

2. 平成27年度主要研究成果

2.1 社会基盤ワイヤレス工学研究部門

2.1.1 本研究部門の目的

社会と生活を支える基盤としてのワイヤレス・通信ネットワークに必要なシステム化技術と基盤技術の確立をめざして研究する。これまでの人と人との通信から、人の気づかないところでモノとモノが自律的に通信することで、社会の安全・安心を支え、より快適で効率の良い社会や産業の実現に寄与するシステムの実現に寄与する技術を研究対象とする。

2.1.2 教員配置と担当領域

山尾泰 教授	部門長、ITS、防災・災害用臨時ネットワーク(DPRN)
唐沢好男 教授	電波環境の解析・評価技術(WEA), ITS
藤井威生 教授	ITS, WEA, DPRN, ワイヤレスセキュリティ(WS)
石橋功至 准教授	ITS, DPRN
中嶋信生 特任教授	ITS, DPRN

2.1.3 平成27年度の主要研究成果

(A) ITS 車車間・路車間通信技術(ITS: Intelligent Transport System)

自動走行に向けたITSの車車間・路車間通信技術についての研究を行った。特にITS通信が分散通信環境であること、自動走行に用いるためにさらなる低遅延と高信頼化が要求されることを考慮して、分散協調型の改善技術を追求した。昨年度に引き続いて総務省の戦略イノベーション創造プログラム(SIP) 委託研究「自動走行システムに必要な車車間通信・路車間通信技術の開発(H26～)」を受託した。

一方、自動走行実現のためには、通信技術単独の研究では不十分であり、自動走行制御の専門家や自律型センサー(レーダ、ライダーなど)の専門家を巻き込んだ議論が必要であることから、学内外の関係者に働きかけて自動運転に向けたITSプロジェクトの立上げ準備を行った。

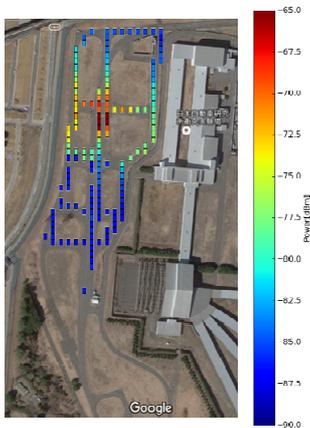
[多次元協調分散による高信頼車車間通信](藤井研究室)

本課題では、時間、周波数、空間をいかに活用して車車間通信の信頼性向上を図るかという課題に対して、「電波環境の観測および統計化による周波数高効率利用の検討」と「分散協調 STBC による高信頼マルチホップ伝送の検討」について研究を進めた。

「電波環境の観測および統計化による周波数高効率利用の検討」では、自動運転システムにおける通信信頼度、通信効率向上を目的とし、観測情報を統計処理した通信信頼度マップの構築に関する研究成果をまとめた。車車間通信の電波伝搬は周囲の構造物や地形に応じて、位置によって異なる振舞いをするため、単純な電波伝搬モデルで表現するのが難しい。一方で、自動運転など信頼性が求められる無線通信では、周辺環境の影響を考慮した無線設計が必要になる。そこで、本研究課題では、車両が無線環境や通信状態を観測し、その観測結果を電波環境データベースに登録することで、車両の位置に応じた無線環境を通信前に予測できる手法の検討を行っている。通信を行う車両は電波環境データベースにアクセスすることで、通信相手との通信信頼度が予測

できるため、その環境に適応して、変調方式や送信電力のパラメータを調節したり、マルチホップを行う際の経路構築に活用したりすることが可能となる。本年度は、有効性の実証のため、JARI のテストコースを用いた通信環境実証実験を行い、通信信頼度のマップ化が可能となることを確認した。今後は観測情報を逐次的に統計化するシステムの構築や、ユースケースを準備し、データベース利用の効果を確認するためのシミュレーションを行う予定である。

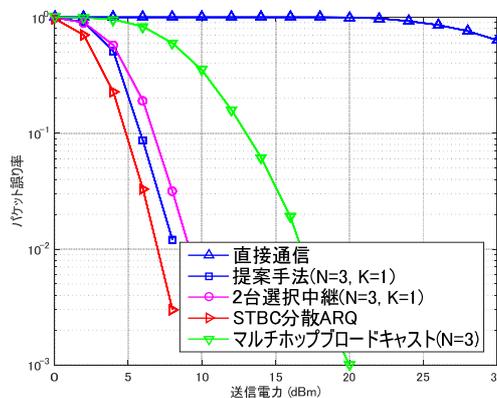
「分散協調 STBC による高信頼マルチホップ伝送の検討」では、マルチホップで構成される車車間通信ネットワークにおいて、周辺の車両と協調することで、送信車両から受信車両までの通信性能の向上を図る手法について検討を行った。ここでは、複数車両による連携送信を行うため、分散 STBC 方式に基づく協調伝送手法を検討する。特に本年度は、周辺端末すべてで情報転送を行うフラディング法と比較して、信頼度を達成しながら周波数利用効率を向上することが可能な方式として、位置、速度、移動方向情報を用いて信頼度向上に貢献度の高い車両を優先的に中継に利用するアルゴリズムを提案した。また、信号間の干渉および衝突を減少させるために、パケット伝送を管理するためのマスター車両(MVS)を分散的に選択するためのタイマーを活用する手法の検討を行った。シミュレーション結果により、提案手法を用いることで冗長な中継伝送を削減しながらフラディング法に匹敵するパケットロス率特性を達成できることを確認した。今後は、同期手法についての検討を進める予定である。



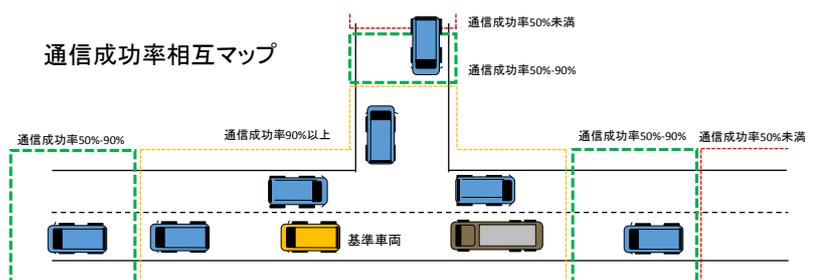
実験により構築された平均受信電力マップ



実験車両



提案中継手法の適用により全ノード中継とほぼ同等のパケット誤り率特性を達成



通信成功率のマップ化により通信信頼度にあわせた通信を実現

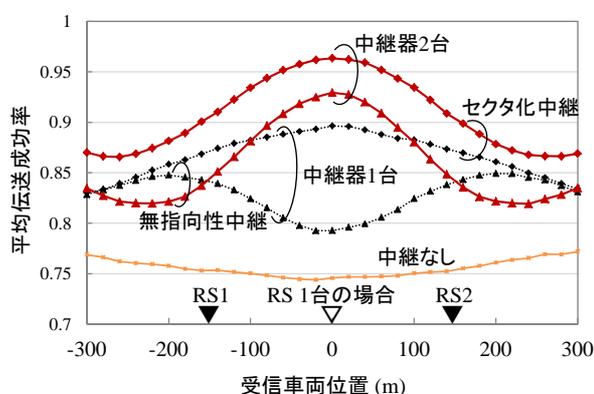
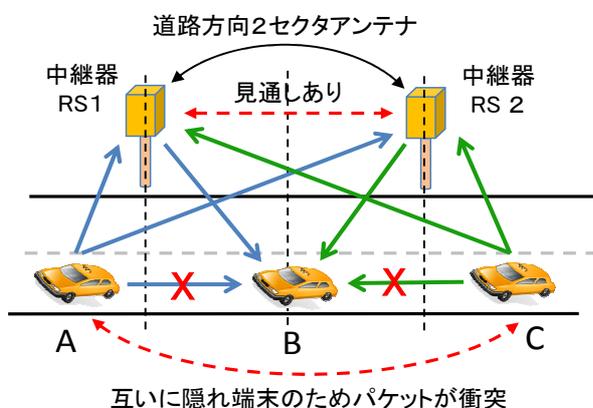
【棲分け型協調中継アシスト車車間通信システム】（山尾研究室）

本課題では、隠れ端末が多発するブロードキャスト車車間通信環境での伝送信頼度を向上しつつ、複数回送信に起因する伝送遅延を低減するために、路側中継器による中継アシスト車車間通信の研究を進めた。

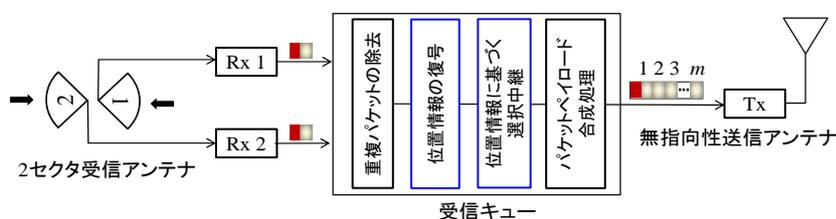
まず、昨年度に提案したセクタ化受信中継アシスト方式について、隠れ端末解析モデルを用いて詳細な性能解析を行った。中継器にセクタ化受信を用いることで、互いに隠れ端末の関係となる車載局からの送信波を異なるセクタアンテナで分離して受信でき、中継器でのパケット衝突を回避することで中継効果が大幅に向上した。さらに、本中継アシスト方式の効果とセクタアンテナ間の分離度の関係を明らかにした。

次に、直線道路に複数の路側中継器が配置された場合の提案法の改善効果について検討を行った。各中継器ではセクタ化受信に加えて、複数のパケットをまとめて一つのパケットに合成するペイロード合成中継法と、車両位置情報を活用した選択中継による棲み分け法を導入した。複数中継器による改善効果を理論解析した結果、中継トラフィックを節約しつつ、大きな中継効果を得ることができた。240 台の車載局が存在する直線道路シナリオにおいて、中継器相互の干渉および中継通信と直接車車間通信との干渉を考慮して提案法の効果をシミュレーションにより定量化した。シミュレーション結果から、複数中継器による経路ダイバーシチ効果によって、広い範囲にわたって高いブロードキャストパケット伝送成功率が維持できることが確認できた。

さらに、既存の車車間通信プロトコルである ARIB STD-T109 に提案法を適用した場合の平均伝送遅延の改善効果について、理論検討を行った。この結果、中継アシスト車車間通信ではパケット受信成功率の向上によって再送確率が下がることに加えて、中継送信遅延が短くできることを利用し、平均伝送遅延を大幅に低減できることが明らかになった。さらに直線道路をモデル化した大規模シミュレーションの結果、提案法は通常の複数回送信と比較して平均伝送遅延を 1/2 から 1/7 まで大幅に低減できることを明らかにした。



2/4 セクタ実験用アンテナ



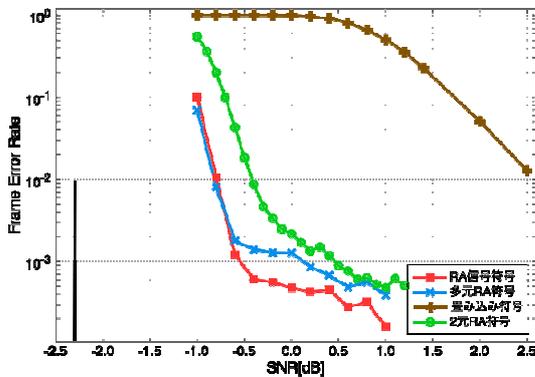
セクタ化受信 CSMA/CA 中継器(RS)の構成

【高信頼・低遅延車車間通信を実現する誤り訂正符号化技術】（石橋功至研究室）

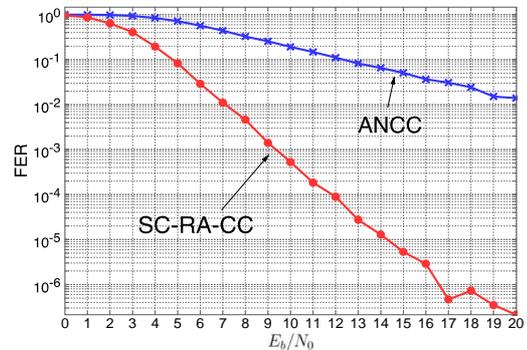
本課題では「高信頼・低遅延車車間通信を実現する誤り訂正符号化技術の調査」、「有限符号長における高信頼化を達成する RA 信号符号の構築」、「車群・基地局間通信の高信頼化を実現する空間結合 RA 符号化協調の実環境における特性解析」、及び「自動運転を支援する路側・路上センサ・車

両間通信技術の構築」のサブテーマに分けて、それぞれ調査、研究を進めた。

このうち「有限符号長における高信頼化を達成する RA 信号符号の構築」では、符号化演算量が小さく、強力な誤り訂正能力を持つ RA 符号に着目し、この符号の性質を利用した格子符号を設計することで、符号化・復号演算量を抑えながら、中符号長で優れた復号特性を持つ符号を提案した。数値結果より、RA 信号符号が中程度の符号長において、最も優れた特性を示すことが明らかにな



従来方式に比べて 3dB 程度の利得



良好な FER 特性を達成

った。一方で、現実的に興味のある FER において多元 RA 符号と RA 信号符号の特性差は大きくなく、符号化・復号演算量まで含めた形でどちらが実用的によいかという点については今後さらなる検討が必要と考えられる。有限符号長においては RA 信号符号といった高度な誤り訂正符号を用いることで高信頼・低遅延な通信を実現できることがわかったが、一方で通信路における受信電力そのものがフェージングなどの影響で落ち込んだ場合には、強力な誤り訂正能力を持つ符号を用いたとしても高信頼な通信を実現することはできない。「車群・基地局間通信の高信頼化を実現する空間結合 RA 符号化協調の実環境における特性解析」では、H26 年度に続いて空間結合 RA 符号化協調について検討し、現実的なフェージング環境下での性能評価を行った。数値結果より、従来手法である ANCC と比較して良好な FER 特性が得られることを明らかにした。

[V2M ネットワークの構築法に関する研究] (山尾研究室、石橋功至研究室)

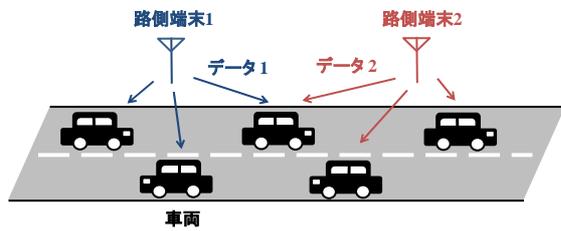
本課題では走行する車両と、道路周辺に存在するセンサや情報提供のデバイスとが、無線通信によって自律的にネットワークを構築してパケット通信を行うシステムを検討した。対象とするセンサや情報提供のデバイスは設置の容易性から、消費電力が少なく電池動作可能なものが望まれる。このため、車両との通信に用いる無線通信プロトコルは低消費電力性が重要である。このような V2M ネットワークを実現する技術として、情報配信率の向上と無線端末の低消費電力動作を同時に実現可能な通信プロトコルを検討する。主な成果は以下のとおりである。

(1) 間欠ブロードキャスト送信を用いた V2M 通信システムにおいて、高い情報配信率をより長い送信周期において達成するため、パケット受信車両によるアドホック転送法を併用した場合の改善効果を分析した。この結果、情報配信率 0.95 を得られる送信周期を、転送比率 2.5 の場合に 1.8 倍、転送比率 8 まで許容した場合に 2.4~2.5 倍まで伸ばすことができ、路側端末の省電力化に大きく寄与できることを明らかにした。

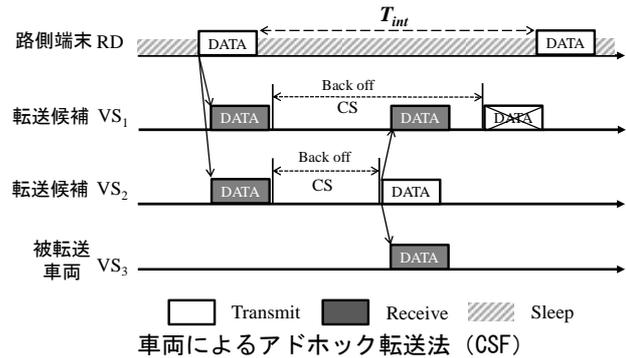
(2) 上記アドホック転送法として、従来の Irresponsible Forwarding (IF) と、新たに提案した Carrier Sense Forwarding (CSF) の 2 つを取り上げ、比較検討・評価した。両者はほぼ同等の効果を有するが、IF に比べて CSF は転送の効果が安定していることが明らかになった。

(3) 分散符号化によるランダムスリーププロトコル (RSDC) を用いた V2M ネットワークの性能を定量化した。具体的には、現実的な通信路における RSDC の性能評価を行うとともに、理論解析を行うことでその設計についても明らかにした。また、情報パケットの逐次共有方式も提案し、H26 年度の課題となっていた点を全て解決した。

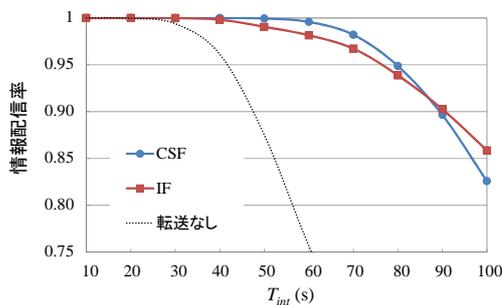
以上から、移動する車両および道路周辺に存在する無線端末が情報を交換するための V2M 通信ネットワークの構築について技術的な目処をつけることができた。



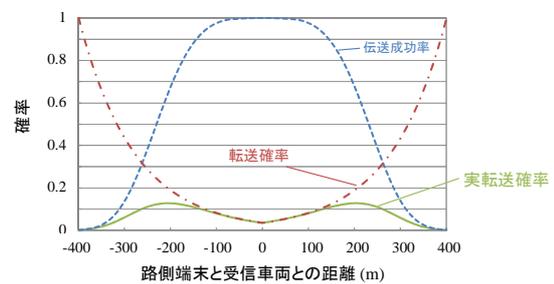
V2M 通信システム



車両によるアドホック転送法 (CSF)



アドホック転送による情報配信率の改善効果



車両位置による転送確率の分布

2.1.4 外部資金獲得状況

【科研費研究テーマおよび担当教員】

1. 基盤研究 A 「次世代 ITS のための統合分散無線ネットワーク基盤の研究」
小花、山尾、藤井、唐沢、中嶋

【受託研究テーマおよび担当教員】

1. 総務省 SIP 委託研究 「自動走行システムに必要な車車間通信・路車間通信技術の開発」 山尾、藤井、石橋 (功)

【共同研究テーマおよび担当教員】

1. V2M ネットワークの高信頼・低消費電力化に関する検討
山尾、石橋 (功)
2. 自動運転を支える無線通信システム技術の基礎検討
藤井

2.2 革新的ハードウェア研究部門

2.2.1 本研究部門の目的

次世代基地局系・端末系無線電力伝送/情報伝送ハードウェアの研究開発

2.2.2 教員配置と担当領域

本城和彦 教授	部門長、マイクロ波工学、電力工学
山尾泰 教授	リコンフィギャラブル無線回路、高効率線形送信・RoF 信号処理
石橋孝一郎 教授	低電力 RF デバイス、センサーネットワーク
石川亮 准教授	マイクロ波ミリ波半導体デバイス・回路工学
松浦基晴 准教授	広帯域 RoF の方式およびデバイス、光給電とのシステム化
高山洋一郎 客員教授	マイクロ波電力増幅器システム工学
斎藤昭 客員教授	電磁波工学、アンテナ

2.2.3 平成27年度の主要研究成果

(A) 5G 向けマルチバンド・マルチアクセス無線ハードウェア技術の研究開発

第5世代携帯電話(5G)システムでは大容量化を実現するため、UHF 帯マクロセルに加えて、SHF 帯スモールセルをオーバレイ配置するマルチバンド多層セル構成を用いることが想定されている。この場合、マクロ基地局とスモールセル基地局では複数の周波数帯域(マルチバンド)を同時運用し、端末はこれらの基地局と同時通信(マルチアクセス)するため、基地局・端末の双方において、各帯域でアナログ無線回路による性能劣化が少ないことが必要である。このため送受信回路で必須の増幅器とフィルタ、非線形補償回路を取り上げ、複数周波数同時運用に耐えうるように、これらを実現する技術を確認するための研究開発を行った。

【同時増幅マルチバンド高効率増幅器】(本城・石川研究室)

当部門では、基本波を力率最適化して高調波をリアクティブ終端する高効率電力増幅器構成法を提案し(米国特許 US9257948B2)、2GHz 帯で出力 100W、付加電力効率 79%の GaNHEMT 増幅器を実現するなど、その効果をマイクロ波帯で実証してきている。今年度は 5G システムへの応用を目指して、高効率動作を保ちつつ相互変調および混変調の抑制が可能なマルチバンド同時増幅回路構成(図 2.2.1)を提案した。単体増幅器に複数信号を同時に入力すると、波の合成によりピーク値が信号数分だけ増加するため、トランジスタゲート幅を大きくして飽和出力を上げる必要があり、また、波形の変形による効率低下が生じる。さらに、トランジスタの非線形特性による相互変調・混変調で多数のスプリアス成分が生じる。そこで、周波数毎に高効率増幅器を作成し、その際、基本波入出力整合回路に、その周波数以外の信号を除去する機能を埋め込み、各増幅器を並列合成する。このとき、各増幅器は各々の動作周波数で独立に動作することで高効率動作を保ち、かつ周波数間の干渉(相互変調・混変調)が抑制できる。また、高効率増幅のための高調波処理回路は高調波フィルタとしても動作しているので、これも干渉抑制に寄与する。加えて、各増幅器には各々の動作周波数の信号しか入力されないため、複数信号を入力する場合と比較して、電力ピークが電圧ピークの2乗に比例することから、トータルのトランジスタゲート幅を減らすことが可能となる。予備試作として、4.5/8.5 GHz 帯デュアルバンド動作を想定した不要帯域除去回路を設計・試作し(図 2.2.2)、透過損失評価値は、4.5 GHz で 0.32 dB、8.5 GHz で 0.45 dB と低損失の値が得られた。

また、各帯域の単体増幅器の試作・評価も進めており(図 2.2.2)、予備評価では、4.5 GHz で出力 5.75 W/最大付加電力効率 67.7%、8.5 GHz で出力 4.79 W/最大付加電力効率 51.3%が得られている。

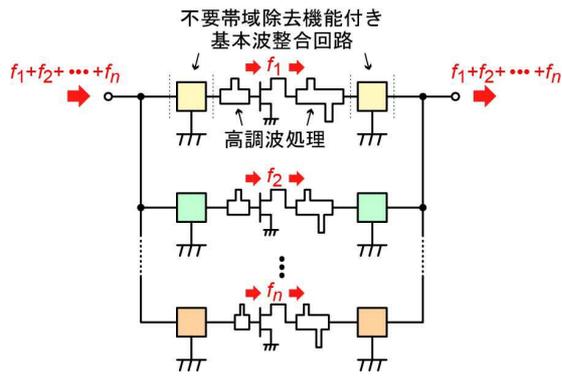
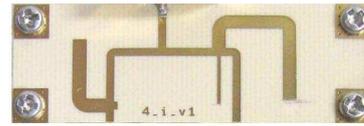
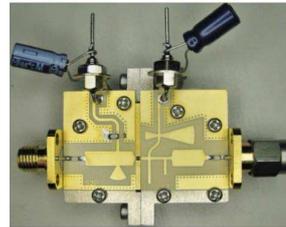


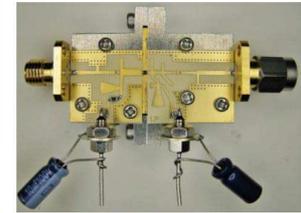
図 2.2.1 マルチバンド増幅回路構成



不要帯域除去回路



4.5 GHz 帯 GaN HEMT 増幅器



8.5 GHz 帯 GaN HEMT 増幅器

図 2.2.2 試作した各種回路

[リコンフィギュラブルバンドパスフィルタ] (山尾研究室)

複数帯域同時運用では無線機の非線形による劣化の発生が複雑になり、アナログ回路の非線形による歪の発生周波数が他の同時使用帯域の近隣となる場合があり、従来の全帯域通過型のバンドパスフィルタ (BPF) では対処しきれない場合がある。このため、よりきめ細かに通過帯域を設定する必要があるが、その場合、多数の BPF を用意して RF スイッチにより切替えることは回路規模が増加して非効率であり、かつ損失が増える。かつ。そこで複数帯域を 1 個の BPF で柔軟に変えられるリコンフィギュラブル BPF が検討されている。

今年度は低 SHF 帯の複数バンドをカバーするリコンフィギュラブルフィルタの共振器として小型化と低損失化に有利な $\lambda/4$ 伝送線路共振器を用い、入出力結合および段間結合には中心周波数可変時の帯域幅変化が少ないインダクタンス結合を用いる回路構成法を用いて、中心周波数 3.5GHz~5GHz、通過帯域幅~550MHz として回路設計を行い、高誘電率プリント基板上的マイクロストリップ線路共振器による回路試作を実施し、測定評価した (図 2.2.3~2.2.6)。測定結果から、中心周波数、帯域幅、挿入損失の周波数切替の傾向は設計にほぼ近い結果が得られ、挿入損失は 1.0~2.1 dB が得られた。また高 SHF 帯フィルタについては分布定数結合回路について基本検討と予備試作を行い、次年度以降の試作に備えた。

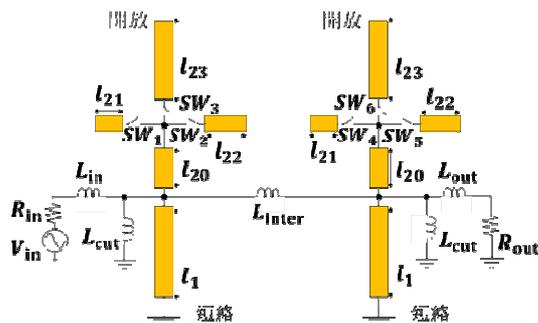


図 2.2.3 低 SHF 帯リコンフィギュラブル BPF

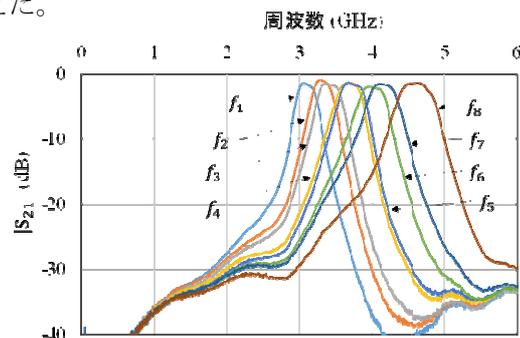


図 2.2.5 試作 BPF の通過特性



図 2.2.4 試作 BPF

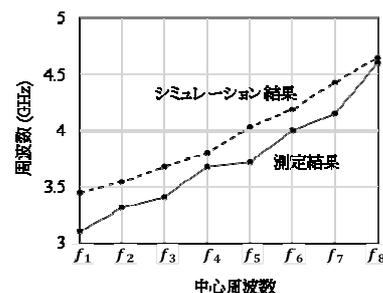


図 2.2.6 試作 BPF の中心周波数

[広帯域・高精度マルチバンド非線形補償技術] (山尾研究室)

マルチバンド・マルチアクセスでは無線回路の非線形によるひずみの発生が複雑になり、これを高精度に補償する非線形補償回路の構成も複雑化する。代表的な非線形補償回路であるデジタルプリディストーション (DPD) 回路でマルチバンド対応するには、フィードバック回路に従来は帯域数分の IF 帯域 A-D 変換器が必要であり、回路規模が増え、コスト増加要因であった。

そこで、単一の A-D 変換器によって複数帯域の信号を一括してフィードバックできる、スペクトル折返しフィードバック (Spectra-Folding Feedback; SFFB-) DPD を提案した。この方法は、フィードバック系は線形系であることに着目し、複数帯域の信号を多段ダウンコンバータで一つの間中周波数 (IF) 帯域に多重化してフィードバックし、デジタル信号処理によって多重化された信号を分離する。2 帯域同時補償時の特性をシミュレーションと実験によって従来の帯域毎に A-D 変換器を用いる構成での結果と比べて遜色無いことを確認した。

すでに当研究室で技術を確認した、スペクトル外挿帯域フィードバック (Spectral Extrapolation Narrowband Feedback; SENF-) DPD による 300MHz 以上の補償帯域幅と、この技術を組み合わせることで、UHF 帯から SHF 帯にわたる 5G の広い複数帯域をカバーする非線形補償が可能になることが期待される。

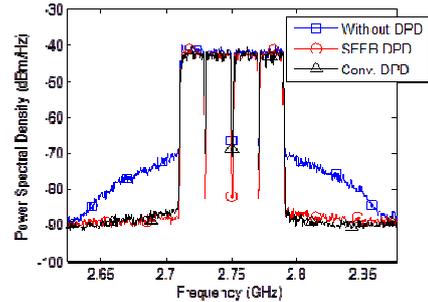
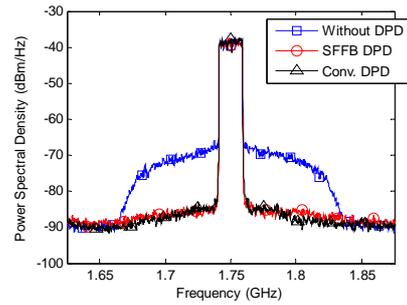
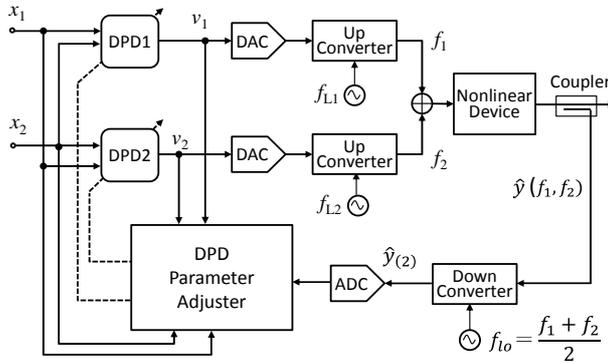


図 2.2.7 SFFB-DPD の構成とデュアルバンド非線形補償の実験結果 (1.75GHz/1CC+2.75GHz/4CC)

(B) 双方向無線電力伝送基盤技術の研究開発 (本城・石川研究室)

無線電力伝送を行うためには高効率 DC-RF 変換および高効率 RF-DC 変換を行うデバイスが必要であり、各々高効率増幅器および高効率整流器が使用される。さらに一つのデバイスで両動作が実現できれば双方向動作が可能となる。

時間反転双対原理に基づくマイクロ波高効率増幅動作および整流動作の双対性から、高効率増幅器を実現した後、トランジスタゲート側のインピーダンス終端条件を切替えることのみで増幅動作と整流動作とを切替えることが可能となる。そこで、トランジスタインピーダンス切替回路を内蔵した 5.4 GHz 帯 GaN HEMT 増幅・整流切替スマートモジュールを世界に先駆けて実現し (図 2.2.8)、5.36 GHz において、増幅動作モード時に最大 DC-RF 変換効率 76%、そして、整流動作モード時に最大 RF-DC 変換効率 66%を実現した。このスマートモジュールを複数用意することにより、無線電力伝送、情報伝送、

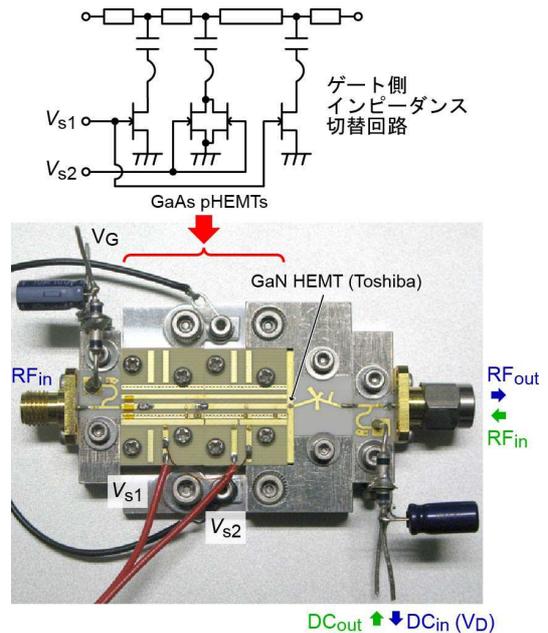


図 2.2.8 5.4 GHz 帯増幅・整流切替スマートモジュール

センシングなど3機能を同時に実現することができる。

【次世代システム向け超広帯域アナログ RoF 技術の確立】（松浦研究室）

小送信電力アクセスポイントへの光給電技術については、これまでに高強度の光給電が可能なダブルクラッド光ファイバ（DCF）を用いた光給電技術を実現しているが、給電光の高強度化およびパワー給電効率の高効率化には未だ改善の余地があったので、この改善を行った。具体的には、パワー給電系で最も大きな損失要因になっている信号光と給電光を分波するための分波器を改造し、これまでの系と比較して、2倍以上の給電光を取り出せる伝送系を実現した。これにより、最大で60Wの給電光入力下で、44.5%のパワー伝送効率を達成し、アクセスポイントに10Wを超える電気電力を供給可能な光給電技術を世界で初めて実現することに成功した。

【電磁界軌道角運動量の固有モードを用いたMIMO通信用アンテナの基礎検討】（本城研究室）

軌道角運動量(OAM)の直交性を通信に応用すると、周波数および空間の制約を受けずに信号の多重化を行うことができ、電波資源の無限拡大が可能となり近年注目を集めている。今年度我々は、電磁界角運動量が直交した固有モードを送信モードとするMIMO通信用アンテナの基礎検討を行った。ここでは、角運動量固有モードをドミナントモードとして送受信するアンテナを用いて、固有値（磁気量子数）の異なる電磁界を送受信するアンテナを複数配置して直交した電磁波を送信し、回転放物面鏡で収束させることで遠距離まで空間分布を保持し、受信点で再度パラボロイドを用い送信時と方位のみが反転した波数ベクトルで記述される電磁界を作り出し受信することを想定した。まず、固有モードを送信するアンテナの電流分布、放射電磁界の理論及びシミュレーション解析を行った。放射電磁界はアンテナ球内及び球外の電磁界を固有関数で展開し、グリーン関数を用いてその展開係数を求められる。電磁界の角運動量固有モードに関する占有比は電流のモードと一意の関係にあり、アンテナを最適化することで任意の固有値で他モードは-16dB以下のほぼ単独モードの放射が可能であることを確認した。(図 2.2.9)は固有値3に設計したアンテナの電流モードの占有率を示したもので、隣接する固有値2及び4の占有率が高いが、-25dB以下であり、この場合電磁界も磁気量子数3のモードがその比率で支配的となる。またこの放射電磁界の放物面鏡による変換後の電磁界分布を解析的に導出した。試作確認として磁気量子数が1~4の5GHz帯4素子アレイアンテナの試作を完了し、今後評価する。

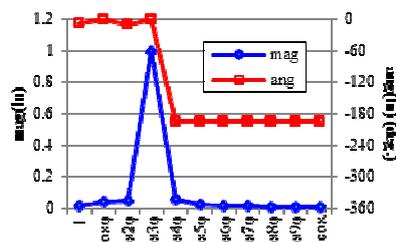


図 2.2.9 固有値3のアンテナの電流モード占有比

2.2.4 外部資金獲得状況

【科研費研究テーマおよび担当教員】

1. 基盤研究B「アレイ化カスコード線形ドハティ増幅器」 本城

【受託研究テーマおよび担当教員】

1. 総務省委託研究（電波資源開発）「第5世代移動通信システム実現に向けた研究開発～高校密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術の研究開発～、技術課題ウ-2 マルチバンドアクセス無線構成技術」 山尾、本城、石川、高山、斉藤

【共同研究テーマおよび担当教員】

1. スイッチング電源装置のEMIに関する研究
本城、石川、斉藤
2. 次世代無線システムに関する研究
山尾、本城
3. 増幅器の広帯域線形化技術に関する研究
山尾

2.3 最先端ワイヤレスシステム創成部門

2.3.1 本研究部門の目的

持続的なワイヤレスの発展による社会への貢献を目指した最先端ワイヤレスシステムおよびネットワークに関する研究開発を実施

2.3.2 教員配置と担当領域

藤井威生	教授	部門長、将来 NW、コグニティブ無線、自律分散 NW、ベースバンド無線
大木英司	教授	将来 NW、自律分散 NW
唐沢好男	教授	ベースバンド無線
山尾 泰	教授	将来 NW、自律分散 NW、ベースバンド無線
石橋功至	准教授	将来 NW、自律分散 NW
松浦基晴	准教授	将来 NW

2.3.3 平成 27 年度の主要研究成果

【電波環境データベース連携型端末間電波伝搬特性予測】（藤井研究室）

効率的な周波数共用の実現のためには端末間の所望信号電力や干渉信号電力の正確な予測が不可欠であり、電波伝搬路予測が重要な基盤技術となる。本研究では、端末間の電波伝搬特性を周囲に存在する多数の端末間で行われる通信時の伝搬状態を蓄積することで予測する手法の検討を行った。ここでは、(図 2.3-1)に示すように、複数の通信結果を外部サーバに蓄積し、その結果に基づいて任意の送受信位置での電波伝搬路特性を予測する。異なる複数の伝搬路が近傍である場合に比較的近い値を示す電波伝搬特性の空間相関に着目し、最尤推定およびクリギング法を用いることで距離減衰による長区間中央値、およびシャドウイングによる短区間中央値を推定する手法を提案した。提案手法の推定精度の数値例を図 2.3-2 に示す。本図は、送受信位置がランダムな複数の P2P リンクが通信結果を外部サーバに報告した際の、ある送受信位置での電波伝搬特性の推定精度を表わす。評価結果より、少ないデータ数であっても従来の距離減衰モデルに基づく手法と比較して精度よく推定でき、データ数の増加に従ってその精度が向上することを明らかにした。

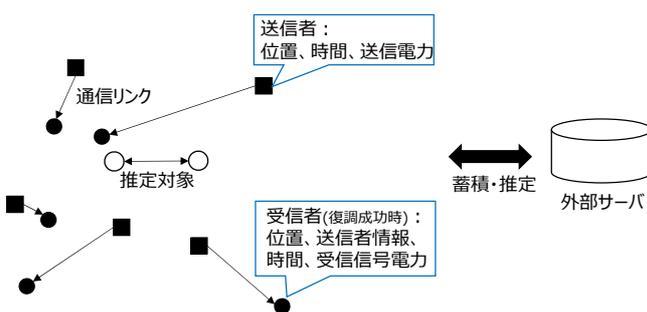


図 2.3-1 データベース連携型電波伝搬予測の概要

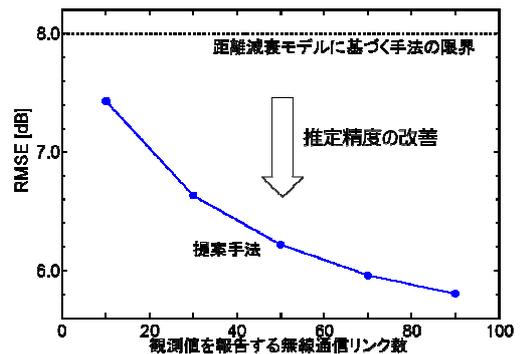


図 2.3-2 提案手法の推定精度特性

【環境認知型超高効率無線ネットワークにおける無線環境データベース】（藤井研究室）

周囲の無線環境把握し、無線ネットワークの高効率な運用を目的として、無線ネットワーク端末のトポロジを把握する無線環境データベース構築に関する検討を行った。本データベースは物理レイヤの情報である受信電力など電波そのものの情報に加え、MAC レイヤの情報として相互のトポロジの把握につながる情報を蓄積する。ここでは、パケットキャプチャを通して MAC レイヤの情報を蓄積することでネットワークトポロジが明確になり、キャリアセンスが相互に有効に働かない隠れ端末の状況をあらかじめ把握することが可能となる。本研究の有効性を確認するため実際に端末

を配置した実験を行った。図 2.3-3 に示すような実験環境を準備し、パケット観測 PC に無線 LAN ドングルを備えることで、観測したパケット情報を逐次的に情報収集 PC にアップロードする。情報収集 PC は複数の観測 PC からアップロードされた情報をデータベースに登録し統計化する。周辺端末の占有率を計算後、チャンネルごとに占有率を算出する。その際に複数のパケット観測 PC から隠れ端末になっているかを考慮し、占有率を分類する。実験では、3 チャンネルを準備し、チャンネル 1 は見通し端末からの負荷、チャンネル 11 は隠れ端末からの負荷がかけられている。その際のパケットロス率の測定結果を図 2.3-4 に示す。見通し端末からの負荷以上に隠れ端末からの負荷によりパケットロスが多く発生していることが確認できる。このような環境認識結果を元にチャンネル選択などの無線パラメータの制御を行うことで、通信性能の向上の実現に寄与できる。

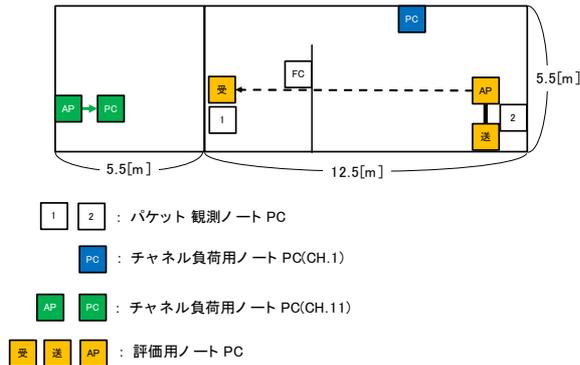


図2.3-3 端末配置

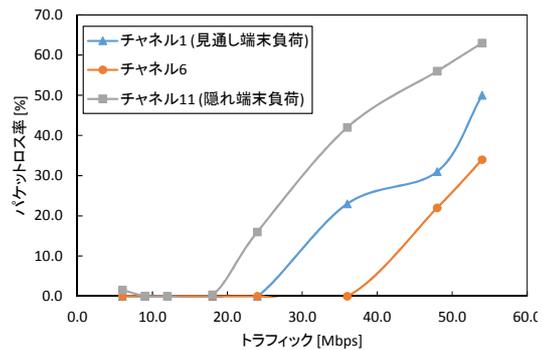


図2.3-4 チャンネルごとのパケットロス率

[高信頼・省電力ネットワークのための最適化モデル] (大木研究室)

本研究は、不確かなトラフィック需要に対応し、低消費電力かつ高信頼なネットワークを実現するために、リンクを通過するトラフィック量に上限値を有するモデル (HLT: hose model with bound of link traffic) を導入する。このモデルをグリーン HLT と呼ぶ。これまでの低消費電力における研究は、トラフィック需要行列が既知であると考えられていた。しかし、ネットワーク事業者がトラフィック需要行列を正確に予測することは困難である。グリーン HLT は、正確なトラフィック需要の情報を必要としない。トラフィック需要は、各ノードでの入力と出力の全トラフィック量とリンクを通過するトラフィック量によって規定される。本研究は、リンクを通過するトラフィックを削減し、一部のリンクをスリープモードとして動作させて、消費電力を最小化する最適化問題を、混合整数線形計画問題 (MILP: mixed integer linear programming problem) として定式化した。さらに、MILP 問題の計算時間の制限を緩和するために、発見的手法を開発した。性能評価の結果、グリーン HLT は、不確かなトラフィック需要に対して耐久性があり、トラフィック需要の情報が要求されるモデルと比較して、同等の低消費電力の性能を実現できることを示した。また、ネットワーク故障も考慮したグリーン HLL を開発した。

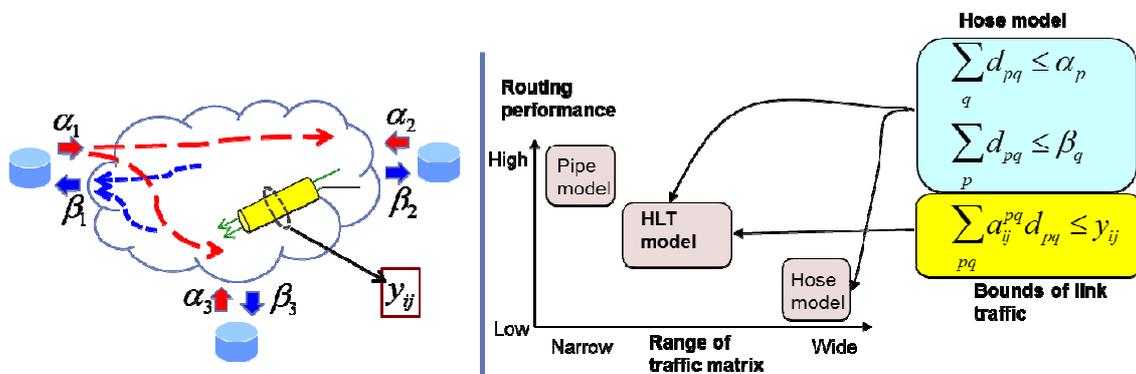


図 2.3-5 開発したグリーン HLL モデル

【環境適応型ベースバンド無線】（唐沢研究室）

電波領域にある高周波数帯信号を、ベースバンド信号処理で一括生成・復調する伝送方式をベースバンド無線と呼び、科研費基盤(A)研究として実施している。今年度は、1次ユーザが存在する環境で、そのすべての空き周波数帯（ホワイトスペース群）を一括に利用する2次ユーザ（SU）システムを対象に、周波数領域差動符号化を用いたスペクトル拡散により、超低電力密度で超広帯域の信号を扱う環境適応型ベースバンド無線の研究を行った。(図 2.3-6)はそのシステムイメージである。ベースバンド OFDM 信号生成に基づき、帯域内の周波数選択性フェージングに耐性を有するよう隣接サブキャリア間での差動符号化によるスペクトル拡散を行い、その周波数ダイバーシチ効果によって拡散利得以上の低電力密度化を目指した。(図 2.3-7)は、拡散利得 $G_p=1000$ での BER の CNR 特性を示している。図より、BER の値が小さいところ（図の $BER=10^{-4}$ ）で、拡散利得の 30dB を 20dB 近く上回る利得が得られている。この周波数ダイバーシチ効果は拡散帯域幅と遅延スプレッドの関係に依存する。このような、伝送方式提案、伝送特性評価、さらには、具体的な伝搬環境下での最適な信号設計に関する研究を行った（現在、学術論文とりまとめ中）。欠点は、拡散利得分の情報伝送レートの低下が生じるが、ベースバンド無線の特徴を活かして、高周波数帯までの帯域を活用すれば、この問題が克服できる。

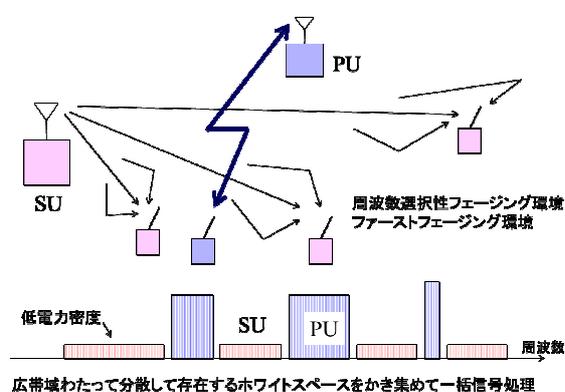


図2.3-6 広帯域ホワイトスペース群一括利用低電力密度ベースバンド無線（SUシステム応用）

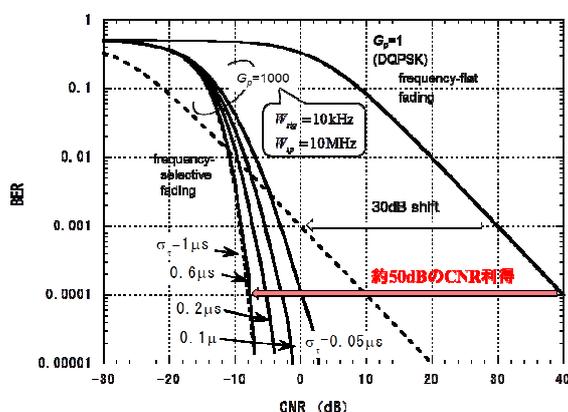


図2.3-7 $G_p=1000$ でのBERのCNR特性（拡散得以上の利得増加が得られている）

【マルチホップアドホックネットワークでのフロー内干渉キャンセル技術】（山尾研究室）

CSMA/CA 自律分散無線ネットワークの性能は隠れ端末問題によって低下する。特にマルチホップ伝送を用いるアドホックネットワークでは、経路内を連続して伝送されるパケット間での相互干渉が隠れ端末問題によって引き起こされ、伝送成功率を著しく低下させるとともに、スループットを低下させる。この問題を解決するため、高負荷でかつフェージング環境下においても高信頼・高効率にマルチホップ伝送を行えるフロー内干渉キャンセリング（Intra-Flow Interference Canceling ; IF-IC）伝送法を提案した。本提案では希望信号と干渉信号のトレーニングシーケンスが重ならず受信されるよう2種類のフレームを用いてマルチホップ伝送を行う。受信ノードは適応信号処理でこの2つのチャネルの推定を行い、先行パケットの既知の受信情報を用いて干渉信号をベクトル減算する。理論解析モデルおよびシミュレータを作って提案法の評価を行った結果、提案法によってネットワークのスループットを通常の CSMA/CA ネットワークの数倍に向上させることができることを明らかにしている。またアンテナ2本を使用した最大比合成ダイバーシチを干渉キャンセル後に適用した場合、スループットがさらに向上し、フレームフォーマットとパケットサイズで決まる理論値に近いことを明らかにしている。

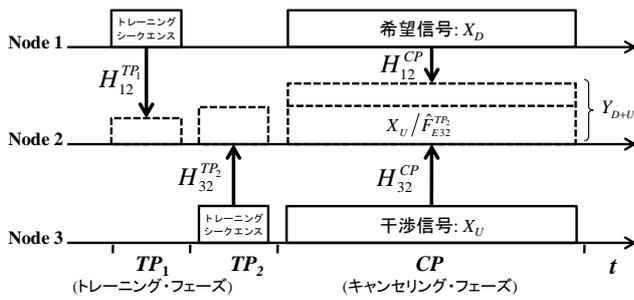


図 2.3-8 IF-IC のためのフレームフォーマット

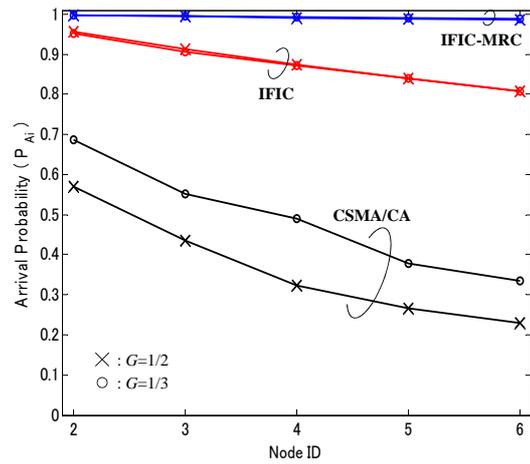


図 2.3-9 マルチホップ伝送でのパケット到達率

[複数ベースステーション協調を用いた高効率フレームレス ALOHA の提案と解析] (石橋功至研究室)

モノのインターネット (IoT: Internet of Things) に代表される大規模な多元接続通信が注目を集めている。超多数の送信端末を含む大規模多元接続においては、時分割多重接続 (TDMA: Time Division Multiple Access) のような通信資源割当方式は通信資源割当のために莫大なオーバーヘッドが必要になってしまうという問題がある。これに対し ALOHA に代表されるランダムアクセス方式では、各端末は自律的に送信を行うため、超多数の送信端末が存在する場合でもオーバーヘッドは比較的小さくて済むという利点があり、大規模多元接続に適していると考えられる。本研究では、近年提案されているランダムアクセス方式の一つであるフレームレス ALOHA に着目し、複数のベースステーション協調を用いた高効率フレームレス ALOHA を提案した。フレームレス ALOHA は、事前に与えられる送信確率にしたがって各端末がパケットを自律的に送信し、ベースステーションが逐次干渉除去を用いることでパケット復号する方式である。本提案手法では、複数のベースステーションが復号に成功したパケットを互いに交換することで、より効率的に復調を行うことが可能となる。数値例を(図 2.3-10)に示す。複数ベースステーション協調を用いることで達成可能な平均スループットを大きく向上できることを、計算機シミュレーション及び理論解析から示した。

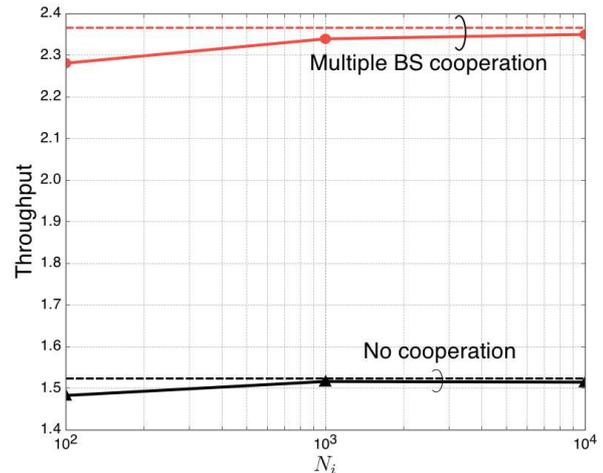


図 2.3-10 複数ベースステーション協調を用いたフレームレス ALOHA のスループット特性。横軸は送信端末数であり、縦軸はスループットを示す。実線は計算機シミュレーション、破線は理論値。

[中規模 MIMO のための QR 分解ガウス確率伝播復調法に関する研究] (石橋功至研究室)

第 5 世代移動体通信 (5G) では、数十本以上のアンテナを用いた大規模 MIMO (Multi-Input Multi-Output) システムが検討されており、高い注目を集めている。MIMO 復調では信号を低計算量で精度よく検出することが重要であり、最適な検出法である最尤検出 (MLD: Maximum Likelihood

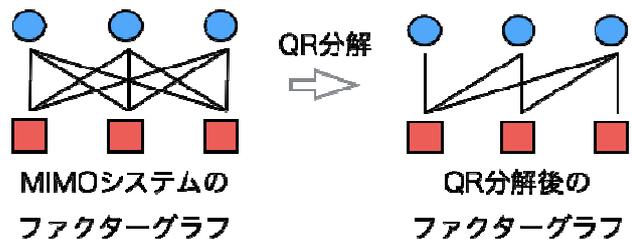


図 2.3-11 QR 分解によるグラフ構造の変化

Detection)法では、送信ストリーム数に対して指数関数時間の計算量が必要となってしまいます。低演算量で優れた復調特性を持つ手法として、ガウス確率伝播(GA-BP: Gaussian Belief Propagation)法が知られている。GA-BP 法では、着目信号以外をガウス雑音と近似することにより、計算量の低減を可能としている。しかし GA-BP 法では、実用上重要な 10 本程度のアンテナ数の場合には、ガウス近似が成立せず、特性が著しく劣化してしまう。そこで我々は(図 2.3-11)に示すように Sorted-QR 分解を用いることでグラフの構造を変え、通信路行列を疎行列化した上で、順序付き GA-BP 復調を行う Sorted QR-GA-BP を提案した。(図 2.3-12)に、本提案手法を含む MIMO 復調法のビット誤り率(BER: Bit Error Rate) 特性を示す。同図より、提案手法が従来の GA-BP よりも高い復調性能を有していることが確認できる。また BER= 10^{-4} において、提案方式が、従来の GA-BP と同程度の計算量ながら最大対数近似を用いた確率伝播法(MLA-BP)との差が 2dB 程度に抑えられていることがわかる。

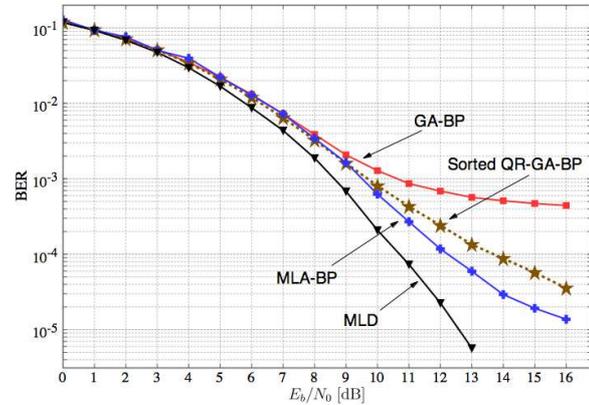


図 2.3-12 Sorted QR-GA-BP の BER 特性。

2.3.4 外部資金獲得状況

【科研費研究テーマおよび担当教員】

1. 基盤研究 A 「環境適応型ベースバンド無線の研究」
唐沢、山尾、藤井
2. 基盤研究 A 「大規模アナログ結合を有する 2 部グラフ理論の確立」
石橋 (功)、(研究代表者外部機関)
3. 基盤研究 B 「クラウドセンシングによる自己組織型電波伝搬モデル構築に関する研究」
藤井
4. 基盤研究 B 「嗜好解析に基づくトラヒック予測及び統合環境認知によるユーザセントリック無線通信」
藤井、(研究代表者外部機関)
5. 基盤研究 C 「予防的最適化アプローチによるネットワーク制御技術」
大木

【受託研究テーマおよび担当教員】

1. 総務省 SCOPE 委託研究 「環境認知型超高効率無線センサネットワークの研究開発」
藤井
2. 独立行政法人情報通信研究機構 「将来ネットワークの実現に向けた超大規模ネットワーク基盤技術に関する研究」
大木

【共同研究テーマおよび担当教員】

1. 周辺情報およびリソースを利用したネットワークの効率化
藤井

2.4 低電力ワイヤレス研究部門

2.4.1 本研究部門の目的

ワイヤレスシステムの超低電力動作を可能とする革新的デバイス技術開発とアプリケーションへの適用

2.4.2 教員配置と担当領域

石橋孝一郎 教授	部門長、低電力集積エレクトロニクス
石橋功至 准教授	ネットワークシステムと理論、スマートメータ
山尾泰 教授	スマートメータ、省電力ネットワーク
藤井威生 教授	スマートメータ
松浦基晴 准教授	光給電技術
内山邦夫 客員教授	アプリケーションシステム

2.4.3 平成27年度の主要研究成果

- (A) 極低電力 LSI 設計技術、エネルギーハーベスティング技術、ウエイクアップモジュール技術、無線給電技術等の低電力ワイヤレスを実現するデバイス技術の開発
- (B) 低電力ネットワークシステム技術の開発と理論体系の確立
- (C) センサネットワークシステムやバイオエレクトロニクス等の低電力ワイヤレス技術を用いた新しいアプリケーションシステムの開発
- (D) アンテナ無線基地局への光ファイバ電力伝送技術の開発：光ファイバ無線（RoF）伝送において、アンテナ無線基地局に従来の電源設備を配備せず、将来のピコ・フェムトセル基地局に必要な全ての電力を光ファイバ電力伝送によって賄う、光電力伝送技術の開発を行う。

[ベトナムのエビ養殖場へのセンサネットワークの適用]（石橋孝一郎研究室）

センサネットワークのアプリケーションとして、近年大量死が問題になっているベトナムのエビ養殖場の水質モニターを行った。ベトナム、ホーチミン工科大学及びNTTと協業し、Proflex による RF モジュールに 6 LowPAN のスタックを実装して、溶存酸素濃度 (DO)、PH、水温の 24 時間監視を可能にした。

(図 2.4.1) に示すように PH と DO を約 1 ヶ月間連続して測定することが可能になった。センサネットワークを活用することによる効果として、エビに与える餌や、化学物質、攪拌機に用いる電気代を節約し、エビの育成コストを低減できることを示した。(図 2.4.2)

残る大きな課題として、システムのメンテナンス性向上と低コスト化、エビが死にいたるしきい値の検出がある。

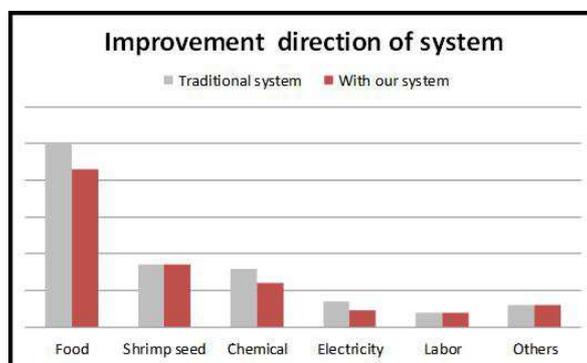
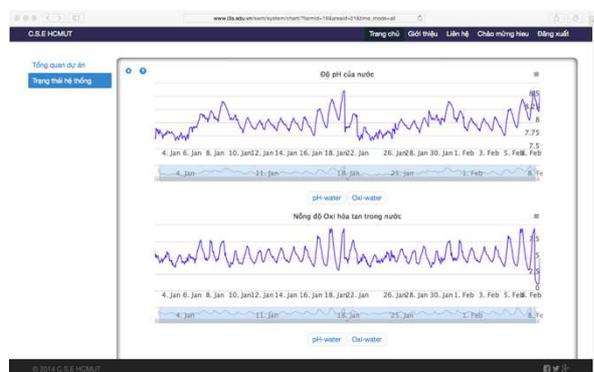


図 2.4.1 センサネットワークによる PH と DO データ 図 2.4.2 センサネットワークによるコスト低減効果

[Power Beat による低コスト電力センサの開発] (石橋孝一郎研究室)

電気機器に流れる電流を電磁誘導で取り出して、RFモジュールから送信する電力とする方式の低コスト電力センサを開発した。部品代は3,000円以下で、市販の電力センサの数分の1である。HEMSやBEMSへの応用が期待できる。

関連発表: S. Ishigaki and K. Ishibashi, "Power Beat: A Low-cost and Energy Harvesting Wireless Electric Power Sensing Scheme for BEMS," IEEE ICBEST, Singapore, Aug. 2016.

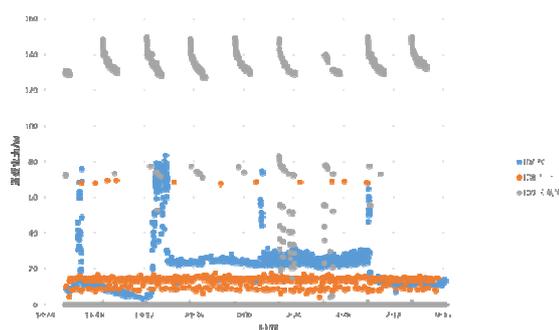


図 2.4.3 複数の電力センサによる電力測定

[大規模エネルギーハーベスティングネットワークにおける中継端末選択法に関する研究] (石橋功至研究室)

膨大な数のデバイスが無線通信路を介して相互に制御を行うモノのインターネット (IoT: Internet of Things) 時代の到来により、物流、交通、医療、農業をはじめとした社会インフラにおいてより多くの情報を効率的に収集可能となることが期待されている。これを実現するためには、アプリケーションの利用範囲を拡大するための無線通信品質の向上、またバッテリー駆動のデバイスの長寿命化を達成するための消費エネルギーの削減が必須である。従来、中継端末が多数存在するような大規模エネルギーハーベスティングネットワークにおいて、瞬時のチャネル状態を考慮して宛先端末における受信信号電力対雑音電力比 (SNR: Signal-to-Noise power Ratio) が最大となるような中継端末を動的に選択して協調を行う、日和見中継と呼ばれる中継端末選択手法が提案されている。しかしながら中継端末側で受信電力あるいは端末間距離を知る必要があり、中継端末側の負荷が増加してしまうという問題があった。そこで本研究では、中継端末が宛先端末から何番目に位置しているかという情報のみを用いた簡潔な中継端末選択法を提案し、そのアウトエージ確率を理論的に解析した。

図 2.4.4 に示すように、提案手法のアウトエージ確率は直接通信と比較して 10^{-2} の領域で約 20dB の利得があることが分かる。また何番目に位置しているかという情報のみを用いることによってチャネル分布を用いた端末選択手法と同等のアウトエージ確率を示すことが分かる。提案手法の特性は瞬時チャネル情報を用いた特性と比べて劣化しているが、中継端末側の負荷が大きく軽減されている。

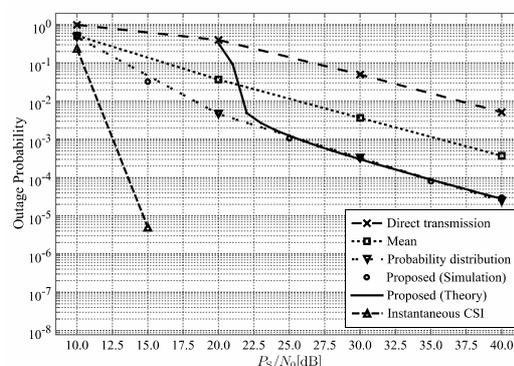


図 2.4.4 提案手法のアウトエージ確率特性。比較のため、中継・宛先端末間のチャネル利得の瞬時値、平均値、確率分布を用いた中継端末選択法のアウトエージ確率特性も併せて示している。

[アンテナ無線基地局への光ファイバ電力伝送の開発] (松浦研究室)

アンテナ無線基地局へ他の外部電源を要せず、光ファイバ給電のみで駆動な給電技術として、従来の光ファイバと比較して、100倍程度の給電パワーの利用が見込めるダブルクラッド光ファイバを用いた光給電技術の研究開発をこれまで取り組んでいる。今年度は、給電光パワーと給電効率の向上を目的として、アンテナ基地局に配備する光信号と給電光を分波する分波器の改良を行った。図 2.4.5 に示すように、従来型の 2 つマルチモードファイバ (MMF output) だと、給電光を取り出せる面積が小さいため、送電可能な給電光パワーと伝送効率 (PTE) も大きな制限を受けるため、マルチモードファイバの高強度耐性も維持しつつ、効率の良い給電光の取り出しが可能な 6 ポート

構成への改造を行った。これにより、基地局へ最大 26 W を超える光パワーの送電を実現することに成功し、電気エネルギーにおいても初めて 10 W を超える送電が可能である見通しを得た。

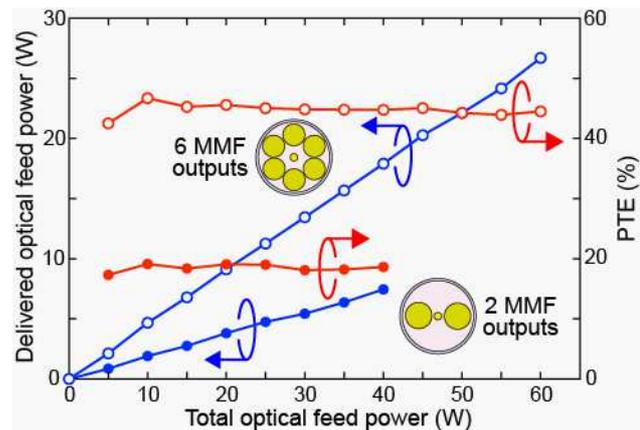


図 2.4.5: 給電光パワーに対する送電電力と給電光パワー伝送効率 (PTE) に対する従来型 (2 MMF) と改良型 (6 MMF) の比較。

[スマートメータにおける屋内電波伝搬のシミュレーション] (山尾研究室)

近年、ガスや電気等の生活インフラに使用されるスマートメータについての研究開発が広く行われている。スマートメータは電池動作での長期間運用が前提なので、送信電力は小さく、その電力を最大限活かす設計・運用が必要である。このためスマートメータシステムを広く展開するには、スマートメータの設置される様々な形態での電波伝搬環境を把握した上でのシステム設計が必要である。しかし、実際にスマートメータが設置されている集合住宅内は建物構造が複雑であり、伝搬損失値を事前に予測することが難しい。本研究では集合住宅内環境において、パイプシャフト (PS) に設置されたスマートメータ間の電波伝搬シミュレーション解析を行う上で、より効率よく精度の高い解析結果を得ることを目的としてレイトレース法・FDTD 法の両手法を併用することを検討した。レイトレース法単独使用、FDTD 法単独使用をした場合と、今回検討した併用法について、それぞれ隣のパイプシャフトに設置されたスマートメータへの電波伝搬シミュレーション解析を行い、各パラメータとパス経路、受信電力による解析結果の比較検討をした。FDTD 法単独の結果とレイトレース法単独の解析結果には受信電力で 20dB 前後の差がみられたが、併用法では FDTD 法単独との差は 5dB となり、パイプシャフトのような狭空間を含む解析において FDTD 法に近い結果をより効率的に得られることが分かった。

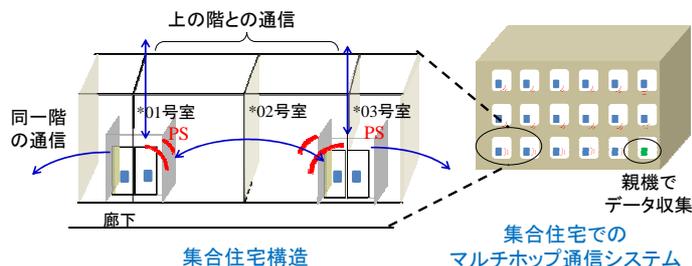


図 2.4.6 集合住宅でのスマートメータシステム

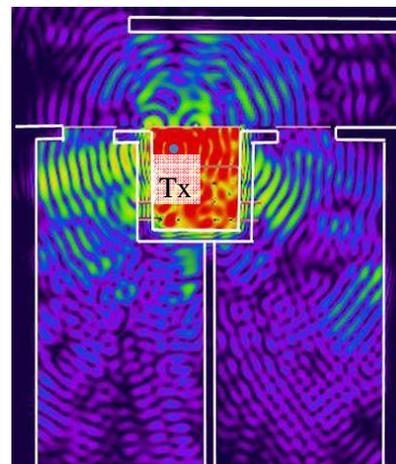


図 2.4.7 パイプシャフトに設置された送信機からの放射の解析結果

[周囲の隠れ端末数に適応したウェイクアップタイミングの研究] (藤井研究室)

無線機を受信機主導で間欠的に動作させることによる消費電力削減を特徴としたガスメータリングシステム U-Bus Air が提案されている。U-Bus Air は (図 2.4.8) に示すように、各端末が RNO (Request NO) と呼ばれる送信受け入れ信号を間欠的に送信する。一方、データパケットを保持している端末は RNO を受信した際に SREQ (Send Request) と呼ばれる送信要求信号を送信することで、送受信間のデータパケットの転送を可能にしている。しかし、U-Bus Air では信号同士が衝突することにより、データパケットの収集効率が低下する課題があった。そこで、本研究では適切な間欠

周期の設計を自律分散的に設定する方法を検討している。ここでは、シンクノードに各端末のトポロジ情報を収集し、それらの情報を元に各端末の隠れ端末数を把握し、トータル衝突確率を最小とするような間欠周期を算出して各端末にフィードバックさせる手法を提案している。(図 2.4.9) に提案プロトコルのパケット伝送成功率を計算機シミュレーションにより示している。シミュレーションより、2 段 10 端末のとき、端末数増加による特性の劣化を軽減させることができ、本手法の有効性が確認できた。

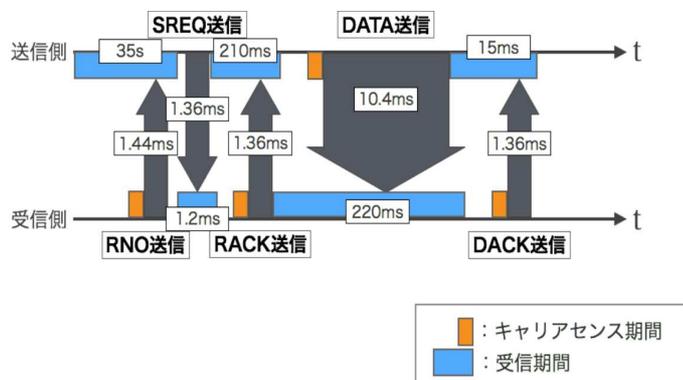


図 2.4.8 U-Bus Air の MAC プロトコル
図はデータ転送の一連の流れを示す。

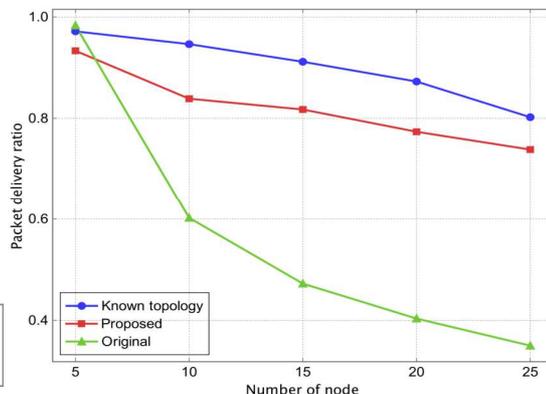


図 2.4.9 提案手法と間欠周期 5 秒としたプロトコルのパケット伝送成功率の比較

2.4.4 外部資金獲得状況

【科研費研究テーマおよび担当教員】

1. 基盤研究 C 「待機モードのゼロ消費電力を実現する MEMS ウェイクアップモジュールの研究」
石橋 (孝)
2. 挑戦的萌芽研究 「量子ドット半導体光増幅器を用いた超高速光 A/D 変換の研究」
松浦

【受託研究テーマおよび担当教員】

1. Asia Pacific Telecommunity (APT) J2 Project (国際受託研究) 「Heterogeneous Wireless Sensor Network Monitoring Water Condition for Strengthening Aquaculture Industry in Vietnam」
石橋 (孝)

【共同研究テーマおよび担当教員】

1. エネルギーハーベスト電源とこれを活用した低電力データセントリックセンサネットワークシステムの研究
石橋 (孝)、石橋 (功)、範
2. 多段中継無線の特性評価
石橋 (功)、山尾、藤井