

1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

◆研究開発課題名 継続的進化を可能とする B5G IoT SoC及びIoTソリューション構築プラットフォームの研究開発

◆受託者

シャープ株式会社、シャープセミコンダクターイノベーション株式会社、国立大学法人東京大学、国立大学法人東京工業大学、日本無線株式会社

◆研究開発期間 令和3年度～令和7年度 (5年間)

◆研究開発予算 (契約額) 令和3年度から令和5年度までの総額6,345百万円 (令和5年度1,835百万円)

2. 研究開発の目標

継続的な進化に対応可能な、カスタマイズ性の高いB5G IoT端末向けSoCの研究開発を行い、端末と基地局を総合して機能変更を行う事が出来る開発環境として、B5G SDR-PF (B5G Software Defined Radio-Platform)を構築する。

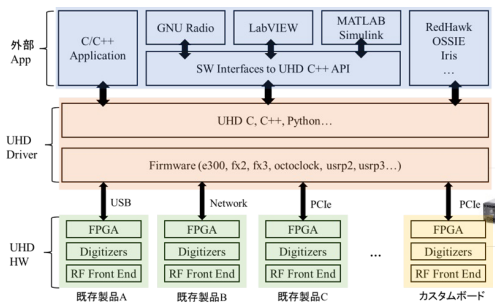
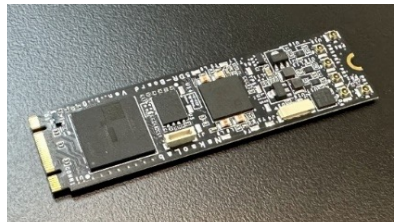
ベースバンド処理SoC、60GHz帯ミリ波対応のCMOS RFチップのチップセットを国内設計で開発し、B5G IoTに必要なセキュリティの高度化と低消費電力化をマイクロコントローラベースのSoCで実現する事で、国際競争力の高いB5G IoT端末の実用化フェーズに繋げる。

3. 研究開発の成果

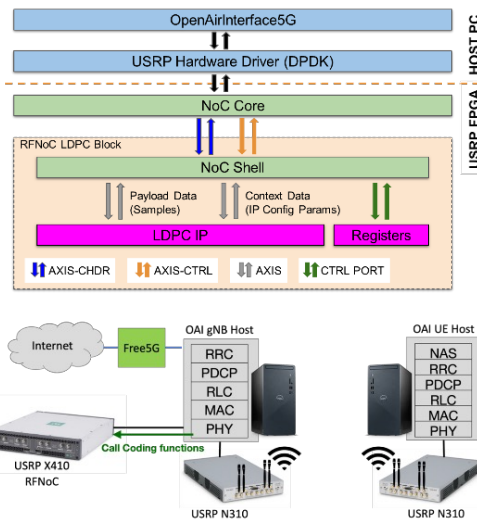
研究開発項目1：究極のカスタマイズ性を実現するB5G IoT向け B5G SDR-PFの研究開発

研究開発項目1-a) B5G IoT SoC向けB5G SDR-PFの構築

◆ 継続進化可能なSDRボードシステム (B5G SDR-PF) の構築



◆ 継続進化可能なSDR開発環境 (テストベッド) と通信機能検証



UEの通信モジュールを含めて「継続的に進化可能」なエンドツーエンド・ソフトウェア・モバイルシステムが存在せず、新たな機能を迅速に実装し展開する「迅速展開性」の競争力に欠けるという課題がある。新たな機能をシームレスにSoC、あるいはSoC+FPGA等に追加実装可能とするSDRボードシステム (B5G SDR PF)を構築する。

◆ 継続進化可能なSDRボードシステム (B5G SDR-PF) の構築

- ✓ 昨年度に設計・開発を行ったSDRボードの改良を施した新たなSDRボードの設計・開発を実施した。
- ✓ 新たなカスタマイズSDRボード試作に向けた設計・開発を実施した。
- ✓ SDRボード開発PF構築に向けたUHDドライバ・API設計を実施した。

◆ 継続進化可能なSDR開発環境 (テストベッド) と通信機能検証

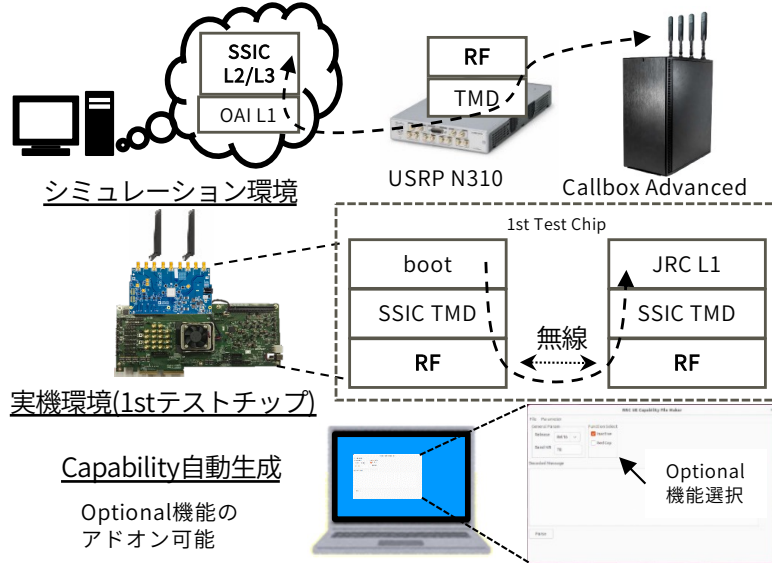
- ✓ OAIベースのソフトウェア5Gテストベッド上でLDPC符号のFPGAオフローディング方式を実装し、提案方式の有効性を明らかにした。
- ✓ SDRが持つ柔軟なプロトコル設計の実現例として上記SDRボードを利用したUEが持つ情報の基地局への伝達方式を実装し、性能評価を実施した。
- ✓ 研究開発項目3-aで開発を進めているウェアラブルセンサデバイスの透過的な5G基地局への収容方式を設計し、その有効性を明らかにした。

3. 研究開発の成果

研究開発項目1：究極のカスタマイズ性を実現するB5G IoT向け B5G SDR-PFの研究開発

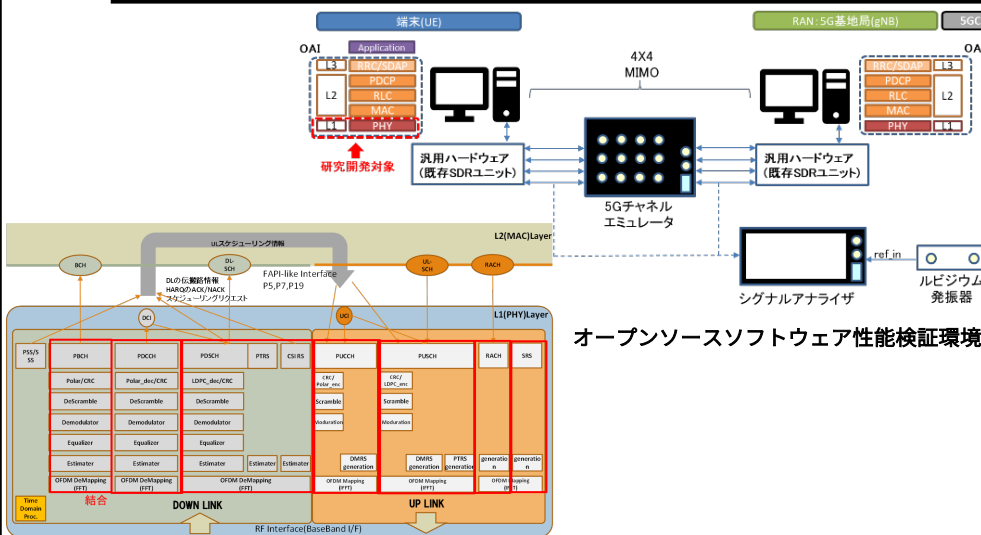
研究開発項目1-b) B5G IoT SoC 向け B5G SDR-PF のソフトウェアアーキテクチャの研究開発

B5G IoT SoC向け端末ソフトウェア開発環境



- B5G IoT SoC向けに最適化した端末用ソフトウェアの研究開発を進めている。独自設計したソフトウェアの実証と普及に向け、以下の開発、検証を実施。
- B5G IoT SoC向けに最適化した端末ソフトウェアを、OSS基地局並びに3GPP規格に準拠した基地局シミュレータと接続検証を実施した。
- 端末向けに設計したL1ソフトウェアとハードウェアとの連携動作確認の為に、エミュレータ環境で動作検証を実施した。
- 1stテストチップが動作する実機評価ボード上で、DownlinkのDCIデコード処理についてSSICソフトウェア/ハードウェアと、JRCソフトウェアの協調動作検証を実施した。シールドルーム環境において無線でデータを送受信してDCIデコード処理が可能であることを確認した。
- 実証実験に向けてL2/L3の機能拡充を実施した。現在のプロトコル実装レベルはSISOで基地局シミュレータと接続可能な状態である。
- 24年度実施予定の実証実験に先駆けて、構築したSDR-PF上で新しい機能の追加を実現できることの実証として、Release17の機能の一部であるRedcap-BWPについて追加実装、動作検証を実施した。
- SDR-PFのソフトウェア開発補助ツールとして、Optionalな機能の追加の際、コード量の最適化とユーザビリティを考慮し規格書のASN.1フォーマットからCapabilityのコード自動生成ツールを作成した。

研究開発項目1-c) DSP ソフトウェア無線の L1 層ソフトウェア研究開発



- L1層（物理層）機能モジュールを結合評価したソフトウェア（JRC）をB5G IoT SoC（1stチップ）評価ボード（SSIC）に実装し、DownlinkのDCIデコード処理について、SSICソフトウェアとの協調動作検証を実施した。また、最終目標に向けてシステム性能のボトルネック解析による処理性能向上や、性能改善を実施した。
- 各機能モジュールを結合した全チャンネルについて、仮想検証環境（DSPシミュレーション環境）にて所望性能（MATLABリファレンスモデルと照合）が得られることを検証した。
- オープンソースコードソフトウェア（OAI）を活用した検証環境を用いRFインターフェース及びL2インターフェースを実装し、L3/L2/L1の基本的な総合的な動作検証を実施した。
- MIMO、高多値変調に加えCSI-RSを含む追加機能の実装、検証を実施した。

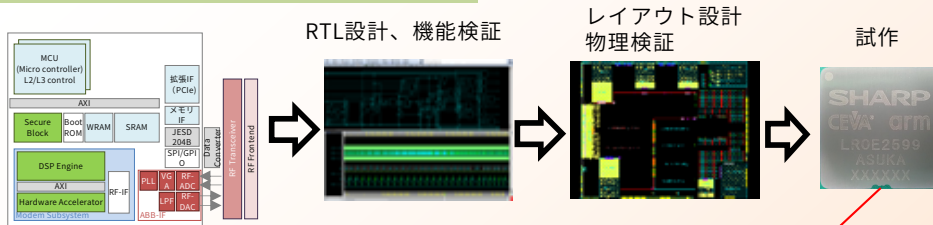
L1層ソフトウェアの各機能モジュールの結合イメージ図

3. 研究開発の成果

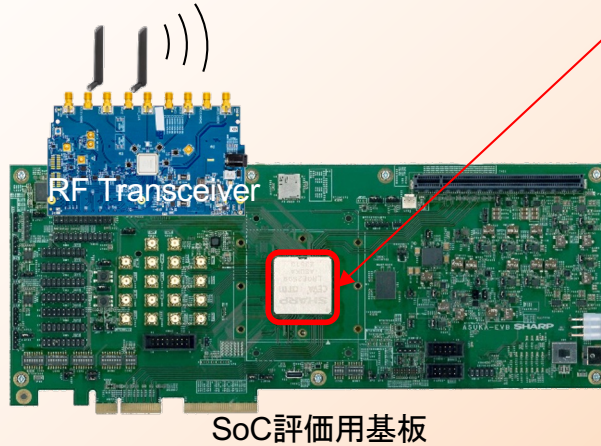
研究開発項目2：国産 B5G IoT SoCの研究開発

研究開発項目2-a) マイクロコントローラ・ベースのB5G IoT SoCの研究開発

B5G IoT SoC開発(1stチップ)



評価環境構築



- 2023年度はB5G IoT SoC(1stチップ)の論理検証、レイアウト設計、物理検証、タイミング検証を行い2023年8月にテープアウト、2023年12月に試作を完了した。また、SDR PFとして必要なRF TransceiverボードIF、PCIe、USB、Nano Sim、DAC/ADC用IFを実装したSoC評価用基板の設計、試作を完了した。

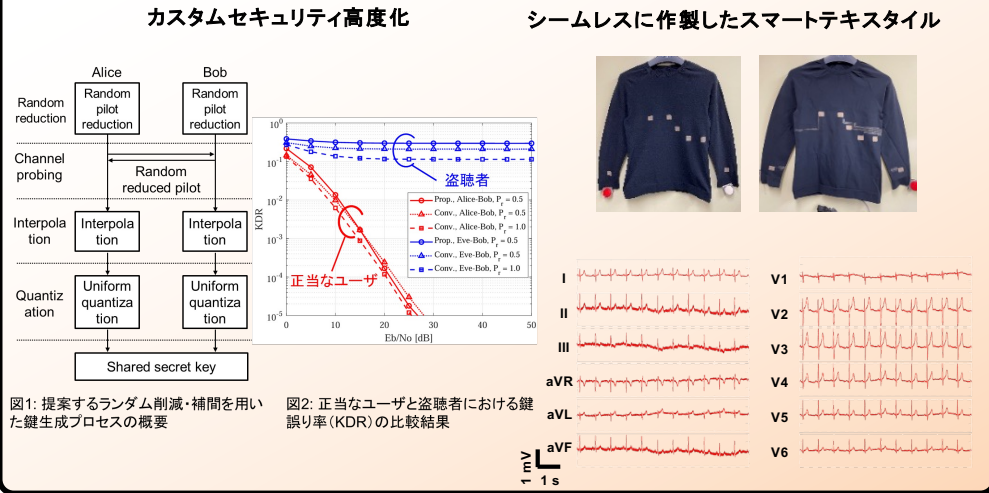
この評価用基板を使用して、SoCに実装した回路の動作検証、各種インターフェースの動作確認、共同研究者の日本無線株式会社作成L1ソフトウェアの動作確認、有線および無線での信号の送受信の確認等、SDR PF SoCの評価を実施した。

- 再送制御に用いるHARQ(Hybrid automatic repeat request)について、LLR (log-likelihood ratio) の圧縮に関する特許出願を行った(2024年3月)
- 論理エミュレータを活用し、CPUおよびDSPのプログラムの動作確認、L1ソフトウェア開発環境で作成したプログラム (PDCCH, PUCCH, PUSCH, CSI-RS, PSS：日本無線株式会社作成) の動作確認を実チップ試作に先立ち、前倒しで実施することによって、試作完了後のチップ評価作業の効率化を図った。

3. 研究開発の成果

研究開発項目3：B5G IoT SoCのセキュリティ向上

研究開発項目3-a) B5G IoT SoCのローカルB5G新機能(カスタムセキュリティ高度化と低消費電力化)の研究開発

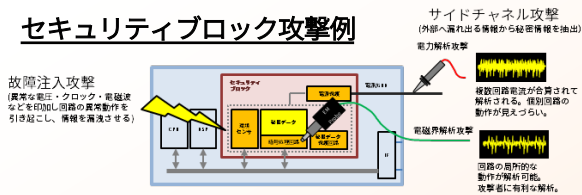


B5Gが対象とする多様なワイヤレスアプリケーションに応じて、適切にセキュリティレベルを変更できることが重要である。また、ウェアラブルデバイスの発展に伴い、生体信号や行動などの多様な情報を簡便に計測できるようになりつつあるが、その低消費電力化が求められている。

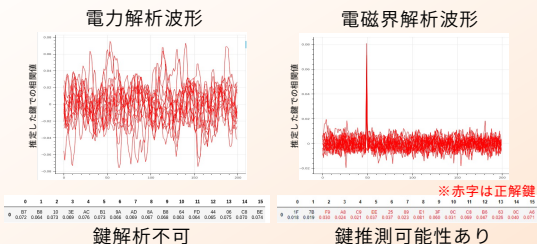
- 伝搬路に基づく鍵共有において、低消費電力化・盗聴耐性の強化を目的とし、パイロット信号をランダムに削減・補間する新規手法を提案し、数値解析により初期的な有効性の検証を行った。
- 使用者に合わせて電極の位置を配置した全身テキスタイルを作製することで、テキスタイルを着るだけで、有線で計測する12誘導心電図と同様の信号クオリティ及び波形を取得できることを確認した。

研究開発項目3-b) B5G IoT SoCのハードウェアセキュリティ高度化とカスタムセキュリティ実装の研究開発

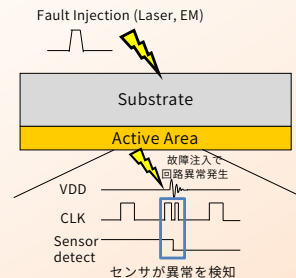
セキュリティブロック攻撃例



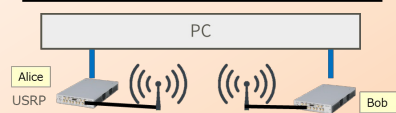
サイドチャネル攻撃 (秘匿データ保護回路有効時)



故障注入攻撃



カスタムセキュリティ実験環境



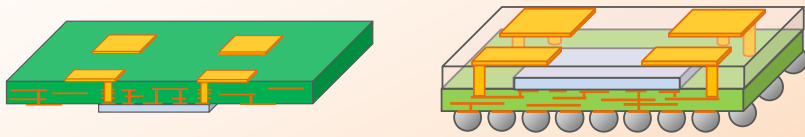
- 2023年度はFPGAで秘匿データ保護回路の電磁界解析攻撃耐性について検討を行い、回路の局所的な動作を解析することにより鍵が推測できる可能性があることを確認した。また、電磁界攻撃から鍵を保護する方法を検討すると共に、電磁界解析攻撃の対策特許を創出した。(1件出願)
- 策定した評価基準に沿ってB5G IoT SoC に実装したセキュリティブロックの評価を行うと共に、攻撃検知用センサの基本動作を確認した。
- USRPを使用してカスタムセキュリティ基礎実験環境を構築し、パイロット信号による秘密鍵導出実験を行うと共に、実環境への実装に関する課題を抽出した。
- B5G IoT SoC のセキュアブート・セキュア環境実装仕様を策定した。

3. 研究開発の成果

研究開発項目4：B5G IoT SoC向けRF技術の研究開発

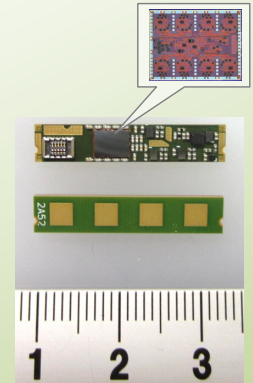
研究開発項目4-a) ミリ波帯IC/アンテナ/パッケージ一体設計技術の研究開発

- ミリ波帯小型アンテナモジュールの研究開発
- 60GHz帯までの周波数帯で、省電力(低損失)なフェーズドアレイアンテナモジュールを実現



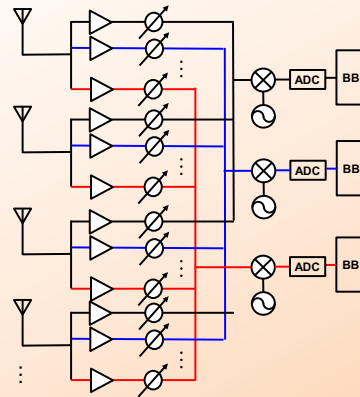
- 本研究開発項目では、Beyond 5GでIoT端末に求められる省電力（低損失）ミリ波帯アンテナモジュールの研究開発を行う。

- 28GHz HV偏波対応4アンテナフェーズドアレイ小型アンテナモジュール(22.6mm x 4.5mm, RFIC 4mm x 3mm)を設計・試作し、基本動作を確認した。
また、60GHz小型アンテナモジュールに向け、IC-多層基板間伝送特性評価用のテストパターン等の設計、試作、評価を行った。
関連特許6件出願。



研究開発項目4-b) ミリ波帯省面積低消費電力フェーズドアレイICの研究開発

- Beyond 5Gで必要となるミリ波帯フェーズドアレイ無線機の研究開発
- 高データレート、低コスト、低消費電力の実現
- 28GHz帯にあわせ、さらなる広帯域が利用可能な60GHz帯ミリ波無線通信をCMOS集積回路技術で実現
- 省面積・低コストなMIMO無線機を実現



- 本研究開発項目では、Beyond 5Gで必要となる高データレートかつ、省電力・低コストなミリ波帯フェーズドアレイ無線機の研究開発を行う。

- 提案方式の28GHz帯時分割4x4MIMO受信機は昨年度よりバージョンアップした新たなチップを65nm CMOSで試作し、5G NR標準準拠の4x4 MIMO無線通信を世界で初めて実証した。

Mode	SISO OTA*		4x4 MIMO OTA	
	28GHz	28GHz	28GHz	28GHz
Beam 1-4 Freq.	28GHz	28GHz	28GHz	28GHz
Beam 1-4 Modulation**	256QAM (MCS27) OFDMA Mode	QPSK (MCS4) OFDMA Mode	16QAM (MCS10) OFDMA Mode	64QAM (MCS17) OFDMA Mode
Beam 1-4 BW.	400MHz	400MHz	400MHz	400MHz
CLK Freq.	N/A	1.6GHz	1.6GHz	1.6GHz
Constellation***				
EVM (RMS)**	-33.7dB (2.1%)	-23.38dB (6.8%)	-23.32dB (6.8%)	-23.5dB (6.7%)

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案・採択	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰 成果の実施・その他
13 (10)	7 (6)	4 (1)	85 (47)	0 (0)	3 (1)	4 (3)	0 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1) プレスリリース 1件

2024/2/15 「Beyond 5Gに向けた新規デジタル位相同期回路を開発 ―低ジッタと低スプリアスを同時に実現―」 東京工業大学

(2) 展示会 3件

2023/5/25 「Development of Customizable SoC and SDR in the Beyond5G era」 シャープ/シャープセミコンダクターイノベーション、東京大学

2023/5/31 「JRCのローカル5Gの取り組みとBeyond 5Gに向けて」 日本無線

2023/6/28 「機械学習を用いたモバイルネットワークにおけるリアルタイムアプリケーション識別手法」 東京大学

(3) 勉強会

社会実装協力者等を対象とした勉強会を実施し、意見交換を行った。

第4回（2023年10月27日、オンライン開催）

- ・L5G基地局並びに端末開発への期待 東京大学
- ・地方自治体の課題解決に向けて 北海道、京都府、東広島市
- ・デジタルヘルスケア分野の可能性について 東京大学、岐阜大学(日本遠隔医療学会)、ミズノ 他

5. 今後の研究開発計画

2024年度は、前年度に試作したベースバンドSoCテストチップを搭載し、端末を想定した評価ボードを用い、これまで検討してきたB5G SDR-PFのプロトコルスタック（L1/L2/L3層のソフトウェア）での無線通信動作検証を目標とする。動作検証過程で得られた結果等をもとに、次回試作チップの仕様検討を推進する。また、基地局用に試作してきたSDRカードの改良と機能拡張検証を引き続き行うとともに、ベースバンドSoCテストチップの基地局SDRカードへの適用について検討を行う。B5Gで想定される新たなユースケースの研究開発として、新規セキュリティ機能（暗号鍵生成）、通信機能を有するウェアラブルデバイスの改良とともに、B5G SDR-PFへ適用する検討を継続して行う。RF技術開発に関しては、前年度までに主に28GHz帯で進めてきた時分割MIMO ICおよびフェーズドアレイ小型アンテナモジュールを60GHz帯向けに展開するための設計、試作、評価を推進する。

また、これまでに開発したB5G SDR-PFを用いた実証実験についても計画をしている。フィールドでの実験に向けて必要な評価や手続きを経て、ベースバンドSoCテストチップを搭載した端末（UE）と、同じく試作したSDRボードを搭載したローカル5G基地局（gNB）を組み合わせた通信機能評価を、自治体等の協力も得て推進する。