

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 03401
研究開発課題名 Intelligent Reflecting Surface によるプロアクティブな無線空間制御と耐干渉型空間多重伝送技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

本研究開発では、基地局や端末から発せられる電波の伝搬路を制御する IRS (Intelligent Reflecting Surface) を用いたシステムの最適化によるプロアクティブな無線空間制御技術の確立及び干渉波の到来時間や伝搬路行列の確率的予測結果を用いて周波数利用効率を最大化する干渉抑圧・空間多重伝送技術を確立する。これにより B5G 時代の情報通信技術として要求される性能要件を満たしつつ、無線空間そのものを制御するという新たなアプローチによる対象空間における周波数利用効率の大幅な改善の実現を目的とする。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 5 年度 (3 年間)

(3) 受託者

国立大学法人東北大学<代表研究者>
株式会社国際電気通信基礎技術研究所

(4) 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 150 百万円 (令和 5 年度 50 百万円)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 IRS によるプロアクティブな無線空間制御システム最適化技術
研究開発項目 1-a) 低オーバーヘッドなプロアクティブ無線空間制御手法 (東北大学)
研究開発項目 1-b) IRS による無線空間制御のためのシステム設計最適化方式 (東北大学)
研究開発項目 2 確率的干渉到来予測を用いた干渉抑圧技術の研究開発
(株式会社国際電気通信基礎技術研究所)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	8	3
	外国出願	2	0
外部発表等	研究論文	4	2
	その他研究発表	31	10
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	1	1
	展示会	2	1
	受賞・表彰	4	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1 :

研究開発項目 1-a)

- ・最終年度までの研究成果として、コードブック構築によるチャネル推定オーバーヘッド削減手法(項目 1-a)、パイロット間隔の調整によるチャネル推定オーバーヘッドの削減(項目 1-i)、

IRS 分散配置型システムにおける選択的反射制御によるオーバーヘッド削減(項目 1-ウ)、自律型 IRS システムによるチャネル推定オーバーヘッドの削減(項目 1-エ)、2周波数対応 IRS を用いたビーム探査によるオーバーヘッド削減(項目 1-オ)を考案した。これらの考案手法に基づき制御システムの設計を行い、シミュレーションによる性能評価から最終目標である制御オーバーヘッドを 1/10 以下に低減可能であることを確認した。以上の検討に関して国際特許出願 1 件、査読付き国際学術論文掲載 2 件、査読付き国際学会発表論文 2 件、口頭発表論文 3 件、一般口頭発表 4 件、受賞 2 件の成果があった。

研究開発項目 1-b)

- 最終年度までの研究成果として、分散配置型システムにおける選択的反射制御によるオーバーヘッド削減(項目 1-ウ)、自律型 IRS システムによるチャネル推定オーバーヘッドの削減(項目 1-エ)、2周波数対応 IRS を用いたビーム探査によるオーバーヘッド削減(項目 1-オ)、IRS の複数通信事業者間共用(項目 1-カ)を考案した。項目 1-a との重複部分に関しては考案した手法が両項目に関係するためである。また Wireless Insite を用いたシミュレーションによる IRS 配置位置に対する通信性能の評価(項目 1-キ)、透明反射フィルムを用いた通信の性能評価実験(項目 1-ク)、反射方向制御可能な IRS を用いた反射特性測定実験(項目 1-ケ)を実施した。これらの考案手法や検証に基づき IRS システムの設計を行い、シミュレーションによる性能評価から面的周波数利用効率を 2 倍以上に改善可能である目途を確認した。最終目標は項目 2 と連携した統合検証において達成を確認した。以上の検討に関して国際特許出願 1 件、査読付き国際学術論文掲載 2 件、査読付き国際学会発表論文 1 件、口頭発表論文 5 件、一般口頭発表 4 件の成果があった。

研究開発項目 2 :

- MUSIC スペクトラムを用いた干渉到来検出手法ならびに PNN を用いたアイドル状態継続時間予測手法を考案し、干渉源が 16%程度の範囲のランダム性を持って概ね定期的にフレームを送信する状況を想定した場合、干渉波到来確率の平均予測誤差は目標性能に近い 15%を達成できることをシミュレーションにより確認した。加えて、バリデーションに基づくハイパーパラメータの決定、カーネル行列の共通化、チャープカーネルの活用などを行うガウス過程回帰に基づく伝搬路予測手法を考案した。実環境を想定した伝搬路の測定データを用いた性能評価を実施し、最終到達目標であった振幅レベルでの平均予測誤差 0.1 の達成を確認した。
- 干渉波の到来状況に対するチャネル容量を事前に計算し期待値が最大となるストリーム数を選択するランクアダプテーション方式を考案した。シミュレーションにより、干渉波到来確率に予測誤差を持つ場合であっても、理想的に干渉波が検出できる場合と比較して、目標性能以上となる 87%以上の周波数利用効率を達成できることを確認した。
- 確率的干渉到来情報を用いた MIMO 送受信重み制御手法について、各干渉到来状況に対するチャネル容量を事前に計算し期待値が最大となるストリーム数を選択するランクアダプテーション手法を新たに考案した。仲上-ライスフェージング伝搬路を仮定したシミュレーションにより、提案手法の有効性を確認した。また、提案手法において、ある干渉波到来確率が 20%以内の予測誤差を持つ場合であっても、理想的に検出できる場合に対して 92%の周波数利用効率が達成できることを確認した。
本検討に関して国内特許出願 1 件、査読付き収録論文発表 1 件、収録論文発表 1 件を実施した。
- 本研究開発にて開発した技術を無線 LAN に適用した場合の周波数利用効率改善効果を評価するために、ns-3 をベースラインシミュレータとし、研究開発項目 1 にて開発した IRS の実反射特性を反映した IEEE 802.11ay 無線 LAN に基づくシステムレベル評価系(PoC 評価系)の設計を完了した。
- IRS の適用シナリオ、ならびに研究開発項目 1 において検討されている 2 種類の IRS 運用形態(インフラ型 IRS および自律分散制御型 IRS)について、必要となる制御インターフ

エースの基本設計を行った。

- 以上の検討に関して国内特許出願 8 件（うち 1 件は研究開発項目 1 と共同出願）、査読付き国際学術論文掲載 2 件、査読付き国際学会発表論文 2 件、口頭発表論文 8 件、受賞 2 件の成果があった。また、査読付き国際学術論文投稿 1 件を終えており、研究開発期間終了後にも査読付き国際学術論文投稿 3 件を行う準備を進めている。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

① 成果の展開・普及の計画

本研究開発の研究成果の展開と普及については、下記のアプローチを想定している。

本研究開発で得られた成果は、IRS を実システムにおいて利用するために必要不可欠な知見を多く有する。これらの成果を展開・普及させていく対象としては大きく分けて 2 つ、無線 LAN システムと移動通信システムでの利用が挙げられる。必要となる具体的な展開・普及のための活動としては、継続した技術開発からの実用化に向けた製品検討と、これを対象システムで使われるものとするための標準化活動、並びに関連した特許取得がある。

実用化に向けた技術開発については、これまで試作機の開発を経つつ通信システムの向上を一定程度達成可能であることや、実用において重要となる制御オーバーヘッドを低減する方法などを確立し、着実な成果を達成した。しかし、これらの研究開発の過程において、実用化に向けて解決する必要がある様々な課題も明らかになった。例えば以下の通りである。

- 実環境での利用に耐える装置面での課題
 - デバイスコストの削減
 - 装置の薄型化
 - 低消費電力化・放熱対策
 - ユーザスケジューリングとの連携を可能にする低処理遅延化

装置面の課題克服に向けては実ユースケース、実無線通信システムにおける IRS に課せられる性能要求をより詳細に明確化すると共に、デバイス開発企業との間で IRS の開発に向けたパートナーシップを樹立し、さらなる実用化開発が必要である。そのため、本研究開発の研究実施協力者のみならず、広くパートナー企業を見つけるために、IRS の有用性を学術雑誌投稿や学会発表・展示会への出展などを通じたアピールを積極的に行う。

具体的には、特に、性能は IRS に比べると劣るものの安価に製造可能な静的反射板との使い分けの重要性が明らかになったことから、部分的な普及・展開の足がかりとしての静的反射板の利用についても検討する。製品開発や実際に製品を展開する立場の企業との連携については、現状既に代表機関である東北大の研究チームは、複数の開発企業やネットワークオペレータとの共同研究などを進めてきていることから、これらを基盤としつつその協力体制をより強固なものとしていく。その中で移動通信システムを対象とする 3GPP における標準化活動にも間接的に関わっていくことで、本研究開発の中で取得した特許の活用についても積極的に検討を進めていく。また国際標準化については B5G/6G 時代の主要無線通信システム（セルラー、無線 LAN など）への展開に向けて、各標準化会合参加企業との連携に向けた議論を個別に行うのみならず、各種フォーラムの活用や学会企画の開催などを通じて継続して行う。特に IEEE 802 標準化委員会においてはミリ波帯のみならず、より高い周波数帯の活用なども念頭に、IRS 利用に関する標準化開始に向けた提案活動を行う。

さらに、広報活動の一環としては、申請中のため実施の可否は未確定だが、大阪万博での B5G ブースでの技術紹介への参加も提案しており、実現した暁には、参加する世界中の人々に向けた成果の発信となり、本研究開発技術の普及に向けた大きな取り組みとなることが期待される。

② 展望

IRS については構造や制御回路の改良により実用レベルの薄型化や低消費電力化が実現されると期待できる。標準化については、例えば無線 LAN においては IEEE 802.11 IMMW の次のミリ波帯規格のドラフト作成作業が概ね収束している頃であり、ドラフト版準拠による IRS を活用したミリ波帯（を含めたマルチバンドの）無線 LAN 製品が出始め、高速（数 Gbps～数十 Gbps）かつ低遅延（1ms 程度）の通信がオフィスや工場などの環境で利用可能になっていると期待される。これらの展望を踏まえ、前述の計画を進めていくことで本研究開発成果の展開を検討する。

他方、代表研究機関は大学であることから、IRS に関する研究成果を学術論文として投稿していくことはもちろん、関連分野へのテーマ発展を継続していくことで学術分野における貢献を目指す。これと同時に、同テーマでの研究開発に携わる多くの学生を成長させていくことも目指す。社会的に重要かつ非常に有用であることが期待されているテーマに若手の人材を関与させることで、積極的かつ自主的な取り組みの実施を創発し、人材育成への貢献も継続する。

以上