一機能である、伝搬路推定回路によって、周波数成分ごとに伝搬特性を計測することができ、その信号を元に各伝搬路のディペンダビリティ(ワイヤレスディペンダビリティ)を計測することができる。

図 1-9 は本研究のアプローチをネットワーク技術の観点から示した図である。ワイヤレスディペンダビリティ(S/N や BER など)を計測し、干渉除去・補償を行った後に最適な変復調方式や利用チャネル選択することができる。さらに、移動通信環境においては、移動環境下においても、そのつど環境に応じて最適な通信回線をそれぞれのユーザが利用することができる。

④研究実施方法

1) 本研究チーム運営の方針, 研究グループ間の分担・協力関係

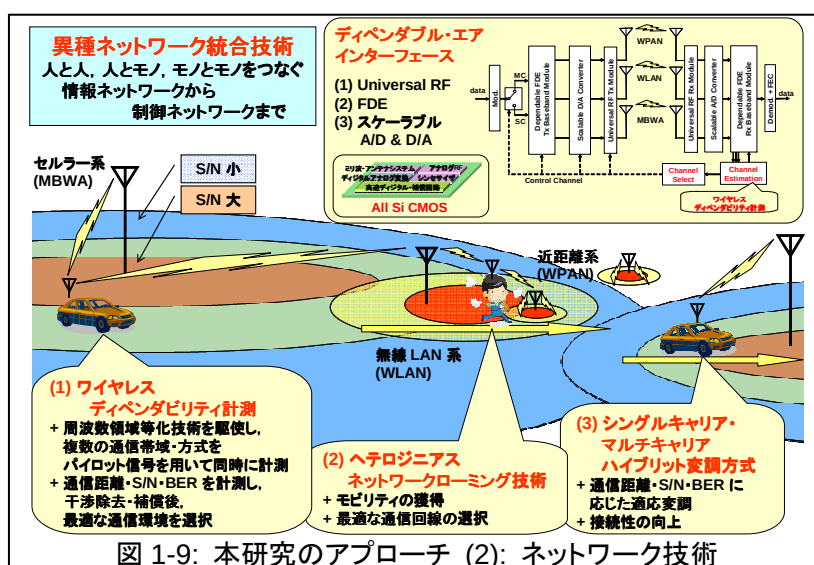


図 1-9: 本研究のアプローチ (2): ネットワーク技術

本研究チームの研究体制を図 1-10 に示す。本研究チームは、研究代表者グループである東北大学グループを核として、3 つの要素技術開発のそれぞれを他大学の研究グループと協力して研究開発を行う。(1) オールシリコン CMOS による RFIC 開発については、東北大学グループと広島大学グループ(藤島教授)が共同で、回路設計・試作・評価を行う。(2) ブロードバンド周波数領域等化技術を中心としてベースバンド信号処理回路については、東北大学グループと高知工科大学グループ(岩田教授)が共同で回路設計・試作・評価を行う。(3) スケーラブル ADC/DAC 開発については、東北大学グループと東京工業大学グループ(松澤教授)が共同で、回路設計・試作・評価を行う。

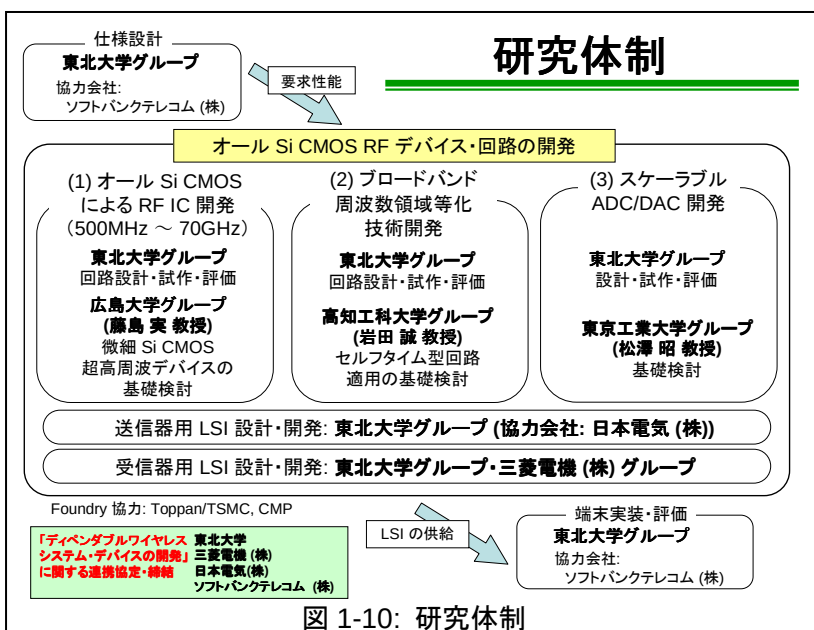


図 1-10: 研究体制

それら要素回路技術を元に、より実用化に近い送信器・受信器用の LSI 開発は、企業の研究グループ等の協力を得て研究開発を行う。送信器用 LSI の設計・開発については、東北大学グループが日本電気の協力を得て行う。また、受信器用 LSI の設計・開発については、東北大学グループと三菱電機グループが共同で行う。また、発展テーマについては東北大学グループを中心として、チーム全体で検討を行う。

2) 領域外部の企業等との連携

先に述べたように、日本電気の協力を得て、送信器用 LSI の設計開発を行う。また、ディペンダブル・エアの仕様設計や端末実装・評価については、通信事業者であるソフトバンクテレコムとの議論を行っている。

以上の企業 3 社（三菱電機、日本電気、ソフトバンクテレコム）と東北大学は、平成 20 年度に「ディペンダブルワイヤレスシステム・デバイスの開発」に関する連携協定を締結しており、より綿密な打ち合わせができる環境を整備している。

さらに、本研究課題の研究成果を活用するために、ルネサスエレクトロニクス、パナソニック、クアルコムジャパンなどと定期的な打ち合わせを行っている。特に発展テーマに関連して、高信頼・低消費電力地上系無線 LAN 技術のスマートグリッド通信等への適用を踏まえて、ルネサスエレクトロニクスなどとの議論を進めている。また、準天頂衛星を用いた高精度なロケーション技術への適用に関しても、関係機関との積極的な議論を進めている。

LSI の試作では、上記の企業以外にも、LSI ファウンドリ・ブローカとして TSMC や凸版印刷、大日本印刷の協力を得ている。周波数領域等化技術の評価用基板の試作については、ノーザンシステムエンジニアリングとの技術提供や協力を受けている。

3) 領域内他研究チームとの連携関係

小野寺チームが主催している「CREST DVLSI テスト構造フォーラム」への参加を通じ、各チーム内で課題になっている LSI 設計技術・評価技術を参加チーム間で共有し、各チームでの研究開発に反映させることを行っている。坪内チームとしては、特にベースバンド信号処理技術の設計と評価についての発表と意見交換を行い、チーム内の研究開発へ生かしている。

2. 研究グループの研究の概要

(1) 東北大学グループ

①本研究グループの研究課題、ならびに所属する研究チームの課題との関係

研究課題: オール Si CMOS RF デバイス・回路の開発

オールシリコンによるディペンダブルワイヤレスシステム LSI の実現を目標として、(1) オールシリコン CMOS による RF IC、(2) 伝搬歪、デバイス特性を補正するブロードバンド周波数領域等化技術、(3) 方式ごとに適応的にビット幅・サンプリング周波数を切り替えるスケーラブル ADC/DAC の実現を目指す。また、発展テーマとして、(発展 1) ヘテロ素子ビームフォーミングアンテナの検討、(発展 2) ディペンダブルネットワークプロセッサの機能検討、(発展 3) 災害時にも活用可能な高信頼異種統合無線通信ネットワークの検討を行う。チーム全体の研究開発の統括を行い、各グループの成果を反映させ、ディペンダブルワイヤレスシステムの具現化を行う。

②本研究グループの達成目標

(1) オールシリコン CMOS による RF IC については、90nm シリコン CMOS を用いた、超高周波デバイスの基礎検討を行い、ディペンダブルワイヤレスシステムを構成するユニバーサル RF フロントエンド技術を確立する。(2) ブロードバンド周波数領域等化技術については、周波数領域等化回路を LSI 上に実装し、伝搬歪・RF デバイスの特性改善の実証を行う。(3) スケーラブル ADC/DAC については、複数のワイヤレスシステムに対し、適応的にビット幅・サンプリング速度を切り替え、最適消費電力で動作可能なスケーラブル ADC/DAC を新たに設計・開発する。特にパイプライン型電流モード ADC の設計・試作・評価を行い、ディペンダブルワイヤレスシステムへの適用を検討する。さらに、上記技術を適用し、それら要素回路技術を元に、より実用化に近い送信器・受信器用の LSI 開発を行う。また、発展テーマは以下を達成目標とする。(発展 1) ヘテロ素子ビームフォーミングアンテナの検討では、これまでに我々のグループで検討してきたアンテナ素子の特性を用いて、アレイアンテナモジュールとしての理論検討・設計を行う。次に、実際に用いる RF・ディジタル回路モジュールへ

の実装を考慮して、電磁界シミュレーションによる設計を行い、実際にアンテナモジュールとして試作・評価を行うことで、無線通信システムの信頼性の向上に寄与する。(発展 2) ディペンダブルネットワークプロセッサの機能検討では、これまでディペンダブル・エアを実現するための無線通信方式の検討を行ってきた結果を整理し、ディペンダブル・ワイヤレス・プロセッサに必要な機能の検討を行う。(発展 3) 災害時にも活用可能な高信頼異種統合無線通信ネットワークでは、ディペンダブル・エア技術を適用することで実現できる、高信頼・低消費電力地上系無線 LAN 技術、および準天頂衛星を活用したメッセージ通信技術の基礎検討を行う。

③研究のアプローチ

先に示した 3 要素技術の個別の技術開発を他グループと共同で進めるが、さらに、それらの技術を組み合わせることで、さらなる高性能化を実現する。特に周波数領域等化技術により、広帯域信号に対する伝搬路・デバイス特性補償を行うことで、個々のデバイスの特性改善だけでは不可能である高性能化を実現することを目指す。

④研究実施方法

(1) オールシリコン CMOS による RF IC と (3) スケーラブル ADC/DAC については、ターゲット周波数である 60GHz 帯の動作が可能な 90nm シリコン CMOS プロセスを採用し、単体デバイス、要素回路試作を年 2 回程度行うことで、アイデアの検証を行う。(2) ブロードバンド周波数領域等化技術については、FPGA や 180nm シリコン CMOS プロセスによる ASIC 実装によって検証を行う。また、各グループと随時研究打ち合わせを行い、システム全体仕様、最終的な試作内容・システム構成などについて定期的に議論を行うことで緊密に連携し、研究開発を進める。(発展 1) については、実アンテナの試作・評価を通して、アイデアの検証を行うとともに、他の要素回路技術の適用も検討する。(発展 2) (発展 3) については、関連する企業との連携を進め、アプリケーションへの適用を明確化しつつ、検討を進める。

(2) 東京工業大学グループ

①本研究グループの研究課題、ならびに所属する研究チームの課題との関係

研究課題: スケーラブル ADC/DAC の基礎検討

微細 Si CMOS 技術を用いて、ビット幅・サンプリング速度を可変できるスケーラブル ADC (analog digital converter) /DAC (digital analog converter) の基礎検討を行い、東北大学グループで検討を行っているペンダブル・エア・インターフェースの実現に寄与することが研究目的である。

②本研究グループの達成目標

複数のワイヤレスシステムに対し、適応的にビット幅・サンプリング速度を切り替え、最適消費電力で動作可能なスケーラブル ADC/DAC を新たに設計・開発する。高速かつ低消費電力を実現するため、90nm 以下のシリコン CMOS プロセスを用いる。

③研究のアプローチ

高精度 ADC を実現するために、 $\Delta \Sigma$ 型 ADC の基礎検討を行う、フィルタと帰還回路を用いることで、5bit ADC で、分解能最大 20bit 相当の変換を可能とする回路構成について検討を行う。高精度化を実現するために、ダイナミック型比較器の感度に関する設計理論の構築やオフセット補正方法の確立などの要素技術についても研究に取り組む。

次に高速 ADC の実現のために、容量演算とダイナミック比較器を主体とする、貫通電流がほとんど流れない回路構成を用いた技術を適用する。

さらに、これらを組み合わせて、スケーラビリティ ADC の検討を行い、ディペンダブルワイヤレスシステムへの適用を検討する。また、ディペンダビリティの評価に必要となる ADC 性能の総合評価の検討を行い、各変換方

式の FoM の理論値の算出を行う。

④研究実施方法

ディペンダブルワイヤレスシステムの実現のために必要となる ADC/DAC の検討として、まず、東北大学と共同で仕様検討を行い、目標とする無線通信システムの明確化とデバイスの要求スペック条件などの検討を行う。その目標スペックを元に、ターゲットとしている複数の無線通信方式にそれぞれ対応可能な、高精度 ADC ならびに超高速・低消費電力 ADC について、要素技術の開発を行う。次に、適応的に切り替え可能なスケラブル ADC の検討を行う。90nm シリコン CMOS プロセスを用いて LSI 実装・評価を行うことで、提案回路の性能評価を行う。さらに、ディペンダブルワイヤレスシステムへの実装手法についての検討を行う。

(3)高知工科大学グループ

①本研究グループの研究課題、ならびに所属する研究チームの課題との関係

研究課題：周波数領域等化技術のためのセルフタイム型回路の基礎検討

本研究グループでは、無線通信 VLSI システムのディペンダビリティ向上のために、電波伝搬特性ならびに RF デバイス特性を補償する回路をデジタル回路にて実現する。様々な伝送速度の無線通信システムに対し、最適な動作速度・回路規模・消費電力で特性改善を行うために、従来のクロック同期による制御回路に加え、本研究グループでは、データの有無によりその動作を決定するセルフタイム回路の導入を目指す。

②本研究グループの達成目標

周波数領域等化補償技術のための多様な処理形態に柔軟に適應できるセルフタイム型パイプラインの要素回路について、従来型の分流機構ならびに合流機構を組み合わせた、より一般的なデータ流制御回路構成を考案する。これらの要素回路を活用して、周波数領域等化補償アルゴリズムに内在する多様なデータ流を対象としたパイプライン並列処理構造を直接的に LSI 上に展開し、高速化・低消費電力化を同時に達成する。

③研究のアプローチ

セルフタイム型パイプライン回路では、各パイプライン段はデータが到着した時のみ自律的かつ局所的に動作する。すなわち、大域的クロックに基づく動作制御をしないため、設計容易化が図れ、結果的に、細粒度のパイプラインを構成でき、高速化が容易である。さらに、動作中のパイプライン段でのみスイッチング電力を消費し、動作していないパイプライン段では全くスイッチング電力を消費しないため、自律的な省電力効果を発揮する。様々な伝送速度の無線通信システムを対象とした多様な形態の周波数領域等化補償技術を LSI 上に実現するためには、複数の異速度データ流を混在して処理し、しかも、個々のデータ流に応じて、異なる周波数領域等化処理を施す必要がある。このためには、セルフタイム回路が本来有している設計柔軟性や自律的動作が優位性を発揮すると考えている。セルフタイム回路技術については、その優位性が顕著に表れる NoC (Network on chip) 技術等への応用が国内外で検討されているが、本研究課題のように、あらゆる粒度の多様な回路に徹底的にセルフタイム回路を適用する独創的な検討は見受けられない。

④研究実施方法

周波数領域等化技術のためのセルフタイム型回路の基礎検討として、まず、東北大学と共同で仕様検討を行い、目標とする無線通信システムの明確化とデバイスの要求スペック条件などの検討を行う。また、並行して、セルフタイム型二次元パイプライン(ウェブパイプライン)の要素回路の検討を行う。

その後、東北大学と共同で周波数領域等化技術に内在する並列処理性を明らかにし、広帯域通信およびミリ波通信に共用可能な高速等化器の構成方法について検討した。その結果、要求スループットを維持可能な周波数領域等化器用 FFT 回路構成法を定式化した。現在、この高速等化器を通信方式に合わせて動的に切り替えて動作させる方法、ならびに、この等化器に適用可能なセルフタイム回路の要素回路の設計検討を行っている段階である。

最終的に、これらの成果を統合して、セルフタイム型回路を用いた補償回路のディペンダブルワイヤレス システム LSI への実装設計を実施する。

(4) 広島大学グループ

① 本研究グループの研究課題、ならびに所属する研究チームの課題との関係

研究課題：微細 Si CMOS 超高周波デバイスの基礎検討

微細 Si CMOS 超高周波デバイスの基礎検討を行い、東北大学グループの RF ブロードバンドモジュール Si CMOS IC の実現に寄与することが研究目的である。

② 本研究グループの達成目標

微細 Si CMOS 超高周波デバイスの基礎検討を行うことにより、最終システムであるディペンダブル・エアを構成する RF フロントエンドの中のミリ波帯超高速ブロードバンドモジュールの帯域、利得、消費電力をスケラブルに最適化する手法を確立する。

③ 研究のアプローチ

広島大学グループでは、独自の CMOS レイアウト手法であるボンドベースデザイン(Bond-Based Design: BBD)を用いている。BBD に基づく、ミリ波 CMOS デバイスライブラリを構築し、独自の自動設計等のツールを用いてミリ波 CMOS 回路の設計を行っている。本課題においては、この BBD を用いることにより、微細 Si CMOS 超高周波デバイスの基礎検討を行い、最終システムであるディペンダブル・エアを構成する RF フロントエンドの中のミリ波帯超高速ブロードバンドモジュールの帯域、利得、消費電力をスケラブルに最適化する。

④ 研究実施方法

広島大学グループは、独自に開発したライブラリおよびツールを用いて設計を行い、ミリ波 CMOS 回路を試作するとともに、既存のミリ波帯 CMOS 回路評価装置を用いてデバイス評価を行う。一方で、東北大学グループとは密接に連携を取りながら、東北大学グループの RF ブロードバンドモジュール Si CMOS IC の実現に寄与していく。

(2) 「三菱電機」グループ

① 本研究グループの研究課題、ならびに所属する研究チームの課題との関係

研究課題：ディペンダブル・エアの実現を可能にするオール Si CMOS 受信器 RF IC の開発

研究チームの課題は、複数の無線規格を利用環境に応じてシームレスに切り替え、接続性と伝送容量の向上により、利用者の利便性を高めるディペンダブル・エアの実現である。このためには、無線通信におけるキーデバイスである RF 回路の性能向上やマルチモード・マルチバンド化、さらに伝搬特性やデバイス特性を補償する技術が必須である。本研究グループでは、大容量の通信が可能なミリ波帯を含む複数の無線規格に対応するオールシリコンによる受信器 RF IC を開発する。開発にあたっては、小形・低コスト化に加え、非常に周波数が高く、使用帯域の広いミリ波帯における高周波特性の向上が大きな課題である。さらに複数の無線規格に対応する受信器では、受信性能のディペンダビリティ確保も課題である。

② 本研究グループの達成目標

本研究グループの主な技術的な達成目標は以下の2つである: (a) オールシリコン CMOS によるマルチモード・マルチバンド対応 RF IC の実現. (b) 伝搬歪, デバイス特性を補正するブロードバンド周波数領域等化技術

を適用した無線受信器用 IC の実現.

(a) は, IC の半導体プロセスとして, 従来ミリ波帯などの高い周波数で用いられてきた GaAs などの化合物系のプロセスに代わり, CMOS プロセスを用いる. これにより RF IC は, 高集積化・高機能化が必要なマルチモード・マルチバンドへの対応が可能になるとともに, 実用化にあたって重要となるコストの低減を図ることができる. また, 受信器 RF IC のディペンダビリティを高めるため, 周波数や帯域幅の異なる複数の無線規格に対して一部の回路を共有化することを目指す. 一方 (b) では, 受信器に周波数領域等化技術を適用することにより, 特にミリ波帯のブロードバンド通信で課題となる, 伝搬歪やデバイスのバラツキなどを補正し, 受信性能のディペンダビリティを確保することが可能となる. 本研究グループでは, 以上の 2 つを技術的な目標とし, 最終的な目標である, ディペンダブルワイヤレスシステム LSI の実現を目指す.

③研究のアプローチ

本研究グループでは複数の無線規格として, 近年, 標準化が進み, 近距離のブロードバンド通信として有望な 60GHz 帯無線 PAN (IEEE802.15.3c) と, 現在, 広く普及している 5GHz 帯無線 LAN (IEEE802.11a) を開発のターゲットとする. これらの無線規格に適合する RF フロントエンド回路として, 60GHz 帯では受信信号を 5GHz に周波数変換するヘテロダイン方式, 5GHz 帯では直接, ベースバンド信号に変換するダイレクトコンバージョン方式とする. これにより, 5GHz 帯の直交復調器を上記 2 つの無線規格で共有してスイッチで切り替える構成を実現し, IC としてのディペンダビリティを高めるとともに小形・低コスト化を図る. また, 化合物系のプロセスに比べて高周波性能の劣る CMOS プロセスを用いた場合, 特に 60GHz 帯では低雑音増幅器 (LNA) やミキサといった要素回路の性能向上が必要である. このため, トランジスタなどの単体デバイスの特性を評価し, LNA として最適設計を行うことにより高利得, 低雑音指数化を図るとともに, ミリ波帯での CMOS プロセスに適したミキサとして, 受信信号の $1/2$ の周波数の局部発振波で動作し, 高飽和特性が得られるトランジスタペアを用いた偶高調波形ミキサを提案した. これらの要素回路を受信器 RF IC に用いることで, 受信ダイナミックレンジ向上と, 局部発振源の低周波化による回路規模の削減を図る. さらに RF IC と周波数領域等化技術を組み合わせることで, 受信器としてのディペンダビリティ向上を目指す.

④研究実施方法(研究チーム内外の連携関係など)

半導体プロセスとして, ミリ波帯でも動作可能な微細 CMOS プロセスを採用し, 単体デバイス, 要素回路試作を年 2 回程度行うことで, アイデアの検証を行う. また, 研究代表者グループである東北大グループとは, 共同で IC の試作を行うとともに, 要素回路やシステム全体仕様, 最終的な試作内容・システム構成などについて定期的な打合せを行うことで緊密に連携し, 研究開発を進めている. また, 他グループとも, 年 2 回のチーム全体会議などを通じて, 情報交換, 交流を積極的に図っている.

§ 2. 研究実施体制

(1) 東北大学グループ

① 研究分担グループ長：坪内 和夫（東北大学電気通信研究所，名誉教授）（研究代表者）

② 研究項目

- ・ オール Si CMOS RF デバイス・回路の開発

(2) 東京工業大学グループ

① 研究分担グループ長：松澤 昭（東京工業大学大学院理工学研究科，教授）（主たる共同研究者）

② 研究項目

- ・ スケーラブル ADC/DAC の基礎検討

(3) 高知工科大学グループ

① 研究分担グループ長：岩田 誠（高知工科大学情報学群，教授）（主たる共同研究者）

② 研究項目

- ・ 周波数領域等化技術のためのセルフタイム型回路の基礎検討

(4) 広島大学グループ

① 研究分担グループ長：藤島 実（広島大学大学院先端物質科学研究科，教授）（主たる共同研究者）

② 研究項目

- ・ 微細 Si CMOS 超高周波デバイスの基礎検討

(5) 三菱電機グループ

① 研究分担グループ長：平野 嘉仁（三菱電機株式会社情報技術総合研究所，部長）（主たる共同研究者）

② 研究項目

- ・ オール Si CMOS 受信器 RF IC の開発

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

(1) 研究の成果と自己評価

(1) 成果1.「ディペンダブル・エア小型携帯端末用 60 GHz 帯ビームフォーミングアンテナの基礎検討」(東北大学グループ)

①内容

ディペンダブル・エア小型携帯端末用 60 GHz 帯ビームフォーミングアンテナとして、全球方向へのビーム形成を実現するために、3-D SiP 実装技術による基板の垂直方向積層構造を活用したダイポールアレイアンテナを試作(図 4-1)し、ビームステア実験を行った(図 4-2)。電磁界解析を用いた設計の結果、 4×4 素子アンテナ配列構成にて θ, ϕ 方向にそれぞれ 90° の範囲で 10 dBi 以上の利得をもつビームフォーミングが可能であることを示した。次いで 4×2 素子アンテナ配列構成のアレイアンテナについて試作を行い、ほぼ電磁界解析結果の結果と一致するビームステア特性が得られることを確認した。

②有用性

ミリ波通信では、アンテナ指向性が強いいため、端末の設置状況においては通信ができなくなる恐れがあった。さまざまな方向にビームを形成し、適応的にビーム方向を制御するビームフォーミング(BF: Beam Forming)を行うことでどのような端末の設置状況においても通信が可能となるため、60 GHz 帯 BF アンテナの実現は非常にインパクトがある。

これまでの検討では、主に基板に対して垂直方向のビームフォーミングが可能であることが示されているが、一方で、基板に対して水平方向にビームを形成するアンテナでは十分なビームフォーミングができていなかった。本検討の結果で、基板水平方向へのビームフォーミングが可能になることで、全球方向へのビーム形成が可能となった。

③優位比較

基板に対して水平方向にビームを形成するアンテナとして、ポスト壁導波路を用いたアンテナ、 1×4 ダイポールアレイ が提案されている。2 次元アレイとして多層基板を用いた 2×3 ビバルディアレイが提案され、30 度の範囲で BF 可能であることが示されているが、多層基板を用いるため縦方向のアンテナ間隔が小さく、十分なビーム形成ができていないため、本研究の成果は優位性が高い。

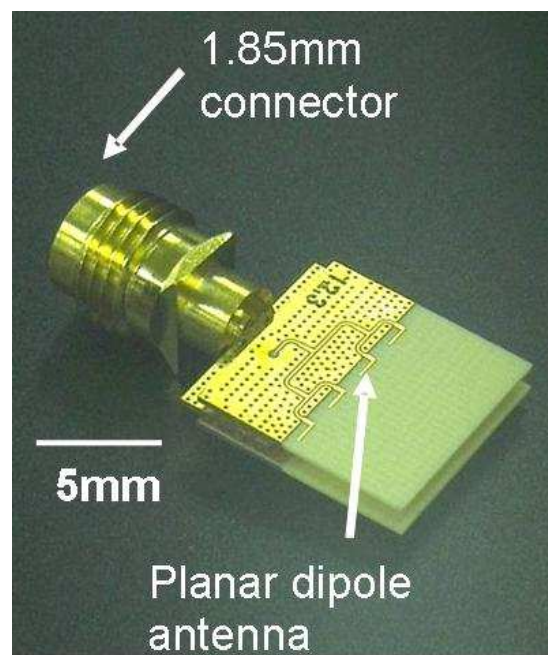


図 4-1: ディペンダブル・エア小型携帯端末用 60 GHz 帯 4×2 素子アンテナの試作

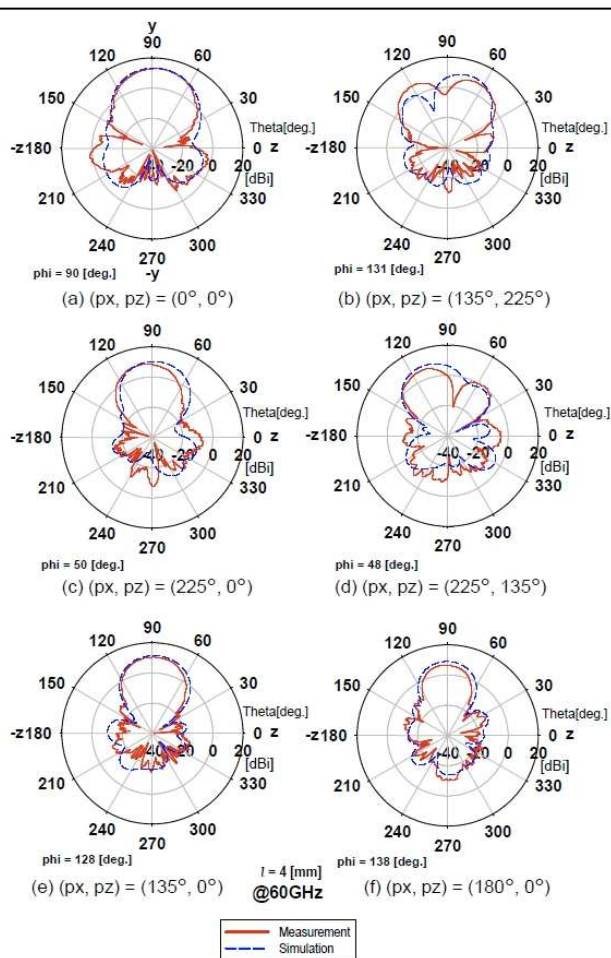
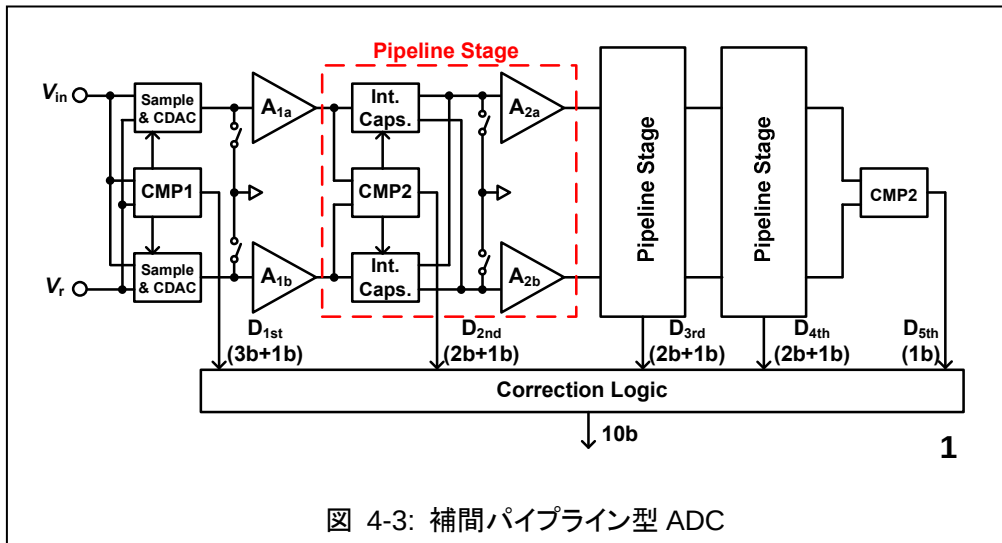


図 4-2: 6 つの給電位相差による放射パターン

(2) 成果2.「新変換方式の 10bit, 320MSps, 40mW ADC」(東京工業大学グループ)

①内容

10bit, 320MSps 程度の性能を有する ADC はミリ波中距離システムにおいて 64QAM を使い, 1Gbps の超高速無線システムを実現するために不可欠である. 通常この性能レンジの ADC は高い利得を有する演算増幅器を用いたパイプライン型 A/D 変換方式が主流であったが, CMOS の微細化の進展によりこのような演算増幅器を実現することは困難となっている. そこで, 数倍程度の開ループ差動増幅器を 2 つ設け, 出力間の信号を補間することで高速かつ高精度な A/D 変換を行う, 補間パイプライン型 A/D 変換方式を考案し, 10bit, 320MSps, 40mW ADC を実現し, 2011 年 6 月, 京都で開催された国際会議, VLSI 回路シンポジウムにて発表を行った (図 4-3).



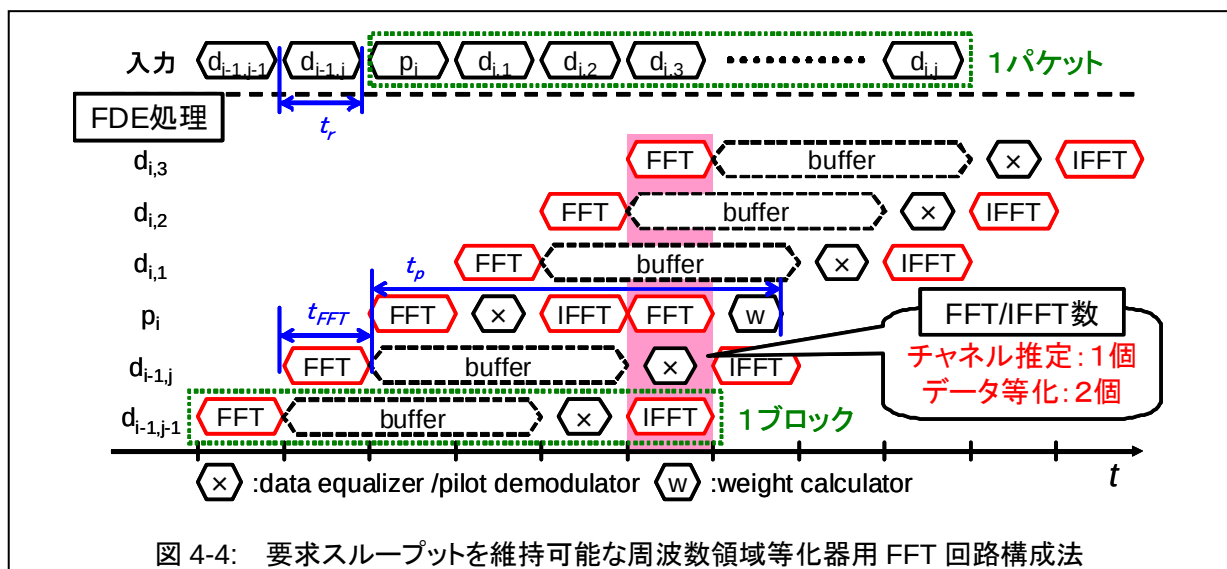
②有用性

高利得の演算増幅器が不要なため, 微細 CMOS プロセスを用いた高精度, 超高速 ADC が実現可能である.

③優位比較

10bit で 300MSps を越える変換速度の ADC においては, 唯一回路が複雑になるデジタル誤差補正技術を用いない A/D 変換を実現し, FoM も世界トップの 350fJ/step を実現した.

(2) 成果3.「要求スループットを維持可能な周波数領域等化器用 FFT 回路構成法」(東北大学グループ・高知工科大学グループ)



①内容

要求されるスループット Th [symbol/s] を維持できる周波数領域等化回路を実現するために、複数の FFT 回路をパイプライン並列に動作させる回路構成法を明らかにした。回路コスト対性能を最大にするための条件として、(a) 個々の FFT 回路のスループット性能を Th とすること、および、(b) チャネル推定時間に比べてパケット到着間隔が長い場合には FFT 回路は 3 基で十分であること、を明らかにし、これらを並列に動作させるスケジューリング方式を確立した (図 4-4)。

②有用性

周波数領域等化器の回路コストの大半を占める FFT 回路について、理論的に最小コストで要求スループットを達成できる回路構成法を世界に先駆けて明らかにしたものであり、周波数特性の劣化が想定される様々な回路へ応用が可能である。

③優位比較

周波数領域等化回路の実装例はこれまで世界的にみてもほとんど発表されておらず、本グループにおける成果が世界で初めての発表になると考えている。

(4) 成果4.「微細 Si CMOS 超高周波デバイスの基礎検討」(広島大学グループ)

①内容

低群遅延特性を持つ広帯域 D バンド CMOS 低雑音増幅器の設計を行い実証した(図 4-5)。

②有用性

CMOS ミリ波帯無線トランシーバにおいて低雑音増幅回路(LNA)は重要なコンポーネントの 1 つである。高速大容量通信では被変調波は広い帯域を使用するため、これを増幅するためには広域帯で使える必要がある。最近の通信では振幅と位相の両方を用いられており、これを正しく増幅することは無線トランシーバの実現に必要不可欠である。そのため、位相情報についても広帯域で正しく伝達することがアンプには求められている。本研究では群遅延特性と利得を平坦にすることに留意した。群遅延と利得が平坦でないと増幅後のエンベロープが乱れ、振幅・位相情報が変化した復調時に問題が発生する。そこで、低消費電力動作で、群遅延時間変化を小さくし、利得をできるだけ平坦にすることで高速無線通信の実現に貢献できる回路を開発した。

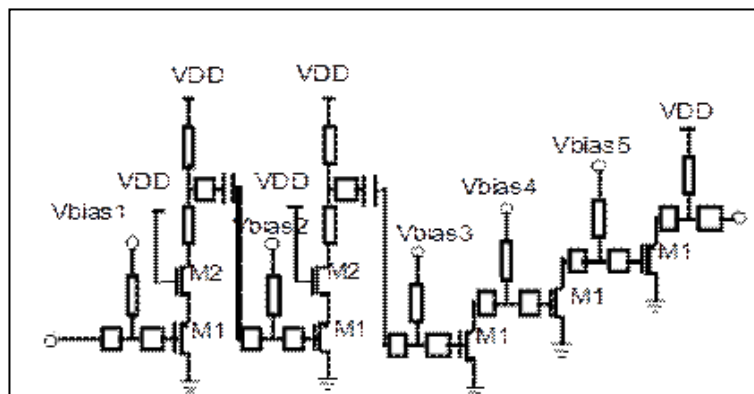


図 4-5: 120GHz 帯広帯域増幅回路

表 4-1: 性能比較

Ref.	Freq. [GHz]	3dB-BW [GHz]	Peak Gain [dB]	Group Delay Variation [ps]3dB-BW	Pdc [mW]
This work	118.55	20.40	8.13	54.55 ±11.21	19.77
[1]	150.00	27.00	8.20	N/A	25.50
[2]	140.00	10.00	8.00	N/A	63.00
[3]	144.00	10.00	9.00	N/A	75.60

③優位比較

消費電力 19.77mW で、ピークゲインが周波数 118.55GHz のとき 8.13dB、3dB 帯域が 20.40GHz、帯域内群遅延時間が 3.34 から 65.76ps という結果を得た。表1に先行研究との比較を示す。3dB 帯域とピークゲインがほぼ同じぐらいの利得で、十分に群遅延時間と利得を平坦にすることができた。(表 4-1)

成果 5 で示した、ディペンダブル受信フロントエンド IC については、60GHz 帯と 5GHz 帯の 2 つの周波数帯に対応する受信器 RF IC で回路を共有化した例は他のグループでは見当たらない。本研究は、これらの帯域を使った無線通信方式の信頼性向上の観点から、無線通信技術分野全般に対しての影響が大きいと考えている。

(2) 当初計画で想定外であった重要・新規な展開

成果 3 について、周波数領域等化技術を用いたワイヤレスディペンダビリティ計測をさらに発展させ、周波数領域チャネル推定技術を基にした異種無線通信方式のスケジューリング手法の検討にも繋がっており、当初計画で想定している範囲以上の広がりを見せつつある。

成果 4 などに示した広島大学グループの研究については、本研究課題の当初目標であった 60GHz 帯のみならず、さらに 100GHz を超える周波数帯に対してのシリコン CMOS 適用についての初期検討・評価を行い、その有用性を示すことができる見込みであり、当初計画で想定している範囲以外の展開が期待できる。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- [1] S. Yoshida, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "A Low Cross Polarization 5 GHz-Band 3-Stacked Meander-Line Antenna Integrated with a Meander-Line Shape Balun," 5th Eur. Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP2011), Roma, Italy (2011).
- [2] J. Lin, M. Miyahara, and A. Matsuzawa, "A 15.5 dB, Wide Signal Swing, Dynamic Amplifier Using a Common-Mode Voltage Detection Technique," IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 21-24, Rio de Janeiro, Brazil, May 2011.
- [3] S. Kameda, H. Oguma, N. Izuka, F. Yamagata, Y. Asano, Y. Yamazaki, S. Tanifuji, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "Proposal of Heterogeneous Wireless Communication Network with Soft Handover in Application Layer: Feasibility Study Based on Field Trial Results," 6th Int. ICST Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Commun. (CROWNCOM2011), Osaka (2011).
- [4] M. Miyahara, H. Lee, D. Paik, and A. Matsuzawa, "A 10b 320 MS/s 40 mW Open-Loop Interpolated Pipeline ADC," IEEE Symp. on VLSI Circuits, Kyoto, Japan, pp.126-127, June 2011.
- [5] S. Yoshida, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "A High-Gain Planar Dipole Antenna for 60-GHz Band 3-D A High-Gain Planar Dipole Antenna for 60-GHz Band 3-D," 2011 IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Sci. Meeting, IF246.2, Spokane, USA (2011).
- [6] K. Komatsu, S. Kameda, M. Iwata, S. Tanifuji, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "ASIC Implementation of Frequency Domain Equalizer for Single Carrier Transmission," XXX URSI General Assembly and Scientific Symp. of Int. Union of Radio Sci. (URSI GASS 2011), Istanbul, Turkey (2011).
- [7] K. Miyagi, S. Sannomiya, M. Iwata, and H. Nishikawa, "Self-Timed Power-Aware Pipeline Chip and Its Evaluation", Proc. 2011 Int. Conf. on Parallel and Distributed Processing Tech. and Applications (PDPTA'11), pp.442-448, LasVegas, July 2011.
- [8] K. Katayama, M. Motoyoshi, K. Takano, and M. Fujishima, "Design of Power-Efficient 130GHz Common-Source Amplifiers," SSDM, pp. 833-834, Sept. 2011.
- [9] S. Kameda, H. Oguma, N. Izuka, Y. Asano, Y. Yamazaki, K. Komatsu, S. Tanifuji, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "Coverage Estimation of Uplink 64 QAM Signal Up to 20 MHz Bandwidth Based on Field Trial Results: Coverage Issue of Broadband Uplink Signal," The 14th Int. Symp. on Wireless Personal Multimedia Commun. (WPMC2011), France (2011).
- [10] Y. Miyake, K. Kobayashi, K. Komatsu, S. Tanifuji, H. Oguma, N. Izuka, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "Hybrid Single-Carrier and Multi-Carrier System: Widening Uplink Coverage with Optimally Selecting SDM or Joint FDE/Antenna Diversity," The 14th Int. Symp. on Wireless Personal Multimedia Commun. (WPMC2011), France (2011).
- [11] S. Tanifuji, N. Suematsu, S. Kameda, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "24.8 dBm Power Handling 60 GHz Transmit/Receive Switch Using Series and Shunt FETs in 90 nm Si-CMOS Process," 6th Eur. Microwave Integrated Circuits Conf. 2011 (EuMIC 2011), Manchester, UK (2011).
- [12] T. T. Ta, K. Matsuzaki, K. Ando, K. Gomyo, E. Nakayama S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "A High Efficiency Si-CMOS Power Amplifier for 60 GHz Band

Broadband Wireless Communication Employing Optimized Transistor Size," Eur. Microwave Conf. (EuMC2011), Manchester, UK (2011).

- [13] D. Paik, M. Miyahara, and A. Matsuzawa, "An Analysis on a Pseudo-Differential Dynamic Comparator with Load Capacitance Calibration," IEEE Int. Conf. on ASIC (ASICON), Xiamen, Oct. 2011.
- [14] H. P. Ninh, M. Miyahara, and A. Matsuzawa, "A 83-dB SFDR 10-MHz Bandwidth Continuous-Time Delta-Sigma Modulator Employing a One-Element-Shifting Dynamic Element Matching," IEEE Int. Symp. on Radio-Freq. Integration Tech. (RFIT), Beijing, Dec. 2011.
- [15] D. Paik, M. Miyahara, and A. Matsuzawa, "An Analysis on a Dynamic Amplifier and Calibration Methods for a Pseudo-Differential Dynamic Comparator," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E95-A, no. 2, Feb. 2012.

(4-2) 知財出願

- ①平成23年度特許出願件数(国内 1 件)
- ②CREST 研究期間累積件数(国内 7件)