

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：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
- ◆受託者：国立大学法人東北大学、株式会社国際電気通信基礎技術研究所
- ◆研究開発期間：令和3年度～令和5年度（3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150百万円（令和5年度50百万円）

2. 研究開発の目標

・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、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。

3. 研究開発の成果

研究開発項目1-a)
低オーバーヘッドで位相制御を行う方式を開発

研究開発項目1-b)
IRSを用いた通信システムの最適な構成法を確立

研究開発項目2) 干渉波の到来を確率的に予測し、その結果からMIMOのランクと受信重みを決定する技術を確立

基地局、IRS制御装置の相互連携方式

基地局、IRS制御装置の相互連携方式

IRSの配置などを最適化

干渉波の到来を確率的に予測し、その結果からMIMOのランクと受信重みを決定する技術を確立

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

- ベクトル量子化に基づいてCodebookを生成し、あらかじめ用意した位相パターンを順次試行することでオーバーヘッドを削減する方法等を考案。
- IRSの制御**オーバーヘッドを1/10以下に改善**させることが可能であることを確認。

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

- 電波伝搬シミュレータWireless Insitelによるレイトレースシミュレーションを用いたIRSの配置位置による影響検証やIRSの複数事業者共用システムを考案。
- IRSの運用システムを適切に定めることで**面的周波数利用効率を大きく向上**させることができることを確認。

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

- 送信源の移動によるミリ波帯伝搬路変動をガウス過程回帰を用いて予測する手法を考案。**実測伝搬路を用いた評価で「予測誤差10%以内」の達成を確認。**
- 干渉波到来確率に応じてMIMO伝送のランク数と受信重みを制御する方式を考案。シミュレーションにより**「理想状態比80%以上の通信容量」達成を確認。**

研究開発項目1) 開発したIRSの特性評価実験

研究開発項目2) ns-3をベースにしたIEEE 802.11ayシミュレータに開発IRSの実反射特性を反映したPoC検証系を構築

```

graph TD
    subgraph "研究開発項目1技術"
        A[IRS特性  
(計算値/実測値)] --> B[電波伝搬  
シミュレータ]
    end
    subgraph "シナリオ"
        C[エリア情報  
・端末移動  
・IRS制御ポリシー  
・無線設定]
    end
    B --> D[受信電力計算]
    C --> E[無線LANモジュール]
    D --> F[開発技術を実装した無線シミュレータ(ns-3ベース)]
    E --> F
    F --> G[シミュレーションログ]
  
```

項目1 IRS試作機の性能評価

- これまでの検討に基づく数値計算により決定したIRS制御を実行することで**所望方向に反射利得を形成することに成功。**
- IRS面を仮想的に分割し異なる制御を実行することで**2本のビームを同時に形成することに成功。**
- IRSの反射特性切り替え測定にて100ms以下での切り替えを確認するとともに制御システムの改善により1ms以下での動作が達成可能である目途を確認。

項目2 統合評価 (PoC検証)

- 本研究開発にて開発した技術無線LANに適用した場合の周波数利用効率改善効果の評価のために、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。**

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
8 (3)	2 (0)	4 (2)	31 (10)	0 (0)	1 (1)	2 (1)	4 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

- (1) 国際会議IEICE TCSR SmartCom Virtual WorkshopにてIRSに関するチュートリアル講演
国内外の研究者に向けてIRSに関する最新の研究動向、研究成果を紹介。
- (2) A3 Foresight Program 2021 WorkshopでBest Presentation Awardを受賞。
- (3) 自律型IRSに関する研究成果をIEEE Global Communications Conference 2022に投稿し採録。本成果に対して2022 IEEE ComSoc Sendai Chapter Student Excellent Research Awardを受賞。
- (4) 項目1の研究開発成果に関してIEEE Transactions on Vehicular Technologyに3件の研究論文が採録、IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networkingに1件の研究論文が採録。
- (6) 積水化学工業株式会社から提供された電波反射フィルムによる反射特性測定実験を実施。
- (8) 世界初となる60GHz帯IRS実機開発に関して東北大学よりプレスリリースを実施。
- (7) 開発したIRS試作機による反射特性測定実験を実施。
- (8) ガウス過程回帰に基づく伝搬路予測手法および確率的干渉到来情報を用いたMIMO伝送手法に関する研究成果をIEICE Communications Express (ComEX) にそれぞれ投稿し採録。
- (9) 国際会議ICACT 2023にてMUSICスペクトラムを用いた干渉検出手法および確率的干渉到来情報を用いたMIMO伝送手法に関する研究発表を実施。前者は「Certificate of Outstanding Paper Award」を受賞。
- (10) 電子情報通信学会短距離無線通信 (SRW) 研究会において、ガウス過程回帰に基づく伝搬路予測手法に関する研究発表を実施し、これに対して「短距離無線通信研究会研究奨励賞」を受賞。本受賞に伴い同研究会において依頼講演を実施。
- (11) ATRオープンハウス2022およびATRオープンハウス2023において、研究成果の展示を実施。

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

- 計画
 - ・ 実ユースケース、実無線通信システムにおけるIRSの要求性能を明確化し、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する。
 - ・ 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・展示会への出展や各種フォーラムの活用や関連学会企画の開催などを通じたアピールを積極的に行う。
 - ・ 標準化については標準化会合参加企業との議論、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。
- 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LANI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。