

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

1.1 チーム全体の研究の概要  
(1) 本研究の背景と課題定義

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。スマートフォンのように、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。

我々のグループでは、これまでの研究開発において、図 1-2 中の★印で示した通信距離 1000m 級の MBWA (mobile broadband wireless access), 100m 級の無線 LAN, 10m 級の無線 PAN (personal wireless network) の広域化、高速・広帯域化や端末の低消費電力化・小形化に取り組んできた。今後の無線通信ネットワークの発展のためには、伝送速度の向上はもちろんのこと、広域通信可能でかつ低コストの無線規格が必要である。しかしながら、携帯端末の消費電力、電磁波の人体に対する影響などの問題から、端末が放射できる電波のエネルギーには限界があり、伝送速度と通信距離(セル径)はトレー

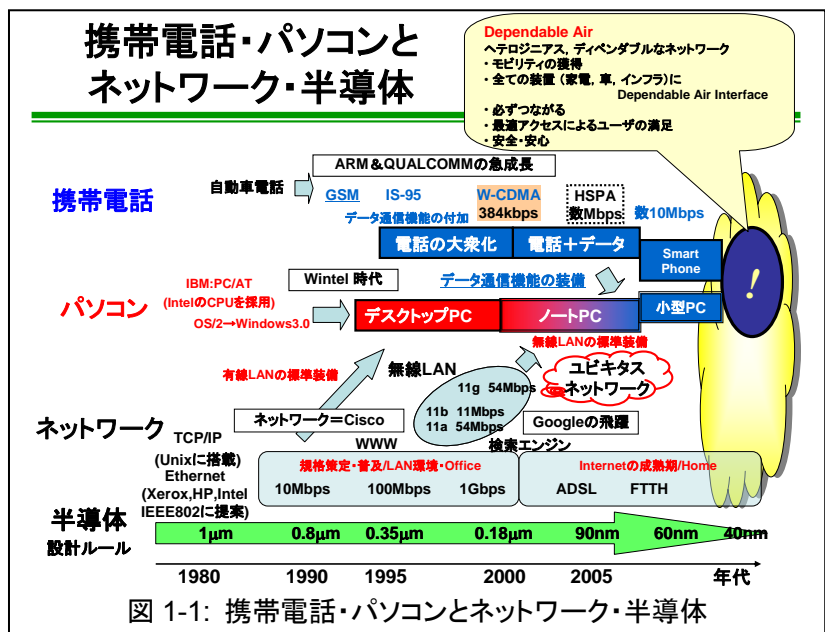


図 1-1: 携帯電話・パソコンとネットワーク・半導体

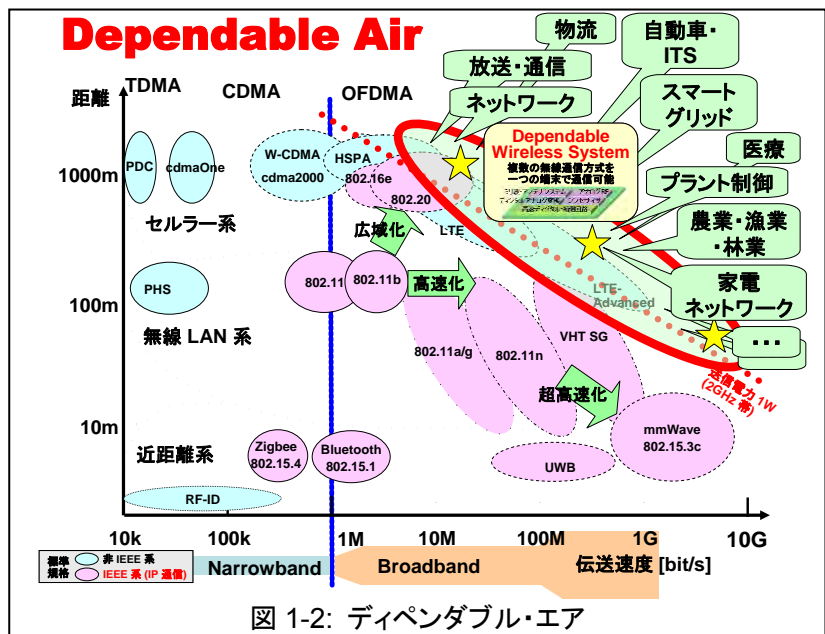


図 1-2: ディペンダブル・エア

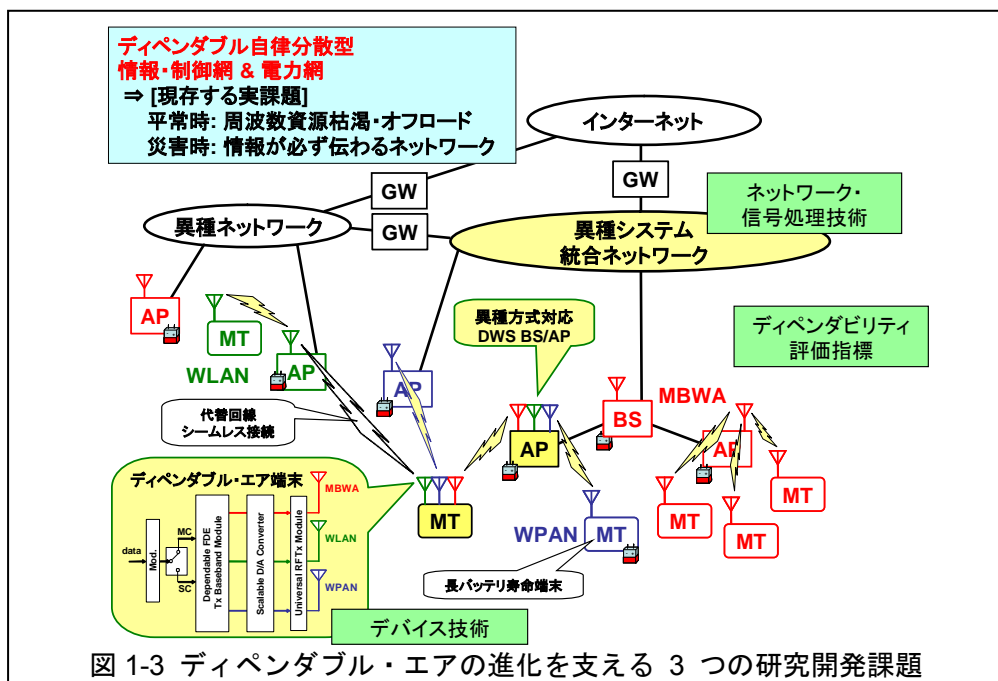
ドオフの関係にある。図 1-2 中に示している限界線(赤点線)は、2GHz 帯で端末の送信電力を 1W とした時の伝送速度とセル径のトレードオフ関係を示したものであり、現在の無線規格はこの限界に近づきつつある。つまり、端末の送信電力制限により、従来の無線規格のいずれか一つのみでは、利用者が満足できるような通信環境を提供することはできない。

そこで、広域通信を実現しつつ、高速・大容量通信を可能とし、さらに、大規模災害時においても安定した通信回線の提供を可能とする無線通信ネットワーク技術として、本研究課題において、我々のグループでは「ディペンダブル・エア (Dependable Air)」を提唱している。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、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ネットワークである。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・インターフェース)を装備することでモビリティを獲得する。そして、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・エアでは、人と人の通信だけではなく、人とモノ、モノとモノなどの制御情報などの通信までを行うことを目指す。これにより、図 1-2 に示すように、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。さらに平常時のみならず、大規模災害時においても、複数の通信回線を提供することにより被災地において情報のやりとりを可能とする災害に強いネットワークを実現できる。

## (2) 本研究の特徴

本研究は、異種無線通信方式をシームレスかつ安定的に利用できるディペンダブル・エアの提案とその課題抽出をチーム内の議論にて行っている。さらに、それを実現するために、デバイス・回路に対する要素技術の開発課題と、異種システムを統合するシステムの開発課題にブレークダウンすることで、単にデバイスや回路の高性能化にとどまらず、具体的かつ現実的なシステム目標を持った上での研究開発を行っていることが大きな特徴である。

## (3) 本研究の達成目標



本研究開発では、これまで示したようなディペンダブル・エアを実現することを目的とする。広い周波数帯域にわたるヘテロジニアス無線通信接続環境をユーザのために最適化することで、災害時でも必ずつながり、市民生活に革新をもたらす情報通信ネットワークとして、異種無線通信方式の統合による高信頼・高速無線ネットワークを実現する。図 1-3 にディペンダブル・エアの実現のために必要となる 3 つの大きな研究課題(緑色)について示す。

(A) ワイヤレスネットワークのディペンダビリティ追求の成果(ディペンダビリティ評価指標)

既存の評価手法にとらわれない高信頼・高安定な無線通信ネットワーク評価指標の追求することで、無線通信ネットワークの設計指針を明らかにする。

(B) ディペンダブル・エアを実現するネットワーク・信号処理技術

複数の異種無線通信方式を統合するために必要となる、ネットワーク技術、ならびにベースバンド信号処理技術についての研究開発を行う。

具体的な研究課題としては、(課題 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により、BER などの通信特性の改善を目指す、(発展課題 2) ディペンダブルネットワークプロセッサの機能検討、(発展課題 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について取り組むことで、ワイヤレスディペンダビリティ指標の向上が可能なネットワークを実証する。

(C) ディペンダブル・エアの進化を支えるデバイス技術

複数の異種無線通信方式に対応する端末・基地局を実現するために必要となる、マルチモード・マルチバンド RF/アナログ信号処理デバイスの研究開発を行う。

具体的な研究課題としては、(課題 1) オール Si CMOS による RFIC 技術、(課題 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、(発展課題 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について取り組むことで、各デバイス・回路の広帯域化・低雑音化などの高性能化を行う。

以下、研究開発当初からはじめた 3 つの課題(図 1-4)と、これら要素技術を用いて、応用技術に展開すべく、H23 年度から開始した 3 つの発展課題について説明する。

(1) オール Si CMOS による RFIC 技術

主に無線通信方式での利用が期待できる 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 Si 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。

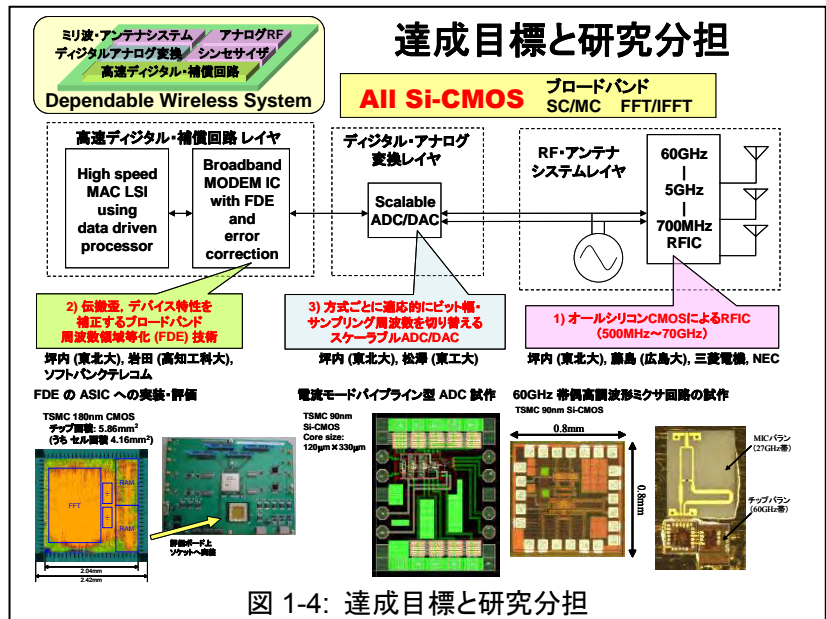


図 1-4: 達成目標と研究分担

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 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 1-5)の研究を行う。

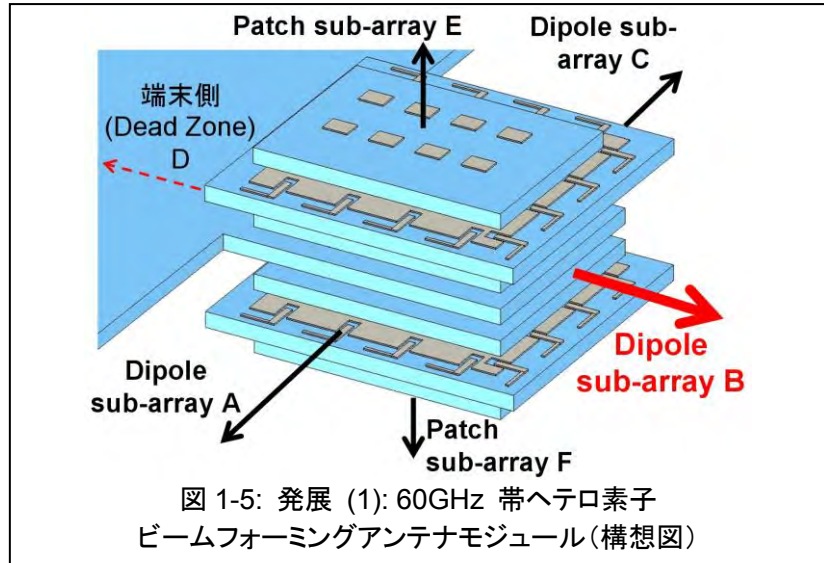


図 1-5: 発展 (1): 60GHz 帯ヘテロ素子ビームフォーミングアンテナモジュール(構想図)

**(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**

ディペンダブル・エア・インターフェースに必要となる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 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。

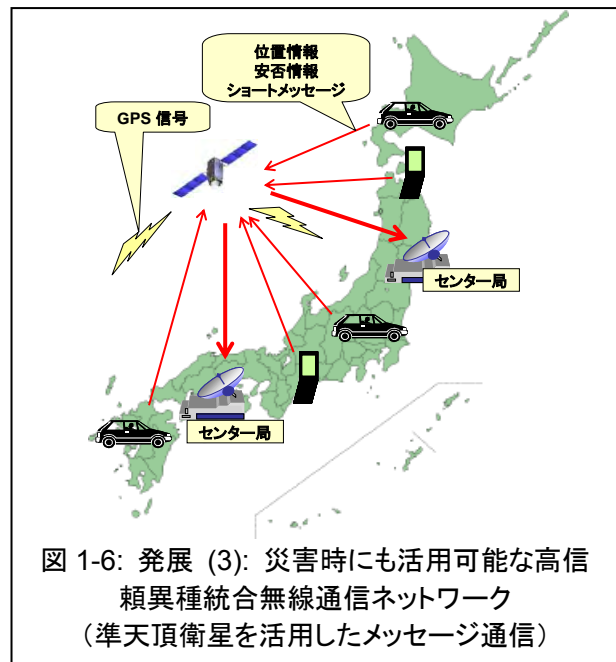


図 1-6: 発展 (3): 災害時にも活用可能な高信頼異種統合無線通信ネットワーク (準天頂衛星を活用したメッセージ通信)

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。

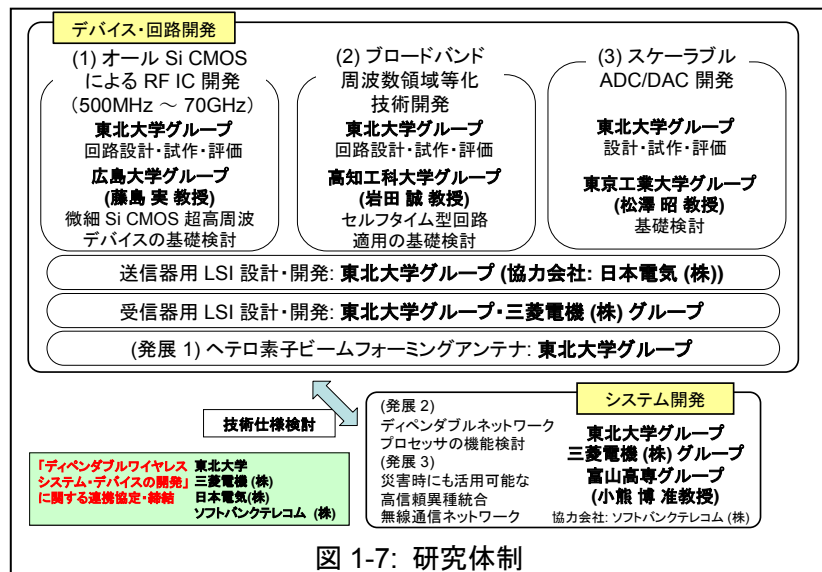
また、震災による地上系無線インフラ喪失により、被災者の安否が、数日以上にわたり不明となった。さらに津波などで流失した車、船なども行方不明となり、震災復興の妨げとなった。これらを解決するために、準天頂衛星を活用して、cm オーダでの高精度な位置 (ロケーション) 情報とともに、ポケベル程度の簡単なデータ/メッセージを衛星経路で双方向通信できる、携帯電話やカーナビにも搭載可能なパーソナル無線端末と無線システムの技術を開発するための基礎研究を行う (図 1-6)。超長拡散符号を用いたスペクトラム拡散・符号分割多元接続 (SS-CDMA) 方式の適用により、一時間当たり 300 万を超える

ユーザを収容するための回線設計を行う。

## 1.2 研究実施方法

### (1) 本研究チーム全体の運営と取りまとめ方針

本研究チームの研究体制を図 1-7 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 Si 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。



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 (1) については東北大学グループ、発展テーマ (2) と (3) については東北大学グループと富山高専グループ(小熊准教授)を中心として検討を行う。

### (2) 研究グループの分担

#### 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

本研究グループは、ディペンダブル・エアの実現を目指し、その実現のために必要となる 3 つの大きな研究課題についての研究開発を統括する。

#### (A) ワイヤレスネットワークのディペンダビリティ追求の成果(ディペンダビリティ評価指標)

#### (B) ディペンダブル・エアを実現するネットワーク・信号処理技術

#### (C) ディペンダブル・エアの進化を支えるデバイス技術

具体的な研究開発項目としては、オール Si 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 Si 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 本グループの研究の特徴

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。

③ 研究実施方法(研究チーム内外の連携関係など)

(1) オール Si 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 Si 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 Si 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

ディペンダブル・エアを実現するには各種規格の無線システムを用いるの必要があり、そのためには低分解能ではあるが超高速変換が可能な ADC、中位の変換速度であるが高分解能な ADC など、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 本グループの研究の特徴

1) ダイナミックアナログ回路と容量演算回路の活用と基礎理論構築

目標達成のためには ADC/DAC を集積回路に搭載可能な程度に低消費電力化を図るの必要があり、従来の貫通電流が流れ続けるアナログ回路から CMOS ロジックと同様に、必要な時のみ電流が流れる、ダイナミック型アナログ回路や、従来のように電流が流れ続ける抵抗を用いるアナログ回路から、容量を主体とするダイナミックアナログ回路への転換を図った。この場合、ダイナミック回路で発生するノイズの理論が無かったため、新たなノイズ算出式や、容量を媒介としたノイズと消費エネルギーなどの関係式を導出し、基礎理論を構築した。

例えば、ダイナミック型比較器(図 4-3)のノイズについては理論が不明確なため、これを導出した結果、ノイズは主として初段のダイナミック増幅器の負荷容量で決まることが分かった。このことは、ノイズを減少させるためには必然的に消費エネルギーの増加を伴うことを意味している。

導出したダイナミック型比較器のノイズ式を次式に示す。

$$v_{n\_i}^2 \approx \frac{kT}{C_L} \frac{V_{eff}}{V_{DD}}$$

ここで、 $C_L$  は負荷容量、 $V_{eff}$  は MOS トランジスタの有効ゲート電圧、 $V_{DD}$  は電源電圧である。

図 1-8 にダイナミック型比較器の分解能と負荷容量、消費エネルギーの関係を示す。分解能の増加に伴い負荷容量、消費エネルギーは指数的に増加することが分かる。

また、このノイズ式の導出によりダイナミック型比較器の最適設計が可能になり、低消費電かつ高精度な ADC の実現が可能になった。

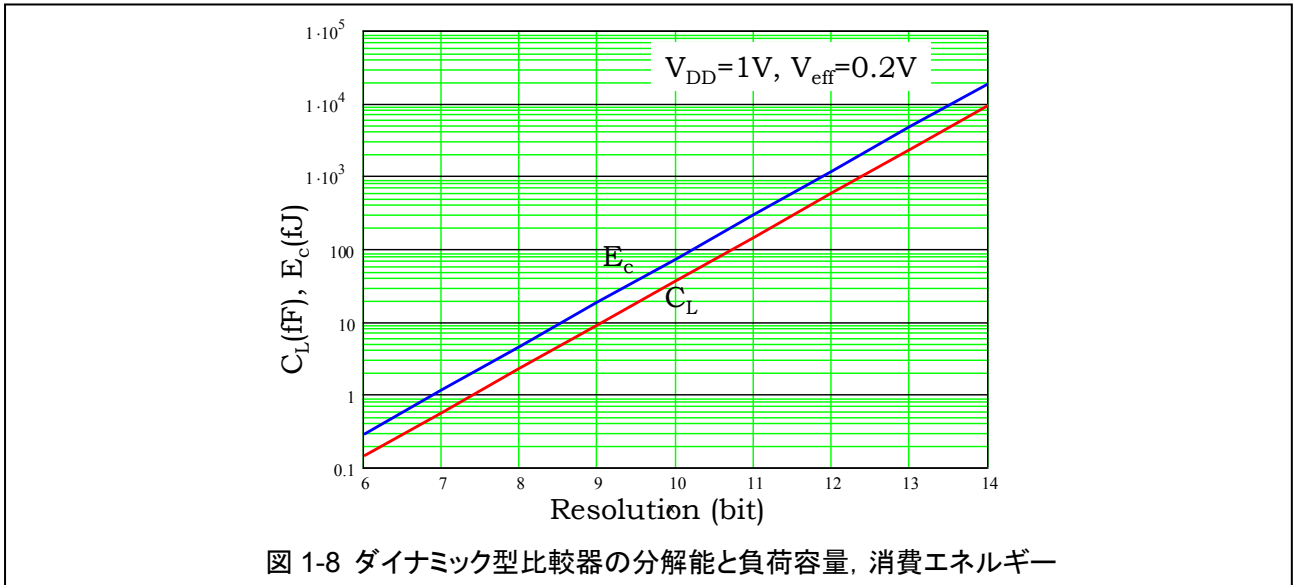


図 1-8 ダイナミック型比較器の分解能と負荷容量, 消費エネルギー

2) 低電力・低ノイズダイナミック比較器の開発

世界的に使用されるようになった低電力・低ノイズダイナミック比較器を開発した. 詳しくは研究成果(成果2. 「低電力・低ノイズダイナミック比較器」)を参照のこと.

3) 容量およびゲート補間を備えたダイナミック型比較器を用いた直並列型 ADC の開発

容量およびゲート補間を備えたダイナミック型比較器を用いて直並列型 ADC を構成することで, 世界最小消費電力, 最小消費エネルギーの直並列型 ADC を開発した. 詳しくは研究成果(成果3. 「直並列型 ADC」)を参照のこと.

4) 各通信規格に対応可能な各種 ADC の開発

ミリ波通信に用いる超高速 ADC, 携帯電話などに用いる高分解能 ADC の基礎検討を行い, それぞれの通信規格に必要な ADC の目処がついた. このため, 次の目標はこれらを1つの ADC でスケラブルに実現することである.

③ 研究実施方法(研究チーム内外の連携関係など)

当研究グループはスケラブル ADC/DAC の基礎検討と基本回路の設計試作を担当し, 東北大学グループはその知見を活用した.

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, 低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, データの有無によりその動作を決定することで, 最適な動作速度・回路規模を実現可能なセルフタイム回路の導入を目指した.

② 本グループの研究の特徴

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。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研究は見受けられない。

### ③ 研究実施方法(研究チーム内外の連携関係など)

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った。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)の要素回路を確立し、特許出願した。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、要求スループットを維持可能な周波数領域等化器用 FFT 回路の構成法を確立した。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 の実装設計を実施する予定である。

## 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 SiCMOS IC の実現に寄与することが研究目的である。

### ② 本グループの研究の特徴

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、消費電力をスケーラブルに最適化する。

### ③ 研究実施方法(研究チーム内外の連携関係など)

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。

## 5) 富山高専グループ

### 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：衛星を用いたロケーション・メッセージ双方向通信システムの基礎検討

東日本大震災を受けて、ディペンダブル・エアを衛星系も含めネットワークに拡張し、災害時にも対応できる準天頂衛星によるロケーション・ショートメッセージ通信システムを実現する。

### ② 本グループの研究の特徴

富山高専グループでは、ロケーション精度の把握を目的に準天頂衛星の位置捕捉精度についての実測評価を行った。また、ショートメッセージ双方向通信に関しては、東北大学と共同でシステム設計を行うとともに準天頂衛星を用いたロケーション・ショートメッセージ双方向通信システムを使用する際の GUI (Graphic Use Interface)の基礎検討のために、スマートフォンによるアプリケーション開発及びサーバ開発を行っ



た。

③ 研究実施方法(研究チーム内外の連携関係など)

東北大学グループと月1度以上の頻度で綿密に研究打ち合わせを実施するとともに、東日本大震災の被災県の自治体職員と情報交換を進めながら研究を実施している。

6) 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 回路の高集積・高機能化によるマルチモード・マルチバンド化、および伝搬特性やデバイス特性を補償する技術が必須である。

本研究グループの課題は、ミリ波帯を含めた無線規格に対応したオール Si の開発によるマルチモード・マルチバンド化、ミリ波帯における高周波特性の向上、および複数の無線規格に対応した受信器による受信性能のディペンダビリティ確保である。

② 本グループの研究の特徴

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した。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した。これにより、5GHz 帯の直交ミキサを上記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 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、ミリ波帯での CMOS プロセスに適した回路構成として LNA はカスコード接続で構成し、入出力の整合以外にも2つのトランジスタの接続点にインダクタを並列に接続し、トランジスタの段間整合をとることで増幅器の利得を高めた。また、ミキサは受信信号の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った。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した。

③ 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ち合わ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。

(3) 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。

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。

#### (4) 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、各チーム内で課題となっている 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。

### 1.3 研究グループの今年度の研究の狙い

#### 1) 東北大学グループ

(1) オール Si CMOS による RF IC については、90nm Si 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、伝搬路・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可能な、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。

#### 2) 東京工業大学グループ

60GHz ミリ波通信用として 5bit 2.5GSps、広帯域システム用として 10bit、400MSps、狭帯域システムとして 12bit 20MSps 程度の ADC/DAC が必要である。最終的にはこれらを統合し、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ラブルな ADC/DAC の実現を目指す。消費電力はアナログデジタル混載 LSI として搭載可能な 50mW 以下を目指す。これによりディペンダブル・エアのベースバンドアナログ回路が実現できる。

現在は、それぞれの ADC/DAC が実現できた段階であり、次のステップに統合を行う。

#### 3) 高知工科大学グループ

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した。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観点から、その基本的アーキテクチャを定式化した。

#### 4) 広島大学グループ

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。

#### 5) 富山高専グループ

東北大学グループと共同で、準天頂衛星を用いたロケーション・ショートメッセージ双方向通信システムの実

現に向けて、準天頂衛星の位置精度を実測評価するとともに双方向通信機能の基礎検討を行う。

#### 6) 三菱電機グループ

本研究グループの主な技術的な達成目標は以下の3つである: (a) オール Si CMOS マルチモード・マルチバンド対応 RF IC の実現. (b) ミリ波帯における RF IC の性能向上. (c) 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 プロセスを用いた. 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, 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で, 受信器 RF IC のディペンダビリティを高めることが出来る. (b)では, ミリ波帯受信器 RF IC の要素回路である低雑音増幅器(LNA)の整合特性やミキサの飽和特性を改善することで, ミリ波帯での受信器 RF IC の受信ダイナミックレンジが向上する. また, (c)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.

## § 2. 研究実施体制

### (1) 東北大学グループ

ア 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)

イ 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

ア 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)

イ 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

ア 研究分担グループ長: 岩田 誠(高知工科大学情報学群、教授)

イ 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) 東京大学グループ

ア 研究分担グループ長: 藤島 実(東京大学大学院、准教授)

イ 研究項目: 微細 Si CMOS 超高周波デバイスの基礎検討

### (5) 広島大学グループ

ア 研究分担グループ長: 藤島 実(広島大学、教授)

イ 研究項目: 微細 Si CMOS 超高周波デバイスの基礎検討

### (6) 富山高専グループ

ア 研究分担グループ長: 小熊 博(富山高専、准教授)

イ 研究項目: 衛星を用いたロケーション・ショートメッセージ双方向通信システムの基礎検討

### (7) 三菱電機グループ

ア 研究分担グループ長: 中山 正敏(三菱電機(株) 情報技術総合研究所、部長)

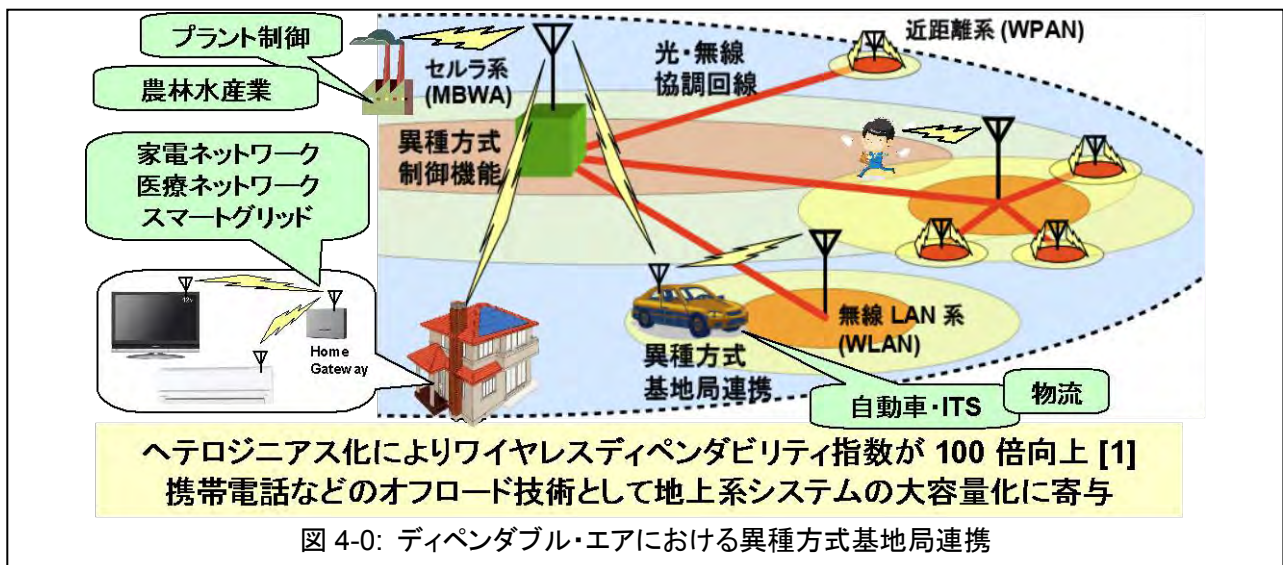
イ 研究項目: オール Si CMOS 受信器 RF IC の開発

### § 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)

#### 3.1 研究の成果と自己評価

1) 成果 1. 「ディペンダブル・エアの実現/ワイヤレスネットワークのディペンダビリティ追求の成果」(東北大学グループ)



#### ①内容

ディペンダブル・エアを実現する上で重要になる技術の一つとして、複数の無線規格を統合して利用できる技術を実現した。図 4-0 はディペンダブル・エアにおける異種方式基地局連携を示している。従来の単一通信方式を用いた無線通信ネットワークの場合、通信エリア境界付近での通信状態(受信電力強度やビット誤り率 (BER))が不安定であるため通信速度が低下することが一般的であり、通信接続性に課題があった。それに対して、ディペンダブル・エアでは、MBWA などのセルラ系広域通信の基地局が異種方式制御機能を有することで、MBWA セルを通信制御エリアとする。そして、傘下に光・無線協調回線を介して無線 LAN や無線 PAN などの近距離・高速無線通信方式の基地局が入る。これらの異種無線通信方式の基地局が連携することにより、より広域で高速な通信環境を提供できる信頼性の高い無線通信ネットワークを実現した。その結果、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、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。

また、本研究開発では、無線通信ネットワークの評価指標の一つとして、ワイヤレスディペンダビリティ指標の概念を提案した(参考文献: [1] 坪内ほか, ディペンダブル・エア, 信学論, J95-C(12), Dec. 2012)。ワイヤレスディペンダビリティ指標として、通信制御エリアにおける総スループット指数  $F$  と、同時通信可能なユーザ数の 2 種類の観点で定義した。この指標を用いると、図 4-0 で示したディペンダブル・エアにおける異種方式基地局連携を用いることで、総スループット指数  $F$  が 100 倍向上することが示された。

#### ②有用性

ディペンダブル・エアは、これまでの携帯電話をはじめとする H2H (人と人) の情報通信のみならず、H2M (人とモノ) や M2M (モノとモノ) のような高信頼性を求められる制御通信にも適用可能である。よって、図 4-0 に示すようなプラント制御、スマートグリッド、自動車・ITS、物流などの各分野への適用が可能となる。

#### ③優位比較

ディペンダブル・エアは、ただ単に複数の異種無線通信方式を組み合わせて使うのではなく、広い周波数帯域にわたるヘテロジニアス無線通信接続環境をユーザのために最適化している点に優位性がある。さらに、無線通信・ネットワーク技術のみならず、これらを支えるデバイス・信号処理技術を同時に研究開発した点が

本研究課題の特徴であり、他の研究開発に見られない点である。

また、無線通信方式やその利用状態の多様化によって、これまでの主要な評価指標であった周波数利用効率だけでは、ディペンダブル・エアで提案しているような新たな手法を正当に評価できない。それに対して、ワイヤレスディペンダビリティ指標については、ディペンダブル・エアを含むヘテロジニアスネットワークの評価軸を明確に示している点が優位な点である。

## 2) 成果 2. 「衛星系／地上系融合ディペンダブル・エア：準天頂衛星を用いたロケーション・ショートメッセージ通信」(東北大学グループ・富山高専グループ)

### ①内容

地上系無線通信ネットワークに衛星通信を融合した、地上系／衛星系融合ディペンダブル・エアの検討として、準天頂衛星を用いた双方向通信の検討を行った。準天頂衛星を用いた双方向通信の鍵となる技術が、超長拡散符号を用いたスペクトラム拡散・符号分割多元接続 (SS-CDMA) 方式である。携帯電話やカーナビなどの無線端末にも搭載可能な 1W 程度の送信電力で、かつ、無指向性に近い低利得な末端用送信アンテナを用いて約 39,000km の距離にある準天頂衛星と通信を行うことを目指した。

その結果、拡散符号長が 10,000 を超えるような超長拡散符号を用いたスペクトラム拡散 (SS) 通信によって、高拡散利得を得ることで、準天頂衛星・小型携帯端末間の双方向通信を実現できることを示した。さらに、符号分割多元接続を行うことで、一時間当たり 300 万を超えるユーザを収容するための回線設計を行った。

### ②有用性

東日本大震災では、地上系無線通信インフラが喪失したことにより、被災者の安否確認や津波で流失した車、船などの捜索が困難であった。携帯端末やカーナビ等に本提案の通信機能が搭載されることにより、これらの問題が解決可能である。

### ③優位比較

SS を用いた衛星通信についてはこれまでも種々検討されてきたが、本研究開発では、超長拡散符号を、地上系無線通信システムとして研究・開発されてきた符号分割多元接続 (CDMA) 方式の直交符号としても積極的に活用することで、長距離通信と大収容数を両立した衛星通信システムが実現できることを示した点は優位性が高い。

## 3) 成果 3. 「スケーラブル周波数領域等化回路の ASIC 実装」(東北大学グループ・高知工科大学グループ・富山高専グループ)

### ①内容

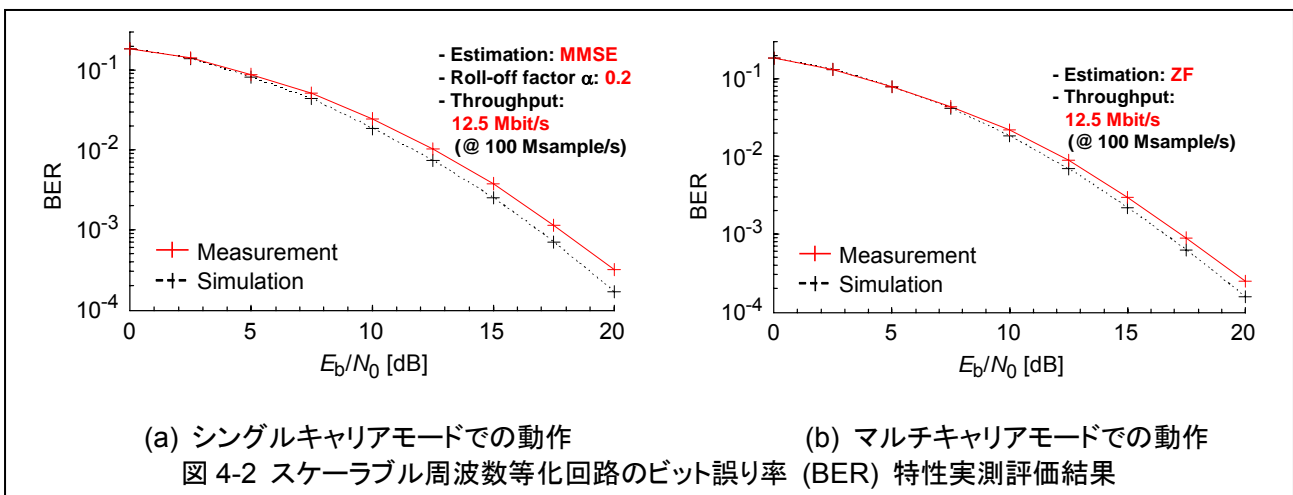
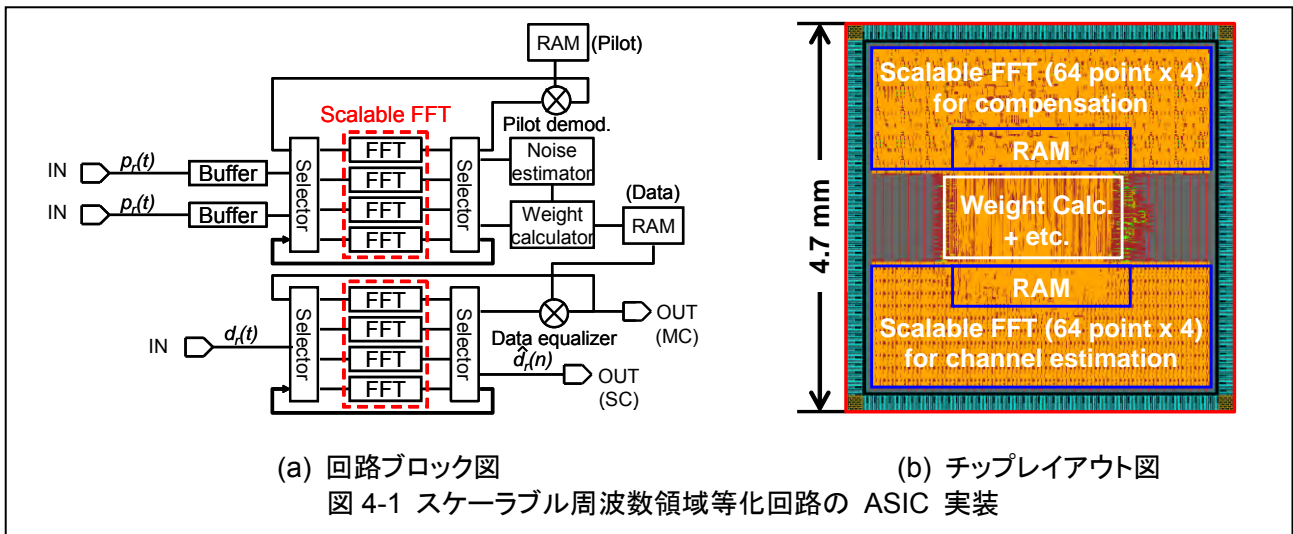
ディペンダブル・エアを実現するためには、複数の異種無線規格に対応可能な無線端末(ディペンダブルワイヤレスシステム: DWS)が必須である。特に、搬送波周波数や帯域幅がシステムによって大きく異なるため、マルチモード・マルチバンドなどのスケーラビリティを有することが重要である。さらに、最適な通信方式を選択するために、種々の無線規格の信号を同時に解析する機能が必要である。

この DWS に必要不可欠となる技術の一つが周波数領域等化(FDE)回路である。特に広帯域移動通信においては、無線チャネルは周波数選択性が強くなり伝送特性が大幅に劣化するが、FDE を用いることでシングルキャリア(SC: single carrier)通信においても周波数ダイバシチ効果が得られるため、BER 特性を大幅に改善可能である。さらに、DWS において、この FDE 技術は伝搬路特性改善のみならず、FDE に含まれるチャネル推定の機能を用いた最適チャネル選択技術にも必要不可欠である。複数方式のパイロット信号を同時に受信し、チャネル特性を解析することで、より高品質通信可能な通信方式やチャネルを選択できる。

図 4-1 は設計したマルチモード FDE ASIC の (a) 回路図ならびに (b) チップレイアウト図である。本試作では、180nm CMOS プロセスを用いた。コアサイズは 17.6mm<sup>2</sup>であった。100Msample/s 動作時において、スループットは最大 48.1Mbit/s、消費電力は 660mW であった。図 4-2 にスケーラブル周波数等化回路のビット誤り率 (BER) 特性実測評価結果を示す。2つの信号形式 (a) シングルキャリア ならびに (b) マルチキャリアのどちらの信号に対しても、試作チップは大きな劣化なく動作していることが確認できた。

②有用性

この結果は、セルラ方式などの移動通信全般の伝搬路補償技術として適用可能だけでなく、超広帯域化によって、周波数特性の劣化が想定される高周波デバイスの特性改善にも非常に大きな効果があり、適用範囲が広い。



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。今後の課題としては、ASIC 内の回路構成、特に FFT 回路のパイプライン化などを行うことで、より高速・広帯域の信号処理ができるように改善することが必要であると考える。

4) 成果 4. 「低電力・低ノイズダイナミック比較器」(東京工業大グループ)

①内容

比較器は全ての ADC の性能を左右する重要回路である。従来は常時電流が流れる増幅回路を用いたもので実現されていたが、最近では CMOS ロジックと同様に貫通電流が流れないダイナミック比較器が開発されて使用されている。しかしながら、従来のダイナミック比較器はノイズが大きく、高精度 ADC には使用することができないため、低消費電力化が困難であった。

そこで我々は図 4-3 に示すように、初段のダイナミック増幅器の出力信号を、従来の NMOS だけで受ける方法から PMOS も加えた CMOS 構成にし、これにより従来 2 つ必要だったクロックを 1 つで動作できるようになり、ノイズと低減とともに低消費電力化を図ることに成功した。

②有用性

- 1) 低ノイズ: 図 4-4 に示すように従来よりもノイズ電力で 1/10 になり, 高精度 ADC にも使用可能になった
- 2) 低電圧: 0.5V 動作が可能である
- 3) 低電力: 他のダイナミック比較器に比べ 30%程度低電力
- 4) 補間動作可能: 参照電圧を用いずに比較が可能

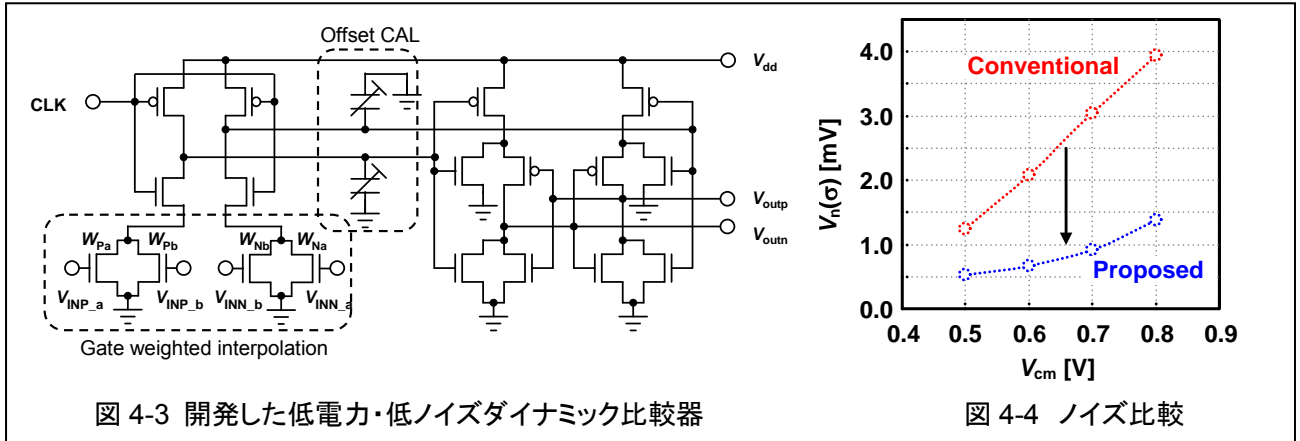


図 4-3 開発した低電力・低ノイズダイナミック比較器

図 4-4 ノイズ比較

③優位比較

図 4-4 に示すように従来に比べ電圧で 1/3, 電力で 1/10 の低ノイズ性能を実現している。この技術は5か国に特許出願され, すでに世界の多くの開発機関がこの比較器を使用している。

5) 成果 5. 「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)

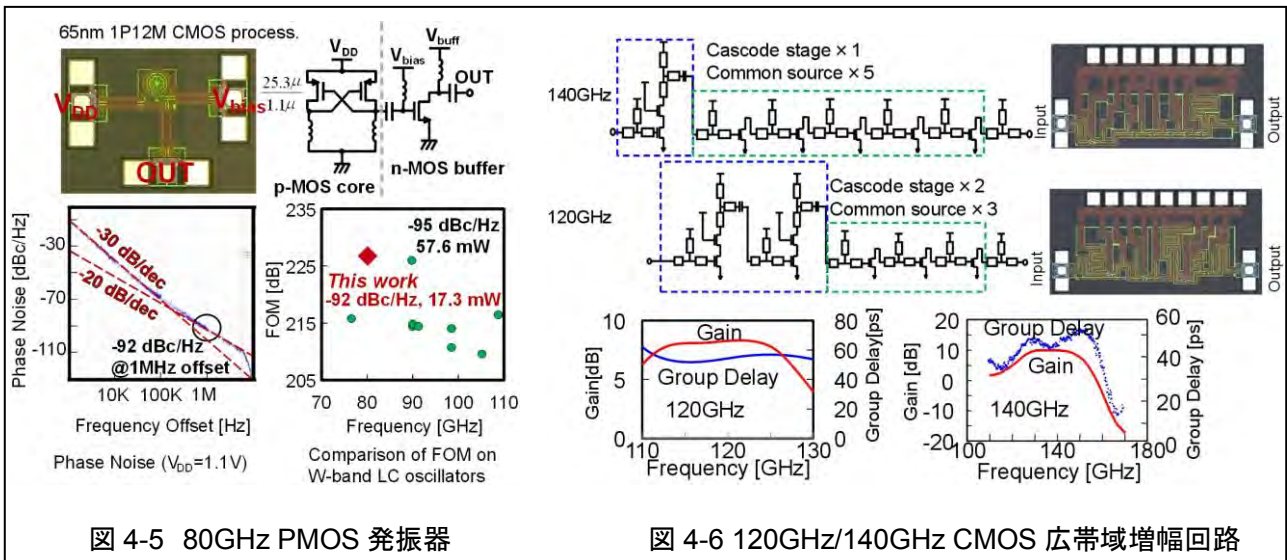


図 4-5 80GHz PMOS 発振器

図 4-6 120GHz/140GHz CMOS 広帯域増幅回路

①内容

60GHz 帯 CMOS ダウンコンバージョンミキサ, 帯域可変 IF フィルタ, 60GHz 帯 CMOS レシーバの設計・試作, 80GHz 帯 PMOS 発振器, 120GHz/140GHz 帯 CMOS 小信号増幅回路の設計と実証を行った。

②有用性

60GHz 帯ダウンコンバージョンミキサでは, ギルバートセルミキサを用いたが, その中の局部発振器が接続されるスイッチのソース・ドレイン間の電位差を 0 にし, スwitch に直流バイアス電流を流さないことによりミキサの変換利得を向上できることを示した。また, 8GHz 帯の IF フィルタにおいては, 共振周波数の異なる2つの共振増幅回路をカスケード接続しつつ, 共振回路の Q 値を並列抵抗で調整することにより所望のバンド幅をもつ IF フィルタを実現可能になることを示した。さらに, これらのミキサ, IF フィルタに加え, 14GHz 帯域幅をもつ 60GHz 帯低雑音増幅器(LNA)をワンチップに入れることにより, 60GHz 帯フルバンドレシーバを

構築できることを示した。

80GHz 帯 PMOS 発振器では世界で初めて PMOS トランジスタを用いて W 帯で発振回路を実現できることを示した。120GHz/140GHz 帯 CMOS 小信号増幅回路では、平坦な周波数特性と群遅延特性を有する広帯域増幅器を CMOS 回路で実現できることを示した。

### ③優位比較

ゼロバイアススイッチを用いるギルバートセルタイプのミキサの場合、RF 入力と IF 出力に最適なマッチング回路を用いることにより利得向上が可能であるだけでなく、カスケード接続された多段増幅回路の設計に準じた方法でミキサを設計できることを示した。IF 増幅回路については、異なる共振周波数を用いた増幅回路を2段カスケードし、共振回路の Q 値を共振回路に並列接続された抵抗で調整することにより、所望の周波数帯域を実現できることを示した。また、これらの実証試験として、ミキサと IF フィルタに、アクティブバラン機能の付いた 14GHz 帯域 60GHz 帯 LNA を組み合わせることで、簡単に 60GHz 帯受信機を構成可能であることを示した。

CMOS ミリ波回路では通常周波数特性の優れた NMOS トランジスタが用いられるが、微細化により特性の向上した PMOS トランジスタを用いて W 帯 (75~110GHz) の発振器を実現できることを示した。D 帯 (110~170GHz) 多段増幅回路において、各段を接続するマッチング回路の周波数特性を適切に分散させることにより、周波数特性と群遅延特性が平坦な広帯域増幅回路を実現できることを示した。

## 6) 成果 6. 「準天頂衛星を用いたロケーション・ショートメッセージ双方向通信システムを使用する際の GUI (Graphic Use Interface) システムの構築」(富山高専グループ)

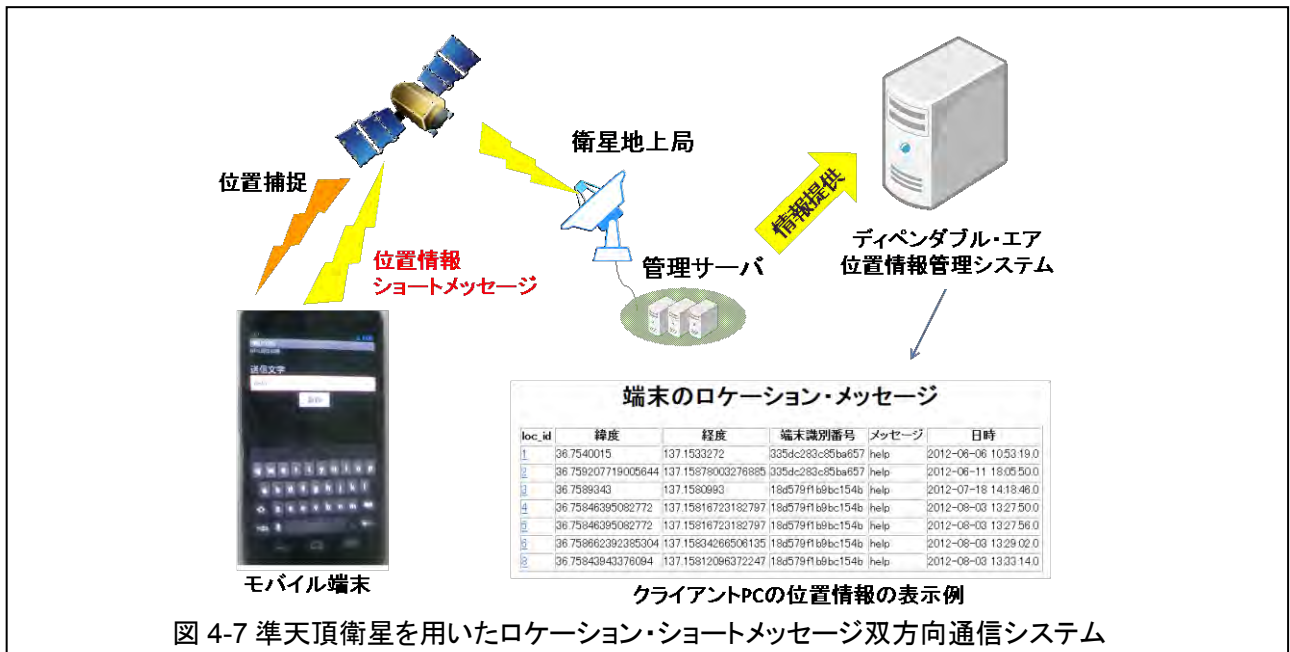


図 4-7 準天頂衛星を用いたロケーション・ショートメッセージ双方向通信システム

### ①内容

スマートフォンによるアプリケーション開発及びサーバ開発を行った (図 4-7)。

### ②有用性

端末から送信された経度・緯度等のロケーション情報、ショートメッセージ及び端末識別情報がサーバ側のデータベースに保存され、クライアントからブラウザ上で表示することができる。

### ③優位比較

汎用的な Android 端末及び Linux サーバによる開発のため、ディペンダブル・エアの端末側で中核として使用されるモバイル端末に容易に実装可能である。

## 7) 成果 7. 「オール Si CMOS 受信器 RF IC の開発」(三菱電機グループ)

### ①内容



台湾の半導体ファブリケータ TSMC 社の 90nm CMOS プロセスを用いて 60GHz 帯要素回路 IC, 5GHz 帯受信フロントエンド IC, 60GHz 帯受信フロントエンド IC および 5GHz/60GHz 帯一体形の受信フロントエンド IC の試作を行った (図 4-8). 60GHz 帯 LNA は段間整合をとったカスコード構成を採用することにより高利得化を図り, ミキサでは新たにトランジスタペア形偶高調波ミキサを考案し, 試作によってその有効性を確認した. 5GHz 帯受信フロントエンド IC は, LNA と直交ミキサとからなる 5GHz 帯受信フロントエンドと, 60GHz 帯から 60GHz 帯受信フロントエンドにより 5GHz 帯に周波数変換された受信信号を入力するための切り替え回路を集積化し, RF 周波数 5.2GHz において 38.5dB (目標値 35.0dB 以上) の変換利得を得た. 60GHz 帯受信フロントエンド IC は 60GHz 帯 LNA とトランジスタペア形偶高調波ミキサで構成することで, RF 周波数 60GHz, IF 周波数 5GHz において 21.3dB (目標値 18.0dB 以上) の変換利得を得た. また, 電磁界解析を導入することによりフリップチップ実装時における不要な伝搬モードを解析し, フリップチップ実装時においてもオンウェハ評価時と同等の性能が得られ, 目標値を満足することを確認した (図 4-9).

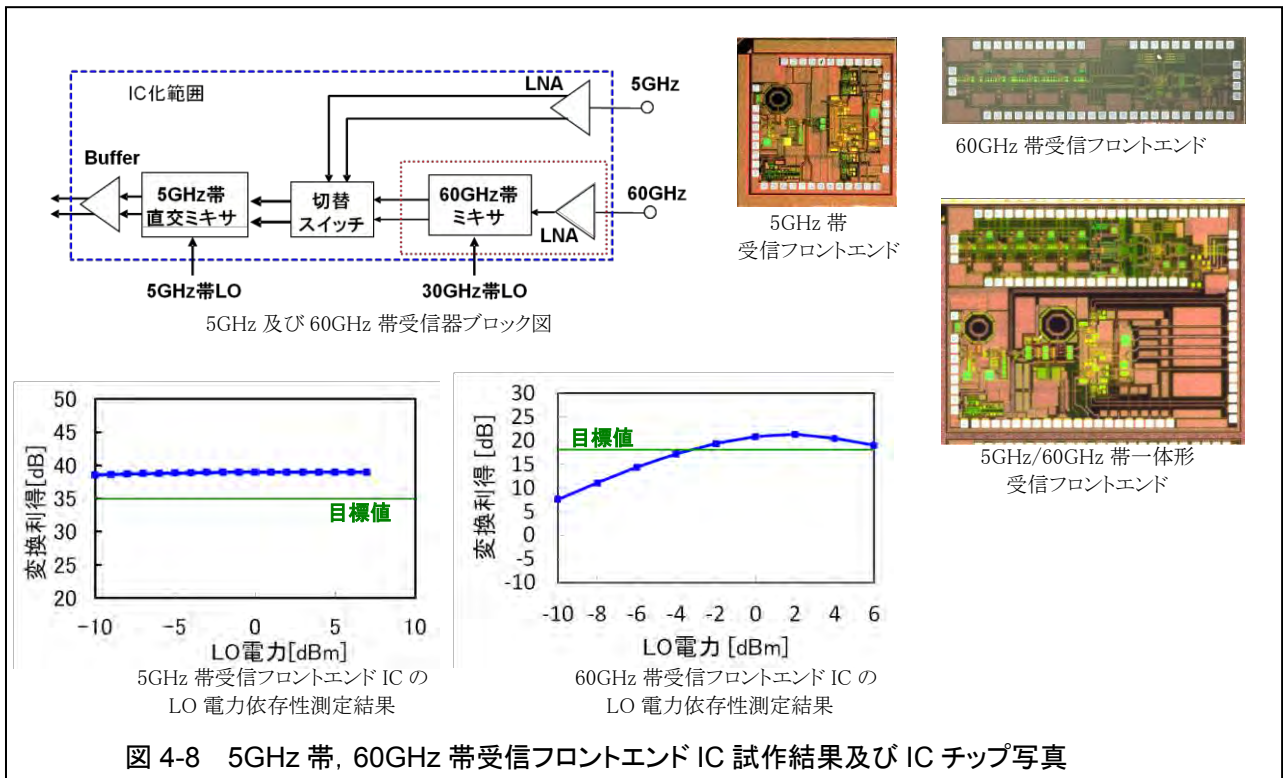


図 4-8 5GHz 帯, 60GHz 帯受信フロントエンド IC 試作結果及び IC チップ写真

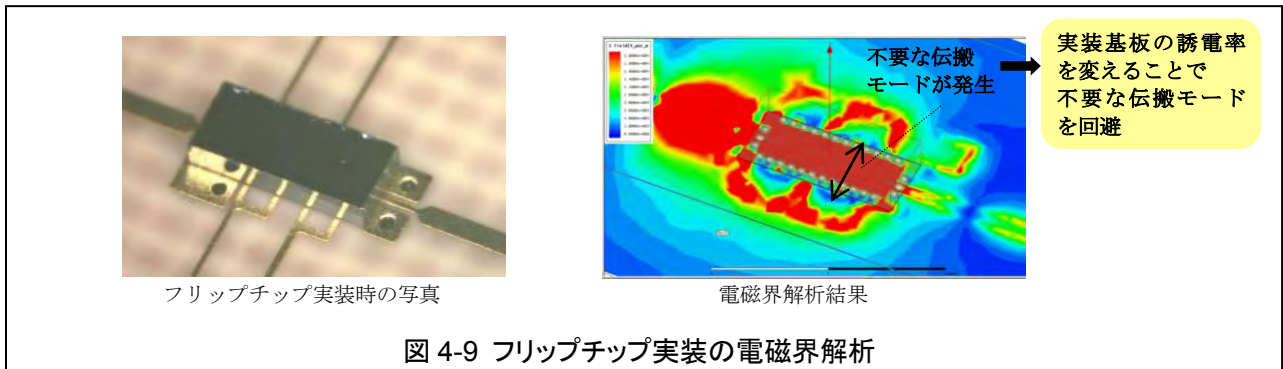


図 4-9 フリップチップ実装の電磁界解析

## ②有用性

新たに考案した 60GHz 帯トランジスタペア形偶高調波ミキサは, 通常のみキサに比べて 1/2 の周波数の局部発振波でミキシング動作するため, 局部発振波の生成が容易となって回路の小形化が可能となるとともに, 優れた高周波特性, 具体的には飽和特性の向上を得ることができる. また, 60GHz 帯 LNA はカスコード回路の 2 つのトランジスタの接続点にインダクタを並列に接続してトランジスタの段間整合をとり, 高利得化を実現し

たことで優れた受信特性を得ることができる。また、最終的に 5GHz 帯と 60GHz 帯の受信回路の共用を図るため、5GHz 帯直交ミキサを両周波数帯で共有する構成を採用し、複数の無線規格に対する受信器 RF IC のディペンダビリティ向上を図る。

### ③優位比較

競争相手としては、UCLA, UC Berkeley, Georgia 工科大, Philips など、多数の大学やメーカーがあるが、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見当たらず、本研究はディペンダビリティ確保の点で、優位性が高いと考える。また、新たに考案した 60GHz 帯の受信ミキサは、電流値を非常に絞るパッシブ動作をさせるために、周波数変換に必要な局部発振波の電力が大きくなる、変換利得が小さい、など劣る点もあるが、必要な局部発振波の周波数が通常の 1/2 ですみ、回路規模を小さくできる点や、高周波特性では飽和特性が優れている。

## 3.2 上記3.1の成果うち、特筆すべきもの

### (1) 特に顕著な成果(科学や技術の新しい分野の展望など)

成果 1 で示したディペンダブル・エアの実現、ならびにワイヤレスネットワークのディペンダビリティ追求の成果については、ただ単に複数の異なる無線通信方式を組み合わせるだけではなく、異種エアインタフェースを選択的に用いた無線環境の接続品質の確保により、災害時でも必ずつながる高信頼・安定な無線通信ネットワークの具現化を行った点が大きな成果であると考えている。

成果 3 で示した周波数領域等化回路については、FPGA ならびに ASIC で実装した例は、世界的にみても発表されている例はほとんどなく、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。また、スケラブル化によって、異種無線通信方式に対応可能なヘテロジニアスネットワークにも適用可能である点は、オリジナリティが高いと考えている。

成果 4 で示した低電力・低ノイズダイナミック比較器については、無線通信技術への適用のみならず、応用範囲が広いことが特徴である。この技術は 5 か国に特許出願され、すでに世界の多くの開発機関がこの比較器を使用している。

成果 7 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 5 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 Si 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。

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、シングルキャリア/マルチキャリアハイブリッド方式など変復調方式の新規提案にも繋がっており、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。

## § 4. 成果発表等

### (4-1)原著論文発表

#### ●論文詳細情報

1. 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 Network with Handover in Application Layer:

- Feasibility Study Based on Field Trial Results,” IEICE Trans. Commun., vol.E95-B, no.4, pp.1152-1160, April 2012.
2. A. Orii, K. Katayama, M. Motoyoshi, K. Takano, M. Fujishima, “118GHz CMOS Amplifier with Group Delay Variation of 11.2ps and 3dB Bandwidth of 20.4GHz,” 2012 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), May 2012.
  3. M. Suizu, K. Katayama, M. Motoyoshi, K. Takano, M. Fujishima, “Maximizing Transducer Gain per Power Dissipation in 100 GHz CMOS Six-Stage Amplifier,” 2012 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), May 2012.
  4. S. Tanimori, K. Katayama, M. Motoyoshi, K. Takano, M. Fujishima, “80GHz 12.2mW p-MOS Cross-Coupled CMOS LC Oscillator,” 2012 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), May 2012.
  5. M.Miyahara H. Sakaguchi, N. Shimasaki and A. Matsuzawa, "An 84 mW 0.36mm<sup>2</sup> Analog Baseband Circuits for 60 GHz Wireless Transceiver in 40 nm CMOS," IEEE RFIC Symp. Dig., pp. 495-498, June 2012.
  6. 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,” IEICE Trans. Electron., vol.E95-C, no.6, pp.1017-1025, June 2012.
  7. N. Suematsu, S. Yoshida, S. Tanifuji, S. Kameda, T. Takagi, and K. Tsubouchi, “A 60 GHz-Band 3-Dimensional System-in-Package Transmitter Module with Integrated Antenna,” IEICE Trans. Electron., vol.E95-C, no.7, pp.1141-1146, July 2012 (invited).
  8. S. Yoshida, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, “60-GHz Band Copper Ball Vertical Interconnection for MMW 3-D System-in-Package Front-End Modules,” IEICE Trans. Electron., vol.E95-C, no.7, pp.1276-1284, July 2012.
  9. K. Miyagi, S. Sannomiya, M. Iwata, and H. Nishikawa, “Low-Power Self-Timed Pipeline with Runtime Fine-Grain Power Supply,” The 2012 International Conference on Parallel and Distributed Processing Technique and Applications, pp.472 – 478, Las Vegas, July 2012.
  10. Y. Miyake, F. Yamagata, H. Oguma, N. Izuka, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, “Hybrid Single-Carrier and Multi-Carrier System: Evaluation of Throughput with Inter-Cell Interference,” IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC2012), Sept. 2012.
  11. Y. Suzuki, S. Yoshida, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and Kazuo Tsubouchi, “60 GHz Band 2x4 Dipole Array Antenna Using Multi Stacked Organic Substrates Structure,” The International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2012), Oct. 2012.
  12. T. Ta, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, “A Si-CMOS 5-bit Baseband Phase Shifter Using Fixed Gain Amplifier Matrix,” European Microwave Conference 2012 (EuMC2012), Oct. 2012.
  13. O. Wada, T. Tan, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, “5 GHz-Band CMOS Direct Digital RF Modulator Using Current-Mode DAC,” The 2012 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2012), Dec. 2012.
  14. T. Ta, S. Yoshida, Y. Suzuki, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, “A 3-D Radiation Pattern Measurement Method for a 60-GHz-Band WPAN Phased Array Antenna,” The 2012 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2012), Dec. 2012.
  15. T. Takagi, E. Nakayama, T. T. Ta, S. Kameda, N. Suematsu, and K. Tsubouchi, “A novel planer type broadband CMOS on-chip balun with relative bandwidth of 158%,” The 2012 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2012), Dec. 2012.
  16. 坪内 和夫, 亀田 卓, 末松 憲治, ”ディペンダブルエア,” 信学論 (JC), vol.J95-C, no.12, pp.460-469, Dec. 2012 (招待論文).
  17. James Lin, Ibuki Mano, Masaya Miyahara, and Akira Matsuzawa, “A 0.5 V, 420 MSps, 7-bit flash ADC using all-digital time-domain delay interpolation,” IEEE EDSSC, Bangkok, Dec. 2012.
  18. 三宮 秀次, 青木 一浩, 宮城 桂, 岩田 誠, 西川 博昭, “超低消費電力化データ駆動ネットワークインテグレーション ULP-CUE の試作とその評価,” 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム (ACS),6(1), pp.78-86, Jan. 2013.
  19. S. Kameda, H. Oguma, N. Izuka, Y. Asano, Y. Yamazaki, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "Measured downlink throughput performance of MBWA system in urban area," IEICE Trans. Commun., vol.E96-B, no.1, pp.329-334, Jan. 2013.
  20. H. Lee, Y. Asada, M. Miyahara, and A. Matsuzawa, “A 6 bit, 7 mW, 700MS/s Subranging ADC Using CDAC and Gate-Weighted Interpolation,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E96-A, no.2, pp.422-433, Feb.

2013.

(4-2)知財出願

- ① 平成24年度特許出願件数(国内 6 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 12 件)